

# ANUNCIOS

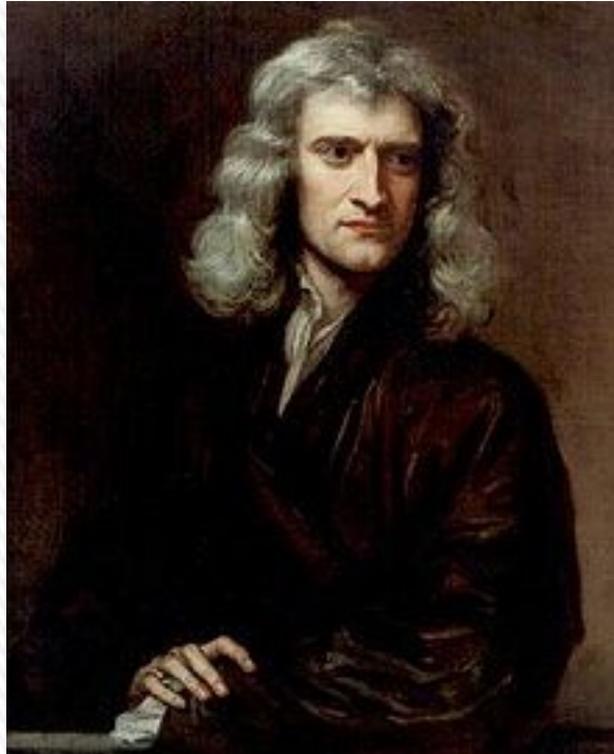
**1- 1er. Parcial: Sábado 20 de mayo hora 9:00. En forma presencial**

**2- Segunda evaluación corta:** Desde el jueves 20/4 hasta el sábado a la medianoche.  
Unidad 2 (cinemática y vectores).

**3- Consultas:** Clase de consultas: sábado de 9:00 a 10:30 por Zoom. Enlace en EVA igual al del teórico virtual.



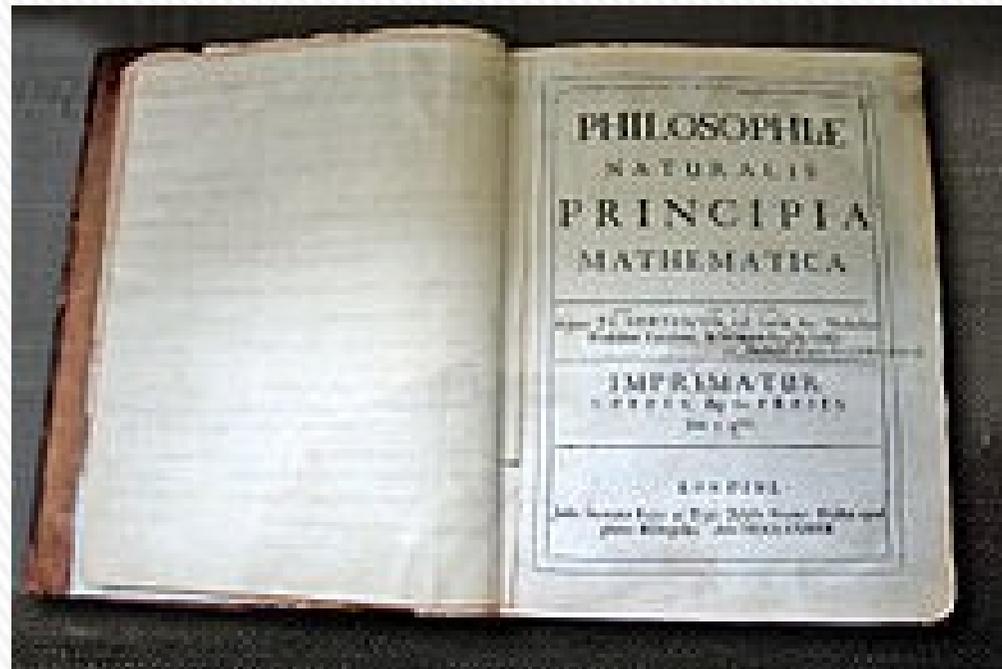
# 05- LEYES DEL MOVIMIENTO Y EQUILIBRIO ESTÁTICO



1642 (1643) -1727

*Is. Newton*

Fuerzas e interacciones. Superposición de fuerzas. 1era. Ley de Newton o ley de inercia. Marcos de referencia. Masa. 2da. Ley de Newton. 3era. Ley de Newton o Principio de Acción y Reacción. Fuerzas de fricción y gravitatorias.



*Principios Matemáticos de la Filosofía Natural (1687)*

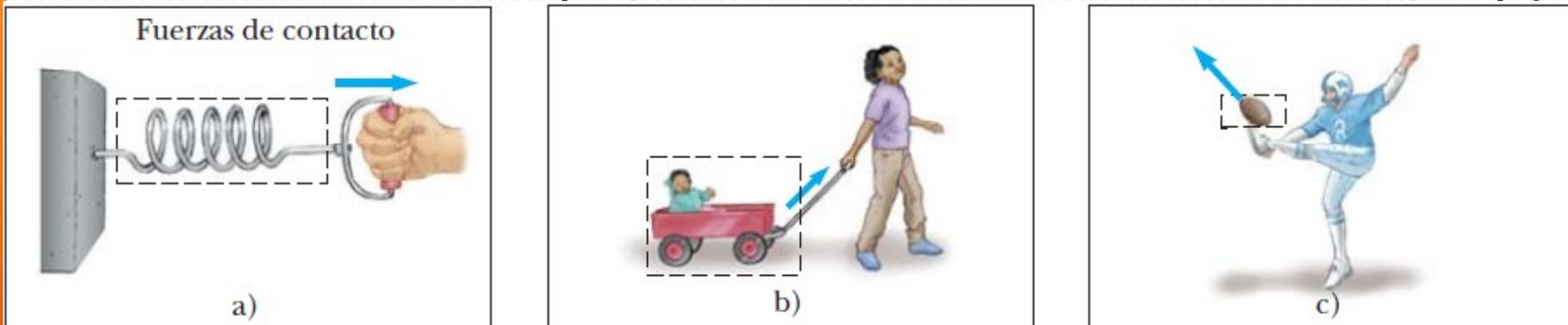
# Fuerzas e interacciones

***Fuerza es una interacción entre dos cuerpos o entre un cuerpo y su entorno.***

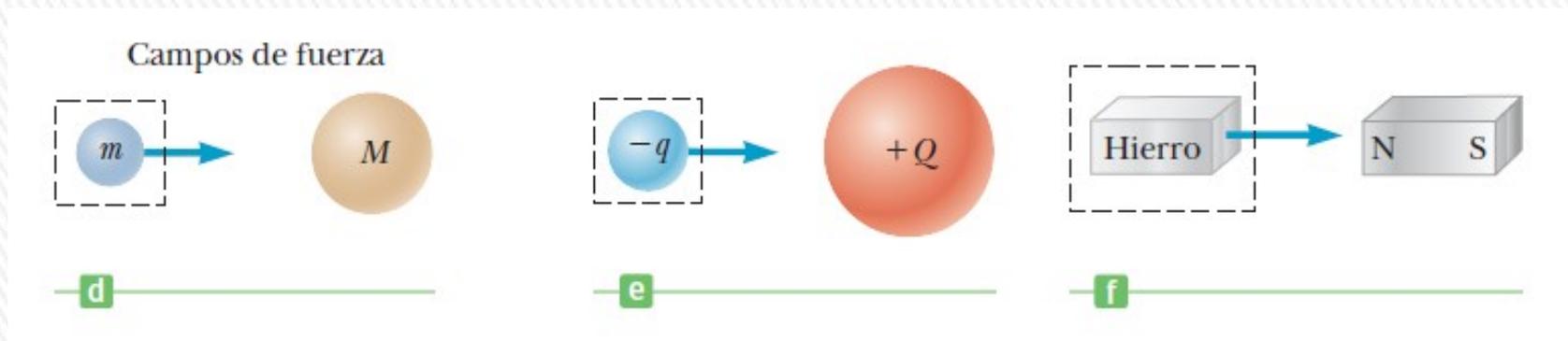
La fuerza es una magnitud vectorial.

**Clasificación macroscópica:**

**fuerzas de contacto** (implica contacto directo entre cuerpos) y,

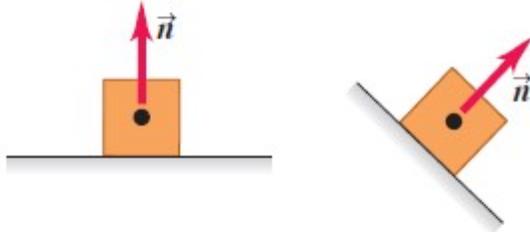


**fuerzas de largo alcance (de campo).**

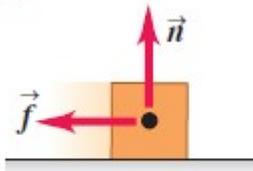


# Fuerzas e interacciones

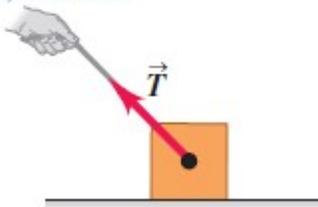
a) **Fuerza normal  $\vec{n}$** : Cuando un objeto descansa o se empuja sobre una superficie, esta ejerce un empujón sobre el objeto que es perpendicular a la superficie.



b) **Fuerza de fricción  $\vec{f}$** : Además de la fuerza normal, una superficie puede ejercer una fuerza de fricción sobre un objeto que es paralela a la superficie.



c) **Fuerza de tensión  $\vec{T}$** : La fuerza de un tirón ejercida sobre un objeto por una cuerda, un cordón, etcétera.



**Fuerza normal:** *ejercida sobre un objeto por cualquier superficie con la que esté en contacto.*

*Siempre actúa perpendicular a la superficie de contacto*, sin importar el ángulo de esa superficie.

**Fuerza de fricción:** *ejercida sobre un objeto por una superficie rugosa, actúa paralela a la superficie, en el sentido opuesto al deslizamiento.*

**Fuerza de tensión:** *fuerza del tirón ejercida por una cuerda o hilo tenso sobre un objeto al cual se ata.*

# Fuerzas e interacciones

Al examinar a nivel atómico, todas las fuerzas macroscópicas que se clasifican como fuerzas de contacto resultan ser causadas por fuerzas (de campo) eléctricas.

Las únicas **cuatro fuerzas fundamentales** conocidas en la naturaleza son todas fuerzas de campo:

- 1) **fuerzas gravitacionales** entre objetos,
- 2) **fuerzas electromagnéticas** entre cargas eléctricas,
- 3) **fuerzas fuertes** entre partículas subatómicas y
- 4) **fuerzas débiles** que surgen en ciertos procesos de decaimiento radiactivo.

En la física clásica sólo interesan las fuerzas gravitacional y electromagnética.

La unidad de magnitud de fuerza en el SI es el **newton**, que se abrevia N.

# Superposición de fuerzas

**Principio de superposición:** el efecto de cualquier cantidad de fuerzas aplicadas a un punto de un cuerpo es el mismo que el de una sola fuerza igual a la suma vectorial de las fuerzas

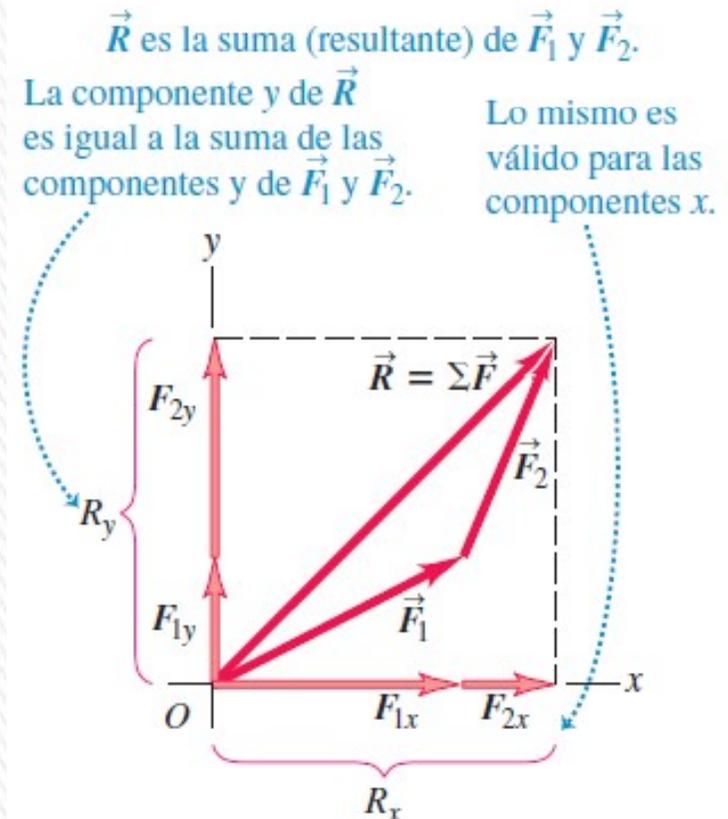
La **fuerza neta (o total o resultante)** es la suma vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre el objeto.

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 + \dots = \sum_i \vec{F}_i$$

Ecuación vectorial que puede expresarse en varias ecuaciones escalares (tantas como dimensiones tenga la situación)

$$R_x = \sum F_x$$

$$R_y = \sum F_y$$



# Primera ley de Newton: Ley de Inercia

Es posible observar un objeto en movimiento desde muchos **marcos de referencia**.

La **primera ley del movimiento de Newton**, a veces llamada **ley de la inercia**, define un conjunto especial de marcos de referencia llamados **marcos inerciales**.

## PRIMERA LEY DE NEWTON (1)

Si un objeto no interactúa con otros objetos, es posible identificar un marco de referencia en el que el objeto tiene aceleración cero.

Tal marco de referencia se llama **marco de referencia inercial**.



# Primera ley de Newton: Ley de Inercia

## MARCOS DE REFERENCIA INERCIALES

Cualquier marco de referencia que se mueve con velocidad constante en relación con un marco inercial es, en sí mismo, un marco inercial.

Un marco de referencia que se mueve con velocidad constante en relación con las estrellas distantes es la **mejor aproximación de un marco inercial**.

**Para propósitos de estudio, se considera a la Tierra como marco inercial.**

La Tierra no es estrictamente un marco inercial debido a su movimiento orbital en torno al Sol y su movimiento rotacional alrededor de su propio eje, y ambos involucran aceleraciones centrípetas, pero como son pequeñas comparadas con  $g$ , *con frecuencia se pueden despreciar*.

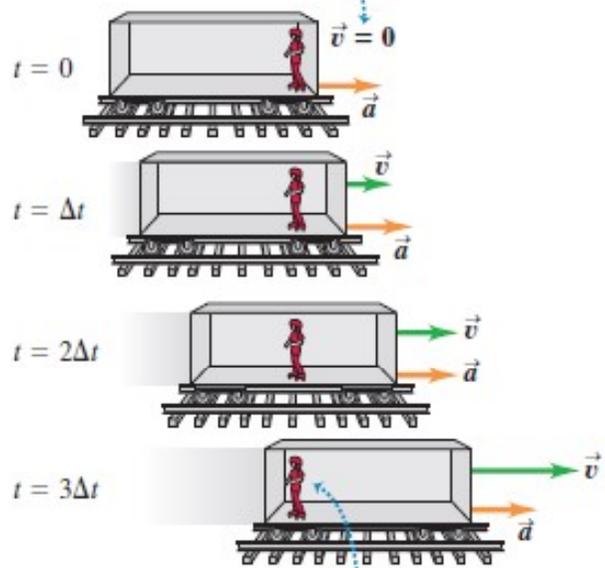
Por esta razón supondremos que: **La Tierra representa un marco inercial, junto con cualquier otro marco unido a él.**

# Primera ley de Newton: Ley de Inercia

## Marcos de referencia no inerciales

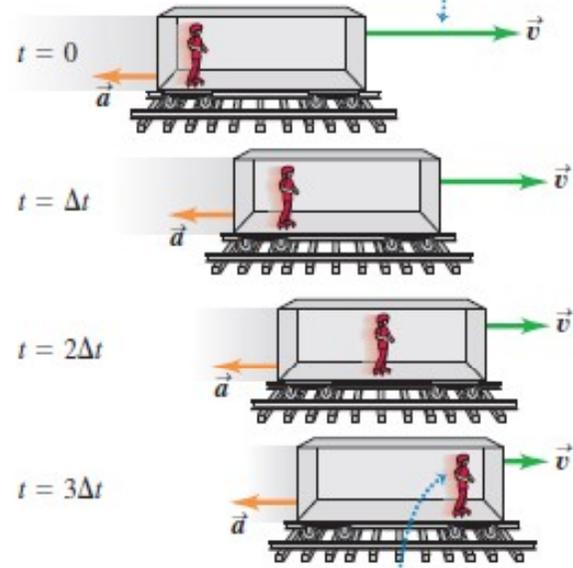
### 4.11 Viaje en un vehículo con aceleración.

a) Inicialmente usted y el vehículo están en reposo.



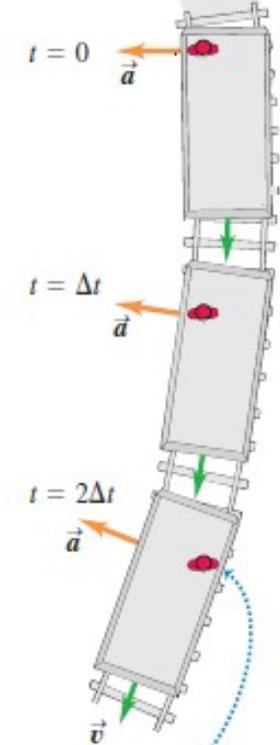
Usted tiende a permanecer en reposo cuando el vehículo acelera.

b) Inicialmente usted y el vehículo están en movimiento.



Usted tiende a seguir moviéndose con velocidad constante cuando frena el vehículo en el que se encuentra.

c) El vehículo da vuelta a rapidez constante.



Usted tiende a seguir moviéndose en línea recta cuando el vehículo da vuelta.

# Primera ley de Newton: Ley de Inercia

Enunciado alternativo (más práctico):

## PRIMERA LEY DE NEWTON (2)

En ausencia de fuerzas externas, y cuando se ve desde un marco de referencia inercial, un objeto en reposo se mantiene en reposo y un objeto en movimiento continúa en movimiento con una velocidad constante (con rapidez constante en línea recta).

Cuando ninguna fuerza actúa sobre un objeto, la aceleración del objeto es cero.

Conclusión: cualquier **objeto aislado** (*uno que no interactúa con su entorno*) está en reposo o en movimiento con velocidad constante.

La tendencia de un objeto a resistir cualquier intento por cambiar su velocidad se llama **inercia**.

Cuando un cuerpo está en reposo o se mueve con velocidad constante (en línea recta), decimos que el **cuerpo está en equilibrio**.

**Para que un cuerpo esté en equilibrio**, no deben actuar fuerzas sobre él, o deben actuar varias fuerzas cuya resultante, es decir, la fuerza neta, sea cero:

**Cuerpo en equilibrio:**

$$\sum \vec{F} = 0$$

Esto se cumple si cada componente de la fuerza neta es cero.

**Estamos suponiendo que el cuerpo puede representarse adecuadamente como una partícula puntual.**

Si el cuerpo tiene tamaño finito, tendremos que considerar también en *qué parte del cuerpo se aplican las fuerzas*.

# MASA

**Propiedad de un objeto que especifica cuánta resistencia muestra un objeto para cambiar su velocidad (inercia).**

La unidad del SI de masa es el **kilogramo (kg)**. Es una cantidad escalar.

Los experimentos muestran que mientras más grande sea la masa de un objeto, menos acelera el objeto bajo la acción de una fuerza dada.

La masa es una propiedad inherente de un objeto y es independiente de los alrededores del objeto y del método que se aplica para medirla.

**Masa y el peso son dos cantidades diferentes.**

El peso de un objeto es igual a la magnitud de la fuerza gravitacional ejercida sobre el objeto y varía con la posición.

Por ejemplo, un objeto que pesa 100 N sobre la Tierra pesa solo aproximadamente 16,5 N sobre la Luna.

La masa de un objeto en cualquier lugar es la misma: un objeto que tiene una masa de 10 kg sobre la Tierra también tiene una masa de 10 kg sobre la Luna.

## Segunda ley de Newton

2da. ley de Newton responde la pregunta de que acontece a un objeto que tiene una o más fuerzas que actúan sobre él.

Empujo un bloque de masa fija a través de una superficie horizontal sin fricción. Si hago una fuerza horizontal  $\mathbf{F}$  sobre el bloque, éste se mueve con cierta aceleración  $\mathbf{a}$ .

Si aplico una fuerza  $2\mathbf{F}$  sobre el mismo bloque, la aceleración del bloque será  $2\mathbf{a}$ . Si aumenta la fuerza aplicada a  $3\mathbf{F}$ , la aceleración se triplica, etc.

### SEGUNDA LEY DE NEWTON:

Cuando se ve desde un marco de referencia inercial, la aceleración de un objeto (de masa constante) es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él e inversamente proporcional a su masa:

$$\sum \bar{\mathbf{F}} = m\bar{\mathbf{a}}$$

Ecuación válida sólo cuando la rapidez del objeto es mucho menor que la rapidez de la luz y para objetos que tienen masa constante.

## Segunda ley de Newton

**CUIDADO!!!:** La fuerza es la causa de cambios en el movimiento y no necesariamente la causa del movimiento. Se puede tener movimiento en ausencia de fuerzas, como describe la primera ley de Newton. La fuerza es la causa de los cambios en el movimiento, que se mide por la aceleración.

La ecuación  $\sum \vec{F} = m\vec{a}$  es una expresión vectorial y por tanto es equivalente a dos ecuaciones componentes en problemas en dos dimensiones:

$$\sum F_x = ma_x \quad \sum F_y = ma_y$$

**CUIDADO!!!:**  $m \cdot a$  no es una fuerza -

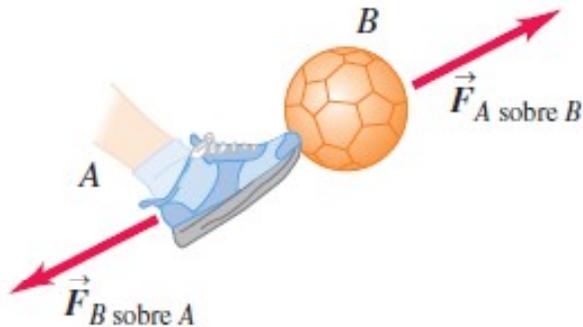
La ecuación correspondiente a la 2da. ley de Newton *no indica que el producto  $m \cdot a$  sea una fuerza.*

Todas las fuerzas sobre un objeto se suman como vectores para generar la fuerza neta en el lado izquierdo de la ecuación.

## Tercera ley de Newton: Principio de acción y reacción

Si el cuerpo A ejerce una fuerza  $\vec{F}_{A \text{ sobre } B}$  sobre el cuerpo B, entonces, el cuerpo B ejerce una fuerza  $\vec{F}_{B \text{ sobre } A}$  sobre el cuerpo A que tiene la misma magnitud, pero dirección opuesta:

$$\vec{F}_{A \text{ sobre } B} = -\vec{F}_{B \text{ sobre } A}$$



Las fuerzas son *interacciones entre dos objetos*: cuando empujamos sobre un objeto, el objeto empuja de vuelta sobre nosotros.

Los experimentos indican que, al interactuar dos cuerpos, las fuerzas que ejercen mutuamente son *iguales en magnitud y opuestas en dirección*.

Este importante principio se conoce como **tercera ley de Newton**:

### TERCERA LEY DE NEWTON:

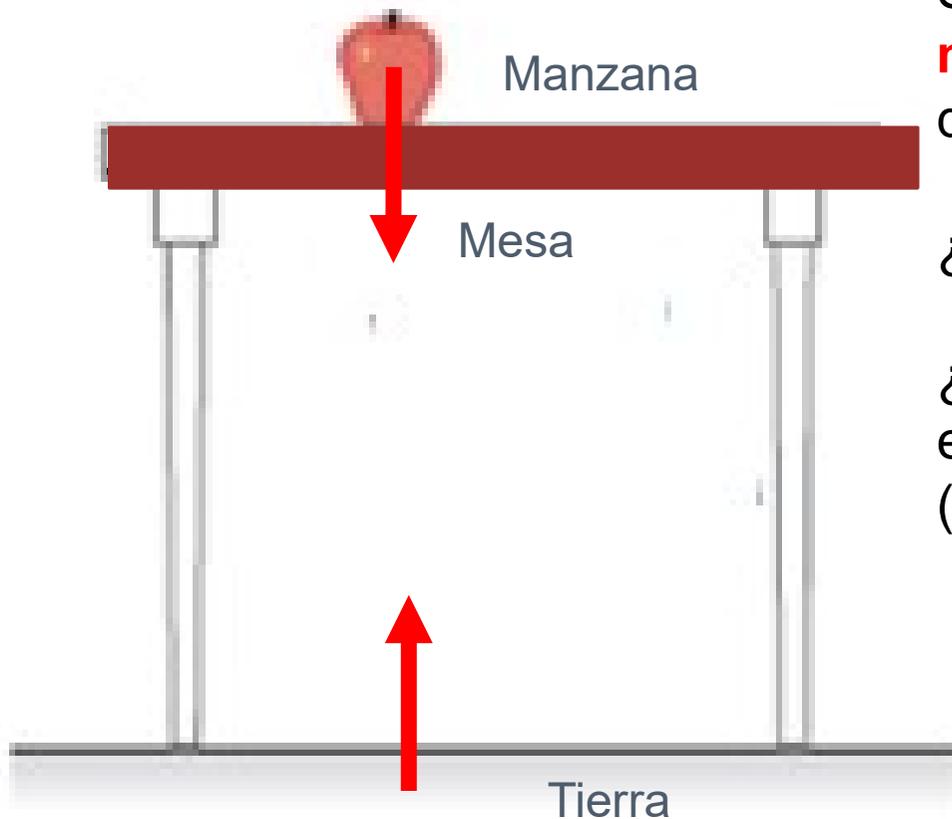
Si dos objetos interactúan, la fuerza  $\vec{F}_{12}$  que ejerce el objeto 1 sobre el objeto 2 es igual en magnitud y dirección y opuesta en sentido a la fuerza  $\vec{F}_{21}$  que ejerce el objeto 2 sobre el objeto 1:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

La fuerza que el objeto 1 ejerce sobre el objeto 2 se llama **fuerza de acción**, y la fuerza del objeto 2 sobre el objeto 1 se llama **fuerza de reacción**.

## Pregunta rápida

Tengo una manzana apoyada sobre una mesa y ésta a su vez está sobre la superficie de la Tierra.



Si considero que el **peso de la manzana** es según la 3era. Ley de Newton la “acción”...

¿Cuál es la “reacción”?

¿Es efectivamente la fuerza que ejerce la mesa sobre la manzana (es decir la reacción N)?

**No!!! En todos los casos, las fuerzas de acción y reacción actúan sobre objetos diferentes y deben ser del mismo tipo (gravitacional, eléctrica, etc.) La reacción es una fuerza de origen gravitatorio que actúa sobre el centro de la Tierra, vertical de igual magnitud al peso de la manzana y sentido contrario.**

Revisemos los enunciados de las leyes de Newton del movimiento....

### PRIMERA LEY DE NEWTON (1)

Si un objeto no interactúa con otros objetos, es posible identificar un marco de referencia en el que el objeto tiene aceleración cero.

Tal marco de referencia se llama **marco de referencia inercial**.

### PRIMERA LEY DE NEWTON (2)

En ausencia de fuerzas externas, y cuando se ve desde un marco de referencia inercial, un objeto en reposo se mantiene en reposo y un objeto en movimiento continúa en movimiento con una velocidad constante (esto es, con una rapidez constante en una línea recta).

### SEGUNDA LEY DE NEWTON:

Cuando se ve desde un marco de referencia inercial, la aceleración de un objeto (de masa constante) es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él e inversamente proporcional a su masa:

$$\sum \bar{F} = ma$$

### TERCERA LEY DE NEWTON:

Si dos objetos interactúan, la fuerza  $\bar{F}_{12}$  que ejerce el objeto 1 sobre el objeto 2 es igual en magnitud y dirección y opuesta en sentido a la fuerza  $\bar{F}_{21}$  que ejerce el objeto 2 sobre el objeto 1:

$$\bar{F}_{12} = -\bar{F}_{21}$$

## Recapitulemos...

**1. La 1era. ley de Newton y la 2da. se refieren a un cuerpo específico.**

Al usar la primera ley de Newton,  $\sum \vec{F} = 0$ , en una **situación de equilibrio**, o la segunda,  $\sum \vec{F} = m\vec{a}$  en una **situación sin equilibrio**, debemos decidir desde un principio a qué cuerpo nos estamos refiriendo.

**2. Sólo importan las fuerzas que actúan sobre el cuerpo.**

La sumatoria  $\sum \vec{F}$  incluye todas las fuerzas que actúan *sobre el cuerpo en cuestión*.

Por lo tanto, una vez elegido el cuerpo que analizaremos, tendremos que identificar todas las fuerzas que actúan sobre él.

Por ejemplo, para analizar a una persona que camina, incluiríamos en la fuerza que el suelo ejerce sobre la persona al caminar, pero *no la fuerza que la persona ejerce sobre el suelo*.

# DIAGRAMAS DE CUERPO LIBRE (D.C.L.)

## 3. Los DCL son indispensables para identificar las fuerzas relevantes.

**Diagrama de cuerpo libre (DCL)** es un diagrama que muestra **solamente** el cuerpo elegido, "libre" de su entorno, con vectores que muestran las magnitudes y direcciones de todas las fuerzas aplicadas sobre el cuerpo por todos los cuerpos que interactúan con él.

*Se debe incluir todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo, y cuidar de no incluir fuerzas que el cuerpo ejerza sobre otro cuerpo.*

**Las dos fuerzas de un par acción-reacción nunca deben aparecer en el mismo DCL** porque nunca actúan sobre el mismo cuerpo.

Tampoco se incluyen las fuerzas que un cuerpo ejerce sobre sí mismo, ya que estas no pueden afectar su movimiento.

Eventualmente podemos indicar el vector aceleración que experimenta el cuerpo si lo podemos intuir o suponer.

## Ejemplo: Máquina de Atwood



**Máquina de Atwood.** Una carga de 15.0 kg de ladrillos cuelga del extremo de una cuerda que pasa por una polea pequeña sin fricción y tiene un contrapeso de 28.0 kg en el otro extremo, como se muestra en la figura. El sistema se libera del reposo.

- Dibuje dos diagramas de cuerpo libre, uno para la carga de ladrillos y otro para el contrapeso.
- ¿Qué magnitud tiene la aceleración hacia arriba de la carga de ladrillos?
- ¿Qué tensión hay en la cuerda mientras la carga se mueve? Compare esa tensión con el peso de la carga de ladrillos y con el del contrapeso.

**¿Qué modelos usaremos para resolver el ejercicio?**

- 1) Cuerda ideal: inextensible, sin masa y sin fricción.
- 2) Polea: pequeña y sin fricción.
- 3) Consideramos que las mediciones se realizan desde un marco de referencia inercial.
  - 1) Esto asegura que las velocidades y aceleraciones de los objetos es la misma.
  - 2) Asegura que la tensión es la misma en toda la cuerda (no se requiere un torque para hacer girar la polea).
  - 3) Puedo aplicar la 2da. Ley de Newton-

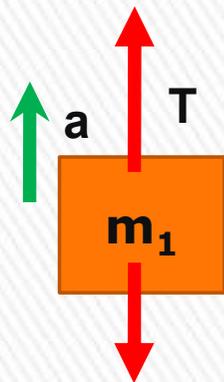
### Datos:

masa de los ladrillos  $m_1=15,0$  kg; masa del contrapeso  $m_2=28,0$  kg  
 $g=9,8$  m/s<sup>2</sup> (se considera como valor exacto)

Ambas masas van a tener la misma aceleración (en módulo)

Como  $m_2 > m_1$ , el contrapeso ( $m_2$ ) va a bajar, y los ladrillos ( $m_1$ ) suben,, esto implica que  $m_1$  tendrá una aceleración hacia arriba mientras que  $m_2$  la tendrá hacia abajo.

#### DCL de ladrillos $m_1$



2da. Ley de Newton a  $m_1$ , considerando positivo el sentido ascendente.

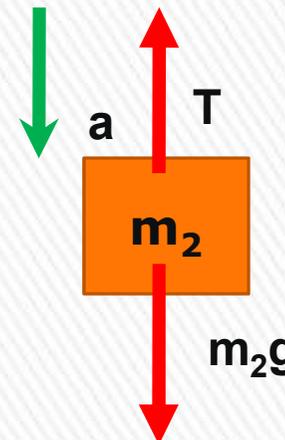
$$m_1 a = T - m_1 g \quad (1)$$

$m_1 g$

2da. Ley de Newton a  $m_2$ , positivo sentido descendente.

$$m_2 a = m_2 g - T \quad (2)$$

#### DCL de contrapeso $m_2$



De (1) despejo  $T$  y lo introduzco en (2):  $T = m_1 a + m_1 g$   
 $m_2 a = m_2 g - T = m_2 g - (m_1 a + m_1 g) \rightarrow m_2 g - m_1 g = m_2 a + m_1 a$

De (1) despejo T y lo introduzco en (2):  $T = m_1 a + m_1 g$   
 $m_2 a = m_2 g - T = m_2 g - (m_1 a + m_1 g) \rightarrow m_2 g - m_1 g = m_2 a + m_1 a$

$$(m_2 - m_1)g = (m_2 + m_1)a$$

$$a = \left( \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} \right) g = \left( \frac{28.0 \text{ kg} - 15.0 \text{ kg}}{15.0 \text{ kg} + 28.0 \text{ kg}} \right) (9.80 \text{ m/s}^2) = 2.96 \text{ m/s}^2$$

Como

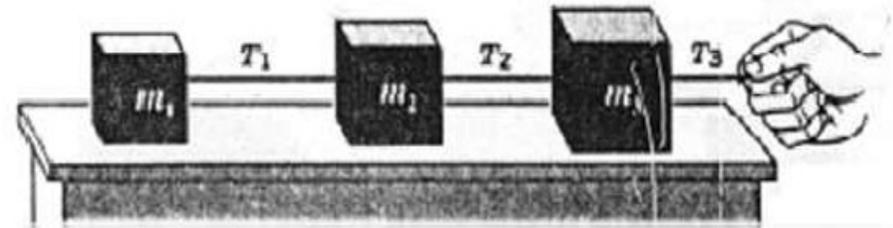
$$T = m_1 a + m_1 g$$

$$T = m_1(a + g) = (15.0 \text{ kg})(2.96 \text{ m/s}^2 + 9.80 \text{ m/s}^2) = 191 \text{ N}$$

$$a = 2,96 \text{ m/s}^2 \quad T = 191 \text{ N}$$



## Ejercicio 3.5



Tres bloques están unidos como se muestra en la figura sobre una mesa horizontal carente de fricción y son jalados hacia la derecha con una fuerza  $T_3 = 6,50 \text{ N}$ . Si  $m_1 = 1,20 \text{ kg}$ ,  $m_2 = 2,40 \text{ kg}$  y  $m_3 = 3,10 \text{ kg}$ , calcule:

- la aceleración del sistema
- las tensiones  $T_1$  y  $T_2$ .

a) Los tres bloques se mueven juntos, entonces considero el conjunto de los tres bloques, con una masa  $M = 1,20 + 2,40 + 3,10 = 6,70 \text{ kg}$ . Sobre este conjunto, sólo actúa como fuerza externa horizontal  $T_3$ . Por tanto al aplicar la 2da ley de Newton al conjunto:  $Ma = T_3$

$$a = T_3 / M = 6,50 / 6,70 = 0,970 \text{ m/s}^2$$

$$a = 0,970 \text{ m/s}^2$$

b) Los tres bloques se mueven juntos, por lo que todos tienen la misma aceleración que la del conjunto.

Por tanto al aplicar la 2da ley de Newton al primer bloque:  $m_1 a = T_1$

$$T_1 = m_1 a = (1,20 \text{ kg}) (0,970 \text{ m/s}^2) = 1,16 \text{ N}$$

Por tanto al aplicar la 2da ley de Newton al segundo bloque:  $m_2 a = T_2 - T_1$

$$T_2 = m_2 a + T_1 = (2,40 \text{ kg}) (0,970 \text{ m/s}^2) + 1,16 = 3,49 \text{ N}$$

$$T_1 = 1,16 \text{ N}$$

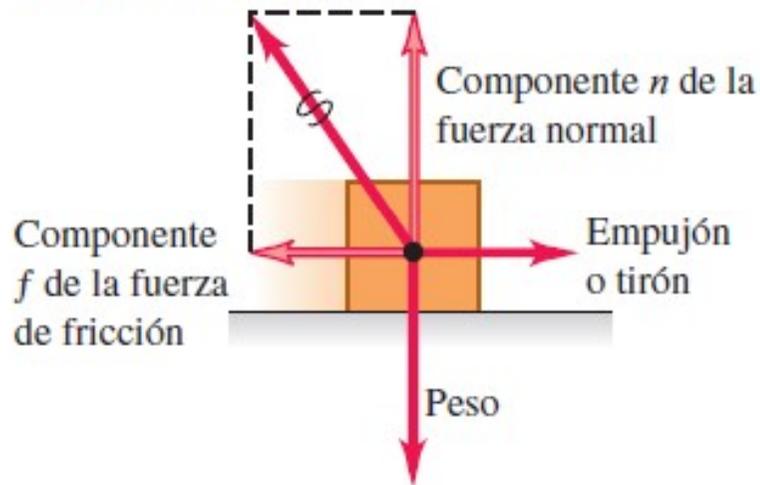
$$T_2 = 3,49 \text{ N}$$

# FUERZAS DE FRICCIÓN

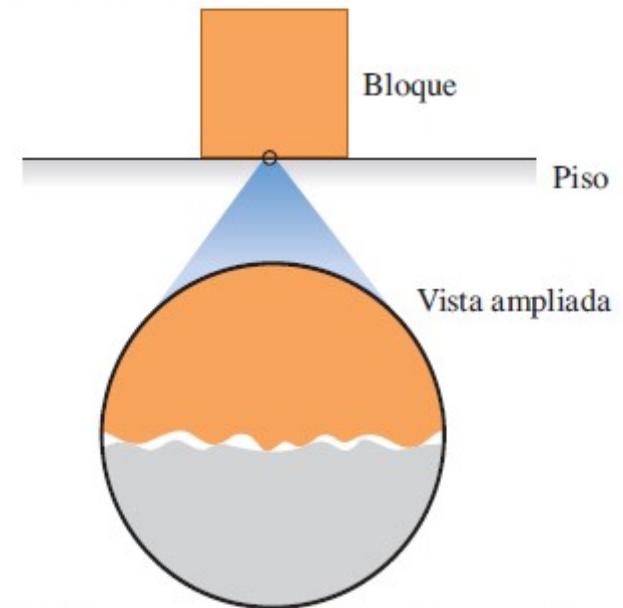
**5.17** Cuando se empuja el bloque o se tira de él sobre una superficie, esta última ejerce una fuerza de contacto sobre el bloque.

Las fuerzas de fricción y normal son realmente componentes de una sola fuerza de contacto.

Fuerza de contacto



**5.18** Las fuerzas normal y de fricción surgen de interacciones entre moléculas en los puntos elevados de las superficies del bloque y del piso.



A nivel microscópico, inclusive las superficies lisas son ásperas y tienden a “engancharse”.

Sin fricción entre los neumáticos y el asfalto, el automóvil no podría avanzar ni dar vuelta.

El arrastre del aire reduce el rendimiento del combustible en los automóviles, pero hace que funcionen los paracaídas.

Sin fricción, los clavos se desclavarían, las lamparillas eléctricas se desatornillarían sin esfuerzo.... y no podríamos caminar.

## Fricción cinética y estática

Cuando un cuerpo descansa o se desliza sobre una superficie, esta última ejerce una sola fuerza de contacto sobre el cuerpo, con componentes de fuerza perpendiculares y paralelas a la superficie.

La componente vectorial perpendicular es la **fuerza normal (n o N)**

La componente vectorial paralela a la superficie (y paralela) a es la **fuerza de fricción (f)**

Si la superficie no tiene fricción, entonces será cero, pero habrá todavía una fuerza normal. Las superficies sin fricción son una idealización inalcanzable.

**El sentido de la fuerza de fricción siempre es opuesta al movimiento relativo de las dos superficies.**

La fricción que actúa cuando un cuerpo se desliza sobre una superficie es la **fuerza de fricción cinética  $f_k$** .

Su magnitud se *determina en forma experimental es aproximadamente proporcional a la magnitud  $n$  de la fuerza normal.*

$$f_k = \mu_k n \quad (\text{magnitud de la fuerza de fricción cinética})$$

$\mu_k$ : coeficiente de fricción cinético

# FUERZAS DE FRICCIÓN

**Tabla 5.1 Coeficientes de fricción aproximados**

Materiales	Coefficiente de fricción estática, $\mu_s$	Coefficiente de fricción cinética, $\mu_k$
Acero sobre acero	0.74	0.57
Aluminio sobre acero	0.61	0.47
Cobre sobre acero	0.53	0.36
Latón sobre acero	0.51	0.44
Zinc sobre hierro colado	0.85	0.21
Cobre sobre hierro colado	1.05	0.29
Vidrio sobre vidrio	0.94	0.40
Cobre sobre vidrio	0.68	0.53
Teflón sobre teflón	0.04	0.04
Teflón sobre acero	0.04	0.04
Hule sobre concreto (seco)	1.0	0.8
Hule en concreto (húmedo)	0.30	0.25

Las fuerzas de fricción también actúa a pesar de que *no haya movimiento relativo*.

## Fuerza de fricción estática $f_s$ .

Los experimentos revelan que su valor máximo, llamado  $(f_s)_{máx}$ , es *aproximadamente proporcional a  $n$* ; llamamos **coeficiente de fricción estática** al factor de proporcionalidad  $\mu_s$ .

$$f_s \leq \mu_s n \quad (\text{magnitud de la fuerza de fricción estática})$$

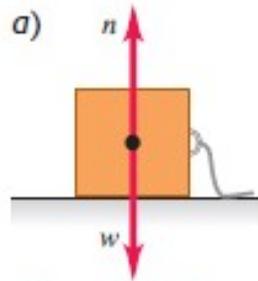
**El coeficiente de fricción cinética suele ser menor que el de fricción estática para un par de superficies dado.**

La **fuerza de fricción** es la que hace que una persona o animal pueda acelerar desde el reposo hasta una cierta velocidad de carrera. El valor máximo estará dado  $f_{smáx}$  para la aceleración inicial, y a  $f_k$  cuando ya está en movimiento.

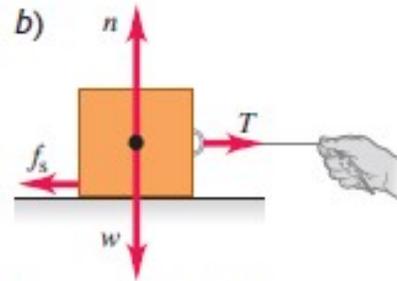
# FUERZAS DE FRICCIÓN



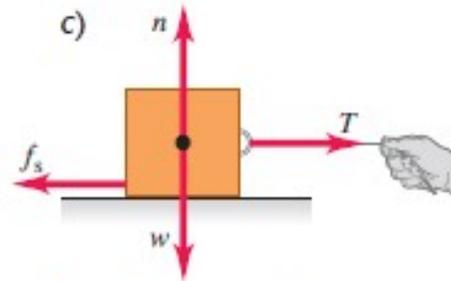
**5.19** a), b), c) Si no hay movimiento relativo, la magnitud de la fuerza de fricción estática  $f_s$  es igual o menor que  $\mu_s n$ . d) Si hay movimiento relativo, la magnitud de la fuerza de fricción cinética  $f_k$  es igual a  $\mu_k n$ . e) Gráfica de la magnitud de la fuerza de fricción  $f$  en función de la magnitud de  $T$  de la fuerza aplicada. La fuerza de fricción cinética varía un poco conforme se forman y se rompen los enlaces intermoleculares.



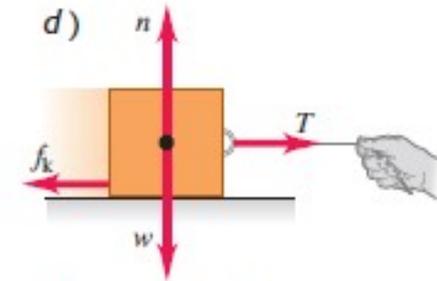
a) No se aplica fuerza, caja en reposo.  
Sin fricción:  
 $f_s = 0$



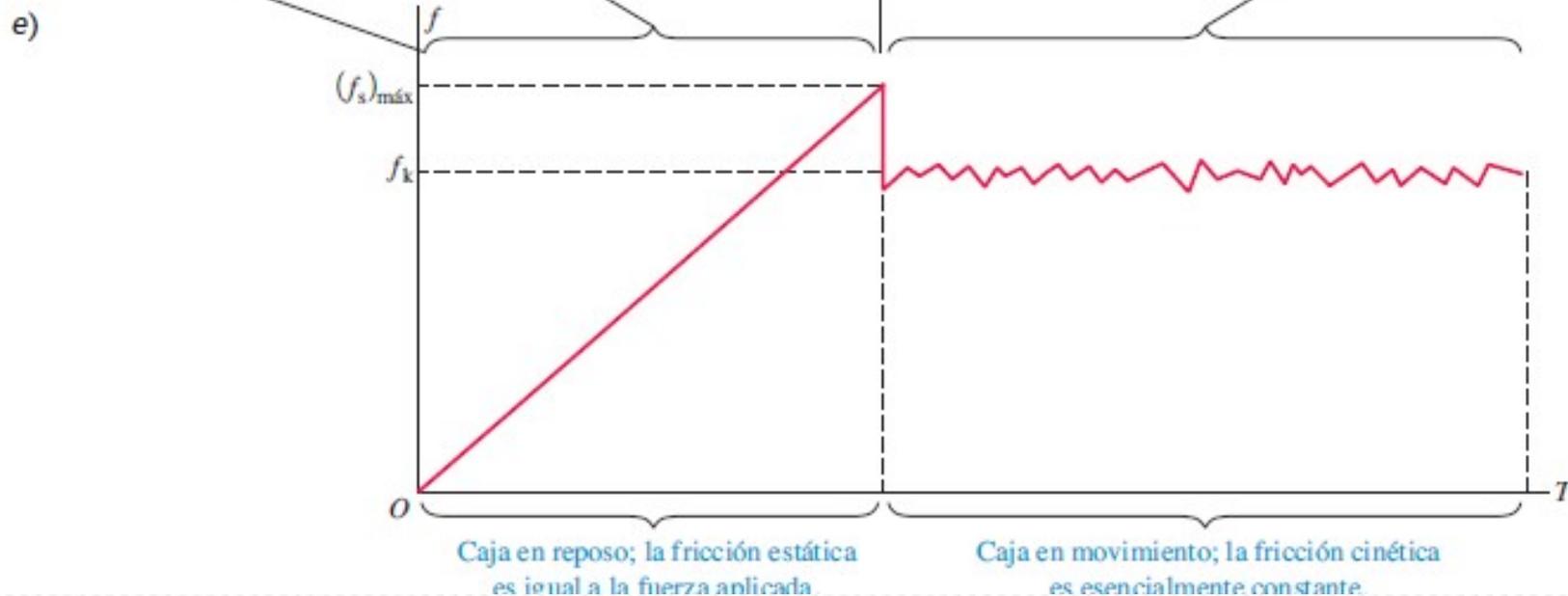
b) Fuerza aplicada débil, la caja permanece en reposo.  
Fricción estática:  
 $f_s < \mu_s n$



c) Mayor fuerza aplicada, caja a punto de deslizarse.  
Fricción estática:  
 $f_s = \mu_s n$



d) La caja se desliza con rapidez constante.  
Fricción cinética:  
 $f_k = \mu_k n$



# FUERZAS GRAVITATORIAS

Estudios del movimiento planetario condujo a Newton a establecer la *ley de la gravitación universal*.

Con esta ley y las tres leyes del movimiento, pudo deducir las leyes observadas del movimiento planetario.

Establece que todos los objetos del universo se atraen entre sí.

Para dos esferas, o para dos cuerpos de cualquier forma que sean tan pequeños en comparación con su separación que se puedan considerar como partículas puntuales, la ley tiene una forma sencilla.

Si dos esferas o partículas tienen masas gravitatorias  $m$  y  $m'$  y si sus centros están separados por una distancia  $r$ , las fuerzas entre ambas partículas valen:

$$F_g = G \frac{m \cdot m'}{r^2}$$

$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$  es la constante de gravitación universal

Las fuerzas gravitatorias se dirigen en la dirección de la recta que une los centros de las dos esferas (por esta razón a este tipo de fuerzas se les denomina *fuerzas centrales*), y son fuerzas de atracción.

Además varían con el cuadrado de la distancia de separación entre los cuerpos que interactúan.

# FUERZAS GRAVITATORIAS

La expresión anterior se aplica directamente a esferas y partículas puntuales. La fuerza gravitatoria ejercida por la Tierra sobre un objeto es relativamente grande a causa de la gran masa de la Tierra.

Por el contrario, la fuerza gravitatoria entre dos objetos de masa mediana es muy pequeña y difícil de detectar, como se muestra en el siguiente ejemplo.

**Ejemplo:** Los centros de dos esferas de 10 kg distan entre sí 10 cm

a) ¿Cuál es su atracción gravitatoria?

b) ¿Cuál es la razón de esta atracción al peso de una de las esferas?

$$F_g = G \frac{m \cdot m'}{r^2} = (6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2) \frac{(10 \text{ kg})(10 \text{ kg})}{(0,10 \text{ m})^2} = 6,67 \times 10^{-7} \text{ N}$$

Mientras que el peso vale:  $\text{Peso} = m \cdot g = 10 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2 = 98 \text{ N}$

$$\frac{F_g}{\text{Peso}} = \frac{6,11 \times 10^{-7}}{98} = 6,8 \times 10^{-9}$$

Este pequeño valor de este cociente explica por qué no notamos la atracción gravitatoria entre objetos de dimensiones ordinarias.

# FUERZA GRAVITACIONAL Y PESO

El **peso** de un objeto es la fuerza gravitacional que éste experimenta.

Para un objeto próximo a la superficie terrestre, dicha fuerza se debe en su mayor parte a la atracción de la Tierra.

Si  $R_T$  es el radio de la Tierra y  $M_T$  su masa, un objeto de masa gravitatoria  $m$  en la superficie de la Tierra está sometido a una fuerza gravitatoria:

$$F_g = G \frac{M_T \cdot m}{R_T^2}$$

La aceleración  $g$  resultante de esta fuerza se calcula mediante la segunda ley de Newton,  $F = ma$ :

$$g = \frac{F_g}{m} = G \frac{M_T}{R_T^2}$$

Este resultado dice que la aceleración de la gravedad es la misma para todos los objetos. Como el radio de la Tierra  $R_T$  es de 6.400 km, la aceleración gravitatoria a unos pocos metros o incluso a unos pocos kilómetros por encima de la superficie terrestre no diferirá mucho de  $9,8 \text{ m/s}^2$ .

Estrictamente, el valor de  $g$  para una altura  $h$  sobre la superficie de la Tierra vale:

$$g(h) = G \frac{M_T}{r^2} = G \frac{M_T}{(R_T + h)^2}$$