21- Momento lineal y choques

- Momento lineal o cantidad de movimiento o ímpetu.
- Impulso.
- Conservación del momento lineal.
- Colisiones

ANUNCIOS

1- Evaluación corta N° 5 – Se realiza desde este jueves 9/06 hasta el sábado 11/06 hasta las 23:55. Sobre Unidad 5: trabajo, energía, potencia.

2.- TUTORÍAS DE FÍSICA I

Están funcionando las tutorías para Física 1 a través del EVA de Física 1 para Biociencias.Hay cupo para nuevos estudiantes.
Por más información escribir a: ue@fcien.edu.uy

CLASES DE CONSULTAS: Sábados de 9:00 a 10:30 por Zoom (ver enlace en EVA).

REPASO CLASE PASADA

Momento lineal o cantidad de movimiento o ímpetu:

de un objeto (partícula) de masa m y velocidad **v**:

$$\overline{p} = m\overline{v}$$

La magnitud de la cantidad de movimiento *p de un objeto de masa m puede relacionarse* a su energía cinética *K:*

$$K = \frac{p^2}{2m}$$

Segunda ley de Newton en términos del momento lineal:

$$\sum \overline{F} = \frac{d\overline{p}}{dt}$$

La fuerza neta (suma vectorial de todas las fuerzas) que actúa sobre una partícula es igual a la rapidez de cambio del momento lineal de la partícula.

Forma original que Newton planteó su 2da. ley (él llamó *momentum al momento lineal). **Recordar que solo es válida en marcos de referencia*** **inerciales.**

Impulso asociado a una fuerza F, que actúa sobre un cuerpo entre los instantes t_1 y t_2 se define como:

$$\overline{I} = \int_{t_1}^{t_2} \overline{F}dt \qquad \overline{I} = \overline{F}\Delta t$$

REPASO CLASE PASADA

Teorema impulso-cantidad de movimiento: el cambio del momento lineal (cantidad de movimiento) de una partícula durante un intervalo de tiempo es igual al impulso de la fuerza neta que actúa sobre la partícula durante ese intervalo

$$\boxed{\bar{I} = \Delta\bar{p}}$$

$$\bar{I} = \bar{F}\Delta t = \Delta\bar{p} = \bar{p}_f - \bar{p}_i = m\bar{v}_f - m\bar{v}_i$$

Sistema aislado: **aquel en el que no existen fuerzas externas que actúen sobre el mismo.**
En una colisión (choque) en un sistema aislado, la cantidad de movimiento total del sistema no cambia con el tiempo, permanece constante.

Momento lineal total del sistema de dos partículas o más como la suma vectorial de los momentos lineales de las partículas individuales.

REPASO CLASE PASADA

CONSERVACIÓN DEL MOMENTO LINEAL

Si la suma vectorial de las fuerzas externas sobre un sistema es cero, el momento lineal total del sistema es constante.

Choque: cualquier interacción intensa entre cuerpos, con duración relativamente corta.

Si las fuerzas entre los cuerpos son mucho mayores que las externas, como suele suceder en la mayoría de los choques, podemos ignorar las fuerzas externas y **tratar los cuerpos como un sistema *aislado***.

El ***momento lineal del sistema se conserva*** *y* tendrá el mismo valor antes y después del choque.

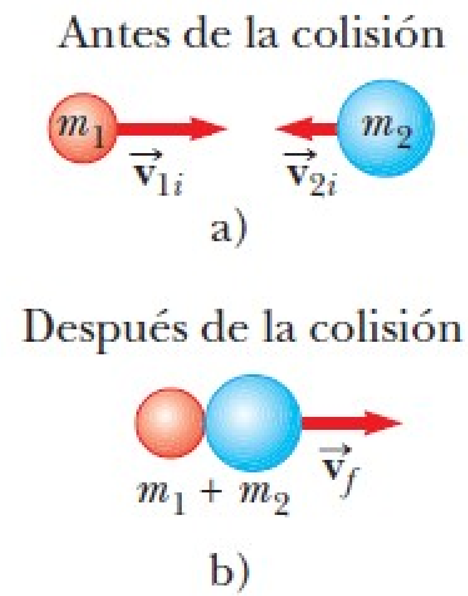
Colisión elástica: se conservan cantidad de movimiento y energía cinética.
Colisión inelástica, se conserva sólo la cantidad de movimiento.
Colisión perfectamente inelástica, *se conserva sólo la cantidad de movimiento* y los objetos quedan unidos después de la colisión, de tal modo que sus velocidades al final son la misma.

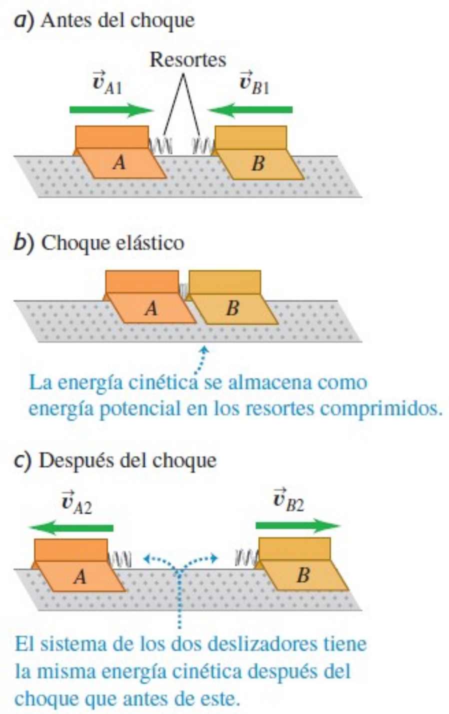
REPASO CLASE PASADA

Choque totalmente inelástico:

$$m_1\vec{\mathbf{v}}_{1i} + m_2\vec{\mathbf{v}}_{2i} = (m_1 + m_2)\vec{\mathbf{v}}_f$$

$$\vec{\mathbf{v}}_f = \frac{m_1\vec{\mathbf{v}}_{1i} + m_2\vec{\mathbf{v}}_{2i}}{m_1 + m_2}$$



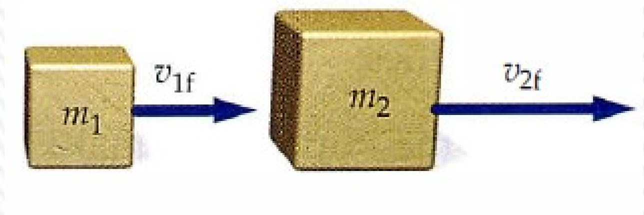


Choques elásticos

Choque elástico en un sistema aislado *es uno en el* que se conserva la energía cinética, y obviamente el momento lineal

REPASO CLASE PASADA

Choque elásticos en una dimensión



$$m_1\overline{\boldsymbol{v}}_{1i} + m_2\overline{\boldsymbol{v}}_{2i} = m_1\overline{\boldsymbol{v}}_{1f} + m_2\overline{\boldsymbol{v}}_{2f}$$

$$m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i} = m_1 v_{1f} + m_2 v_{2f}$$

$$\frac{1}{2}m_1 v_{1i}^2 + \frac{1}{2}m_2 v_{2i}^2 = \frac{1}{2}m_1 v_{1f}^2 + \frac{1}{2}m_2 v_{2f}^2 \quad (2)$$

$$v_{1f} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}v_{1i} + \frac{2m_2}{m_1 + m_2}v_{2i}$$

$$v_{2f} = \frac{2m_1}{m_1 + m_2}v_{1i} + \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2}v_{2i}$$

Ejemplo: ejercicio 6.5

Una pelota de tenis de 57,0 g se mantiene justo arriba de un balón de basquetbol de 590 g de masa. Con sus centros verticalmente alineados, las dos pelotas son liberadas desde el reposo al mismo tiempo, para caer a lo largo de una distancia de 1,20 m, como se muestra en la figura.

a) Calcule la magnitud de la velocidad hacia abajo con la que el balón alcanza el piso.

b) Piense que una colisión elástica con el piso invierte de manera instantánea la velocidad del balón, mientras que la pelota de tenis todavía se está moviendo hacia abajo. A continuación, las dos pelotas se unen en una colisión elástica.

¿A qué altura rebota la pelota de tenis y la de basquetbol?

Video de clase

Hipótesis: modelo ambas pelotas como partículas, ignoro la resistencia del aire y considero un sistema inercial (piso), considero positivas las velocidades que van hacia arriba.

Ejemplo: ejercicio 6.5

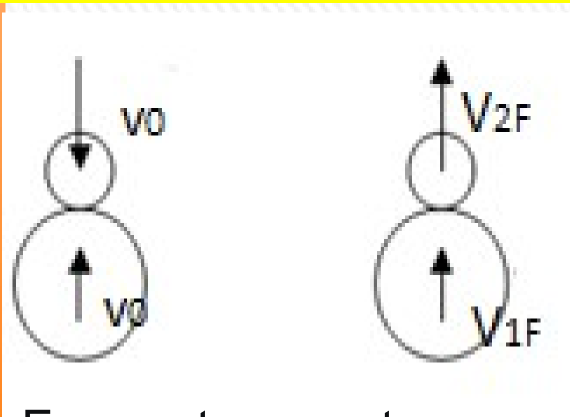
a) Con las hipótesis de las pelotas como partículas, ambas caen desde una misma altura.
Sea v_0 la rapidez con que llega la pelota de basket (m_1), es decir con una velocidad $-v_0$, al chocar contra el piso en forma elástica, comienza a subir con una velocidad $+v_0$. Por otro lado la pelota de tenis (m_2) llega con velocidad $-v_0$.
Por tanto la relación entre las velocidades de las dos pelotas justo antes de que choquen es de que son iguales y opuestas.

Como el sistema es conservativo se cumple que: $$mgh_0 = \frac{1}{2}mv_0^2$$

$$v_0 = \sqrt{2gh_0} = \sqrt{2(9{,}80)(1{,}20)} = 4{,}8497\ m/s$$

V_0= 4,85 m/s

Ejemplo: ejercicio 6.5



b) Llamemos v_{1F} a la velocidad de la pelota después del choque y v_{2F} a la de tenis.
Como el choque es elástico, uso las fórmulas vistas

$$v_{1f} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_{1i} + \frac{2m_2}{m_1 + m_2} v_{2i} \qquad v_{2f} = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_{1i} + \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} v_{2i}$$

En nuestro caso tenemos:

$$v_{1f} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_0 + \frac{2m_2}{m_1 + m_2} (-v_0) = \frac{m_1 - 3m_2}{m_1 + m_2} v_0 \qquad \frac{590 - 3(57{,}0)}{590 + 57{,}0}(4{,}85) = 3{,}14 \frac{m}{s}$$

$$v_{2f} = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_0 + \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} (-v_0) = \frac{3m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_0 \qquad \frac{3(590) - 57{,}0}{590 + 57{,}0}(4{,}85) = 12{,}84 \frac{m}{s}$$

La altura h_1 a la que llega la pelota de básket, verifica que:

$$m_1 g h_1 = \frac{1}{2} m_1 v_{1F}^2$$

$$\boldsymbol{h_{1F} = \frac{v_{1F}^2}{2g} = 0,503\ m} \qquad \boldsymbol{h_{2F} = \frac{v_{2F}^2}{2g} = 8,41\ m}$$

Ejemplo: ejercicio 6.5

Algunas observaciones adicionales:

$$v_{1F} = \frac{m_1 - 3m_2}{m_1 + m_2} v_0 \qquad v_{2F} = \frac{3m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_0$$

Si $m_1 = 3m_2$ entonces: $v_{1F} = \frac{3m_2 - 3m_2}{3m_2 + m_2} v_0 = 0$ $\quad v_{2F} = \frac{3(3m_2) - m_2}{3m_2 + m_2} v_0 = \frac{8m_2}{4m_2} v_0 = 2v_0$

Para esta relación de masas: $\boldsymbol{h_{1F} = 0 h_{2F} = 4h_0}$ (como $v_{2F} = 2v_0$ entonces tiene 4 veces más alcance).

Observar que la altura máxima por parte de la pelota 2 se alcanza cuando $m_2 \to 0$, para este caso $v_{2F} \to 3v_0$ y por tanto $h_{2MAX} = 9h_0$

COLISIONES TANGENCIALES

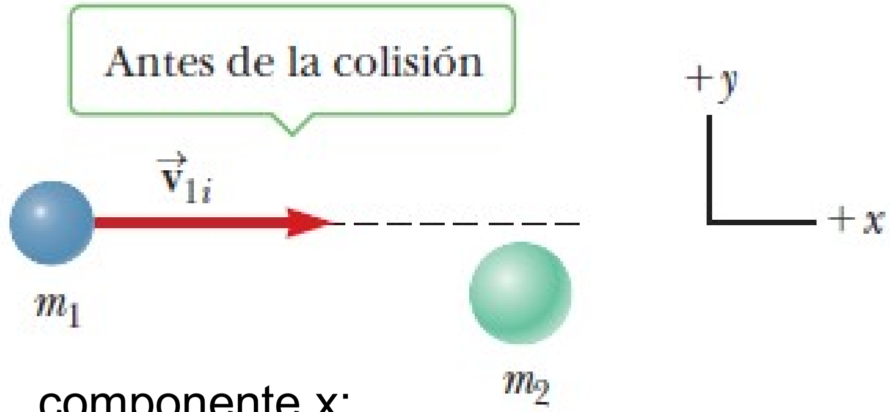
Colisión de dos objetos en tres dimensiones, el principio de conservación de la cantidad de movimiento implica que se conserva la cantidad de movimiento total del sistema en cada dirección (en c/u de los ejes).
Veremos choques que se realizan en dos dimensiones: es decir en un plano. y descartamos cualquier rotación posible.
Conservación de la cantidad de movimiento para c/u de los ejes:

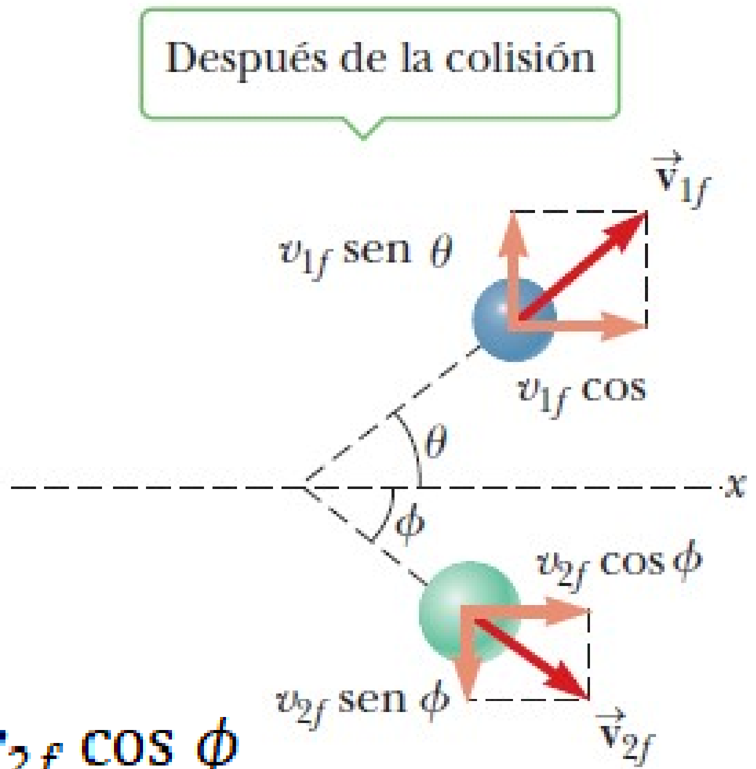
$$m_1 v_{1ix} + m_2 v_{2ix} = m_1 v_{1fx} + m_2 v_{2fx}$$

$$m_1 v_{1iy} + m_2 v_{2iy} = m_1 v_{1fy} + m_2 v_{2fy}$$

Se utilizan tres subíndices en esta ecuación general, para representar, respectivamente: 1) el objeto, 2) los valores inicial y final de las componentes de la velocidad.y 3) el eje que se está analizando.

Como ejemplo veremos el caso en que se considera un problema en dos dimensiones en el que un objeto de masa m_1 colisiona con un objeto de masa m_2 *que está inicialmente en reposo,*





componente x:

$$m_1 v_{1i} + 0 = m_1 v_{1f} \cos\theta + m_2 v_{2f} \cos\phi$$

componente y: $$0 + 0 = m_1 v_{1f} \sin\theta - m_2 v_{2f} \sin\phi$$

Si la colisión es elástica, podemos escribir una tercera ecuación, para la conservación de la energía:

$$\frac{1}{2} m_1 v_{1i}{}^2 = \frac{1}{2} m_1 v_{1f}{}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{2f}{}^2$$

Si conocemos la velocidad inicial v_{1i} *y las masas, quedan cuatro incógnitas* (v_{1f}, v_{2f} θ *y* ϕ).

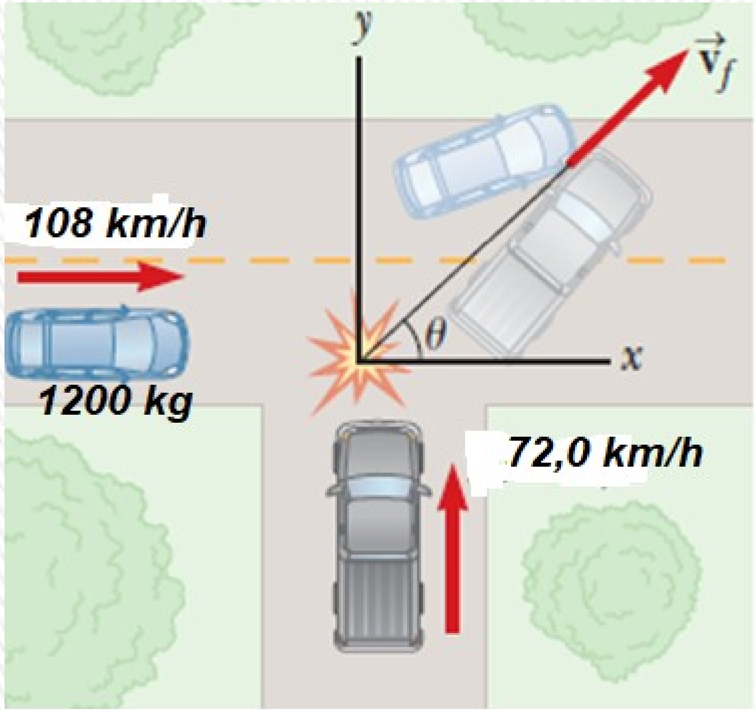
Debido a que sólo tenemos tres ecuaciones, una de las cuatro cantidades restantes debe conocerse con la finalidad de determinar el movimiento después de la colisión de acuerdo sólo con el principio de conservación.

Ejemplo: ejercicio 6.9

Un automóvil de 1200 Kg que viaja hacia el este, choca con un camión de 4500 Kg que viaja hacia el norte. La velocidad del automóvil era de 108 Km /h, y la del camión 72,0 Km /h.

a) Halle la velocidad de ambos vehículos (módulo y dirección) luego de chocar si después del impacto continúan moviéndose unidos.

b) Si el coeficiente de rozamiento entre el pavimento y las ruedas es 0,600, determine la distancia que recorren unidos.



Velocidad del automóvil antes del choque:
v_A= 108 km/h = 30,0 m/s:
Velocidad del camión antes del choque:
v_C= 72,0 km/h = 20,0 m/s:

Conservación de la cantidad de movimiento según los ejes:

x: $m_A . v_A = (m_A + m_C)\, v_f \cos\theta$ (1)

y: $m_C . v_C = (m_A + m_C)\, v_f \,\text{sen}\,\theta$ (2)

$$\frac{m_C v_C}{m_A v_A} = \frac{(m_A + m_C) v_f \sin\theta}{(m_A + m_C) v_f \cos\theta} = \tan\theta$$

Ejemplo: ejercicio 6.9

$$\tan\theta = \frac{m_C v_C}{m_A v_A} = \frac{4500\ (20{,}0)}{1200\ (30{,}0)} = 2{,}50$$

θ= arctan(2,50) = 68,2°

***V_f* = 17,0 m/s = 61,2 km//h**
θ = 68,2°

$$m_A v_A = (m_A + m_C) v_f \cos\theta$$

$$v_f = \frac{m_A v_A}{(m_A + m_C)\cos\theta} = \frac{1200\ (30{,}0)}{(1200 + 4500)\cos 68{,}2°} = 17{,}0\ m/s$$

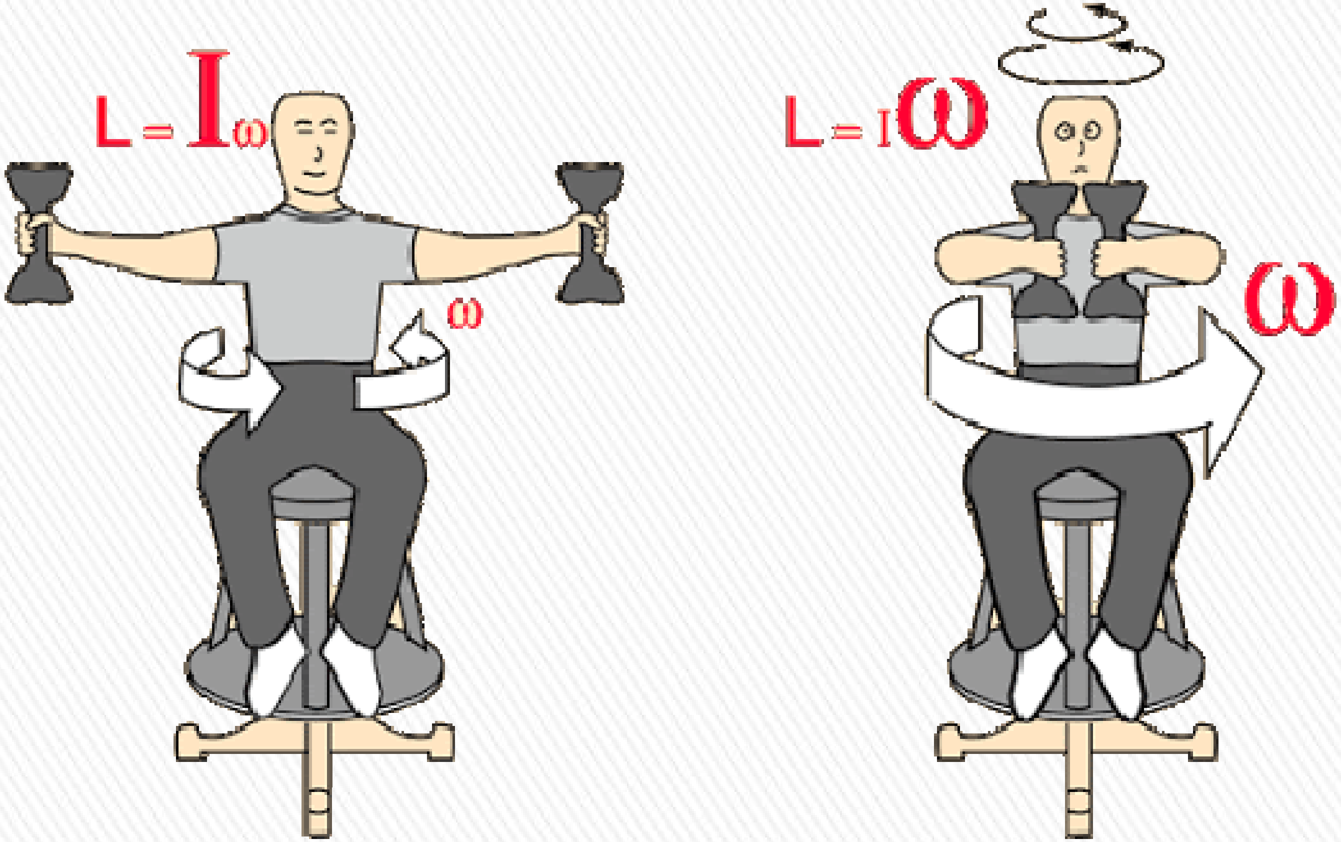
b) La energía cinética que tienen los dos vehículos después del choque se pierde en el trabajo que realiza la fuerza de rozamiento.
La fuerza de rozamiento vale en este caso: F_{roz}= μ.N =μ.(m_A+m_C).g
Sea x la distancia que recorren los vehículos hasta frenarse:

$$\frac{1}{2}(m_A + m_C)v_f^2 - \mu(m_A + m_C)gx = 0$$

***x* = 24,6 m**

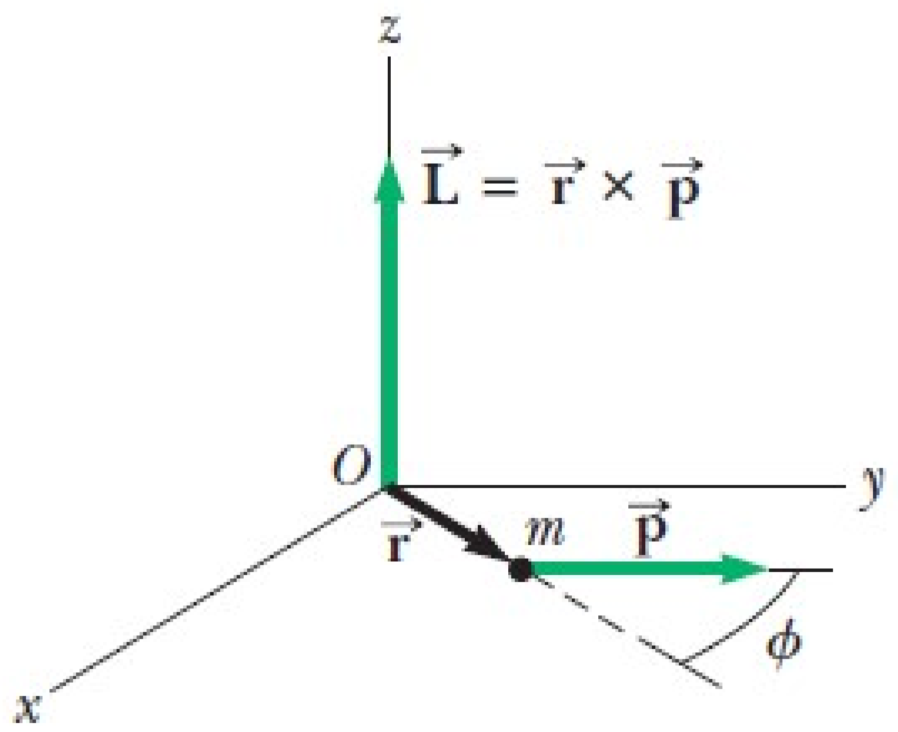
$$x = \frac{\frac{1}{2}(m_A + m_C)v_f^2}{\mu(m_A + m_C)g} = \frac{v_f^2}{2\mu g} = \frac{17{,}0^2}{2(0{,}600)(9{,}80)} = 24{,}57\ m$$

21- Momento angular



- Momento angular.
- Conservación del momento angular
- Colisiones

MOMENTO ANGULAR



Momento* angular** de una partícula de masa constante *m, velocidad **v** momento lineal **p = *m**v** y vector de posición **r** con respecto* al origen *O de un **marco inercia**l,*

$$\bar{L} = \bar{r} \times \bar{p} = \bar{r} \times m\bar{v}$$

El valor del momento angular depende del origen *O elegido, ya que en él interviene el vector de posición* de la partícula respecto al origen.
Unidades de L: kg.m^2/s.

Análogo del ***momento lineal de una partícula*** *en el movimiento de rotación es el* ***momento angular***

$$L = mvr\sin\phi$$

MOMENTO ANGULAR

Vamos a demostrar que para una partícula la ***rapidez de cambio del momento angular es igual al torque de la fuerza neta.***

$$\bar{\boldsymbol{L}} = \bar{\boldsymbol{r}} \times \bar{\boldsymbol{p}} = \bar{\boldsymbol{r}} \times m\bar{\boldsymbol{v}}$$

Derivamos con respecto al tiempo usando la regla de la derivada de un producto:

$$\frac{d\bar{\boldsymbol{L}}}{dt} = \left(\frac{d\bar{\boldsymbol{r}}}{dt} \times m\bar{\boldsymbol{v}}\right) + \left(\bar{\boldsymbol{r}} \times m\frac{d\bar{\boldsymbol{v}}}{dt}\right) = (\bar{\boldsymbol{v}} \times m\bar{\boldsymbol{v}}) + (\bar{\boldsymbol{r}} \times m\bar{\boldsymbol{a}})$$

El primer término del 2do. miembro es nulo (producto vectorial de un vector por sí mismo)

$$\boxed{\frac{d\bar{\boldsymbol{L}}}{dt} = \bar{\boldsymbol{r}} \times \bar{\boldsymbol{F}} = \bar{\boldsymbol{\tau}}}$$

La rapidez de cambio del momento angular de una partícula (dL/dt) es igual al torque de la fuerza neta que actúa sobre ella.

MOMENTO ANGULAR PARA UN SISTEMA DE PARTÍCULAS

El torque resultante de un sistema de partículas es la suma de los torques individuales que actúan sobre el sistema.

Generalizando el resultado de una partícula para un sistema de partículas:

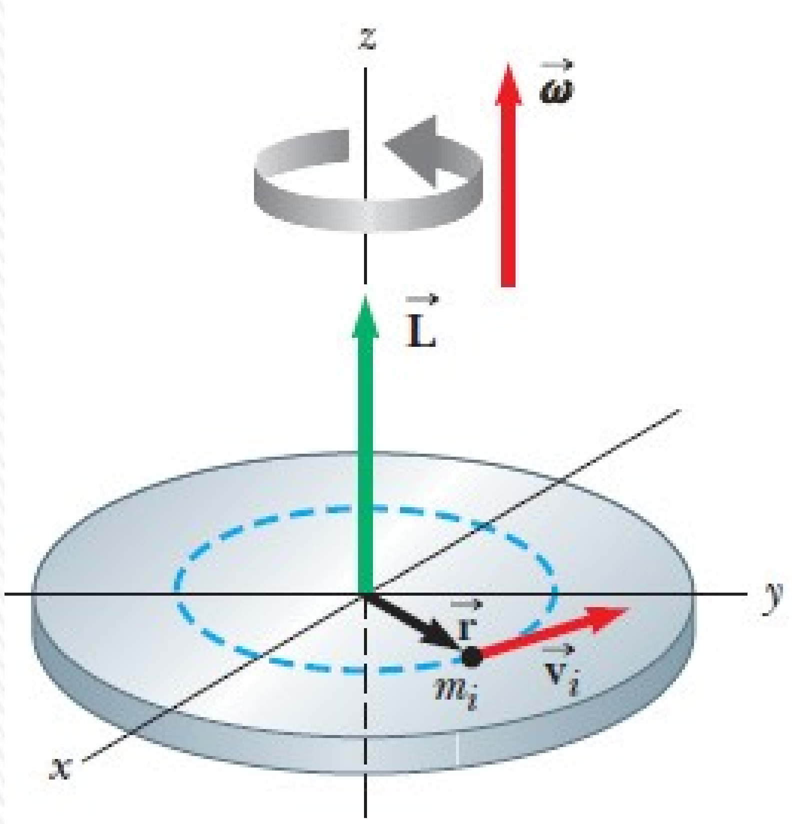
$$\sum_i \bar{\tau}_i = \sum_i \frac{d\bar{L}_i}{dt} = \frac{d}{dt}\sum_i \bar{L}_i = \frac{d\bar{L}_{sist}}{dt}$$

La sumatoria de los torques incluye la de las fuerzas internas y externas.

Por el **principio de acción y reacción**, las fuerzas internas son iguales y de sentido opuesto, y actúan sobre la misma línea, por lo que los brazos de palanca serán iguales, y por tanto estos **torque internos se cancelan entres sí.**

$$\bar{\tau}_{neto}^{ext.} = \frac{d\bar{L}_{sist}}{dt}$$

MOMENTO ANGULAR DE UN CUERPO RÍGIDO



Objeto rígido girando en torno a un eje fijo que coincide con el eje *z* . Cada *partícula del objeto da vueltas en el plano xy en torno* al eje *z con una rapidez angular ω. La magnitud del momento angular* de una partícula de masa m_i *en torno al eje z es* $m_i v_i r_i$. *Como* $v_i = r_i\omega$, *la* magnitud del *momento angular* de esta partícula se expresa como: $L_i = m_i r_i^2 \omega$

El vector $\boldsymbol{L_i}$ se dirige a lo largo del eje z, como el vector $\boldsymbol{\omega}$.

Podemos encontrar el módulo del momento angular (que en esta situación sólo tiene una componente z) de todo el objeto tomando la suma de L_i sobre todas las partículas:

$$L_z = \sum_i L_i = \sum_i m_i r_i^2 \omega = \left(\sum_i m_i r_i^2\right)\omega$$

$$L_z = I\omega$$

donde *I* es el momento de inercia *del objeto en torno al eje z*

En general, la expresión **L=** ***I*ω** no siempre es válida. Si un objeto rígido da vueltas en torno a un eje *arbitrario,* ***L*** y **ω** pueden apuntar en diferentes direcciones. En este caso, el momento de inercia no se trata como un escalar. En un sentido estricto, **L=** ***I*ω** sólo se aplica a objetos rígidos de cualquier forma que dan vueltas en torno a uno de tres ejes mutuamente perpendiculares (llamados *ejes principales)* a través del centro de masa.

MOMENTO ANGULAR DE UN CUERPO RÍGIDO

$L_z = I\omega$ derivando esta expresión respecto al tiempo, y teniendo en cuenta que para un rígido el momento de inercia *I* es constante:

$$\frac{dL_z}{dt} = I\frac{d\omega}{dt} = I\alpha$$

donde α es la aceleración angular relativa al eje de rotación. Como dL_z/dt *es igual al* momento de torsión externo neto, esta ecuación resulta

$$\sum \tau_{ext} = I\alpha$$

El torque externo neto que actúa sobre un objeto rígido giratorio en torno a un eje fijo es igual al momento de inercia en torno al eje de rotación multiplicado por la aceleración angular del objeto en relación con dicho eje.

Este resultado ya lo habíamos obtenido anteriormente, y representa el equivalente rotacional de la 2da. Ley de Newton.
Esta ecuación también es válida para un objeto rígido giratorio en torno a un eje móvil siempre que el eje en movimiento 1) pase a través del centro de masa y 2) sea un eje de simetría.
Si un objeto simétrico da vueltas en torno a un eje fijo que pasa a través de su centro de masa, se puede escribir la ecuación vectorial **L** = I**ω**, siendo **L** el momento angular total del objeto medida respecto al eje de rotación.

CONSERVACIÓN DEL MOMENTO ANGULAR

Vimos antes que el momento lineal total de un sistema de partículas permanece constante si el sistema está aislado; es decir, si la fuerza externa neta que actúa sobre el sistema es cero. Se tiene una ley de conservación análoga en el movimiento rotacional.

La cantidad de movimiento angular total de un sistema es constante tanto en magnitud como en dirección si el torque neto que actúa sobre el sistema es cero, es decir, si el sistema está aislado (Principio de conservación del momento angular).

Este principio es consecuencia directa de lo siguiente: $$\sum \bar{\tau}_{ext} = \frac{d\bar{L}_{sistema}}{dt} = 0$$

Por lo tanto: $$\bar{L}_{sistema} = constante$$

$$\bar{L}_{inicial} = \bar{L}_{final}$$

Si un sistema giratorio aislado es deformable, de modo que su masa se somete a redistribución en alguna forma, el momento de inercia del sistema cambia. Como la magnitud del momento angular del sistema es $L = I\omega$, *la conservación* de la cantidad de movimiento angular requiere que el producto de I *y* ω *permanezca* constante.

CONSERVACIÓN DEL MOMENTO ANGULAR

Por lo tanto, un cambio en *I para un sistema aislado requiere un cambio en ω.*

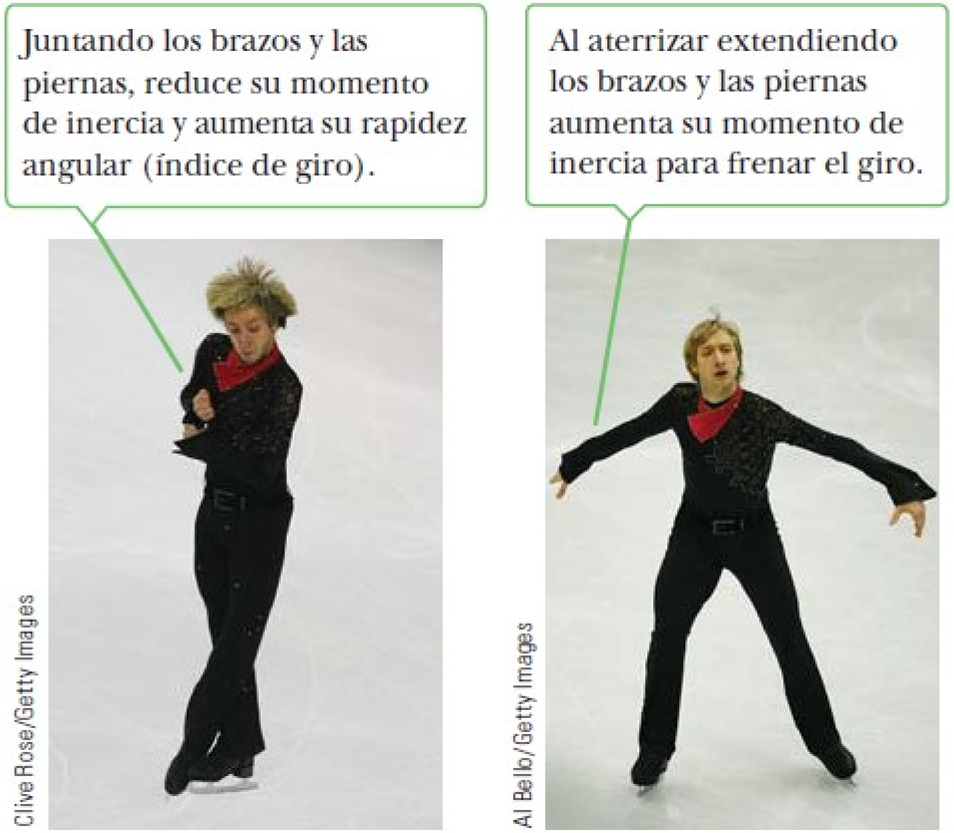
En este caso, el principio de conservación de cantidad de movimiento angular se expresa como:

$$I_i\omega_i = I_f\omega_f = constante$$

La conservación del momento angular se aplica a objetos macroscópicos, como planetas y personas, así como a átomos y moléculas.

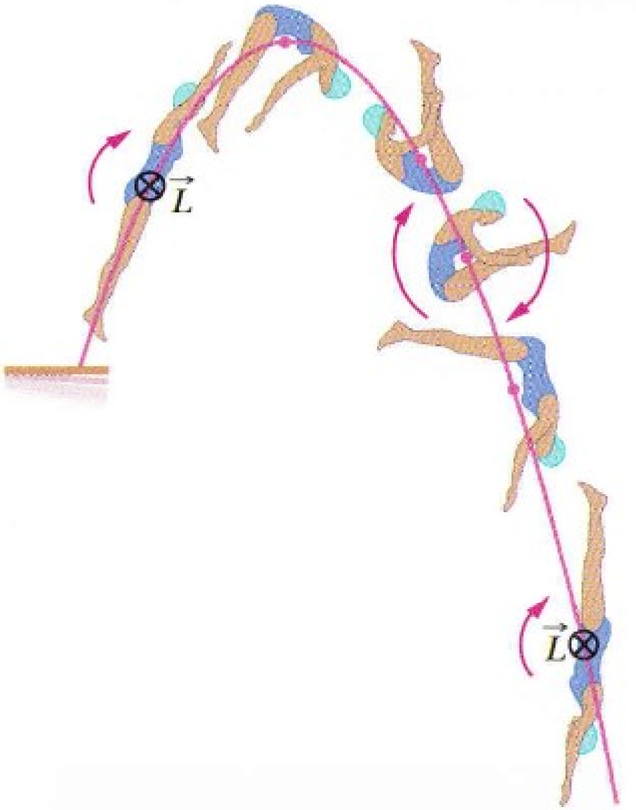
a) patinador pone los brazos y las piernas cerca de su cuerpo, reduciendo la distancia al eje de rotación y, por lo tanto, también reduciendo su momento de inercia. Al conservarse L una reducción de su I debe aumentar su velocidad angular ω.

Saliendo de la vuelta en la figura b), necesita reducir su velocidad angular, así que extiende sus brazos y las piernas otra vez, aumentando su momento de inercia, y de ese modo retardar su rotación.



MOMENTO ANGULAR DE UN CUERPO RÍGIDO

De modo semejante, cuando una clavadista desea hacer varios saltos mortales, jala sus manos y pies hacia el tronco de su cuerpo para rotar a una mayor rapidez angular.
En este caso, la fuerza externa debido a la gravedad actúa a través de su centro de gravedad y, por lo tanto, no ejerce ningún torque sobre su eje de rotación, así que el momento angular sobre su centro de gravedad se conserva.
Por ejemplo, cuando una clavadista desea doblar su rapidez angular, debe reducir su momento de inercia a la mitad de su valor inicial.



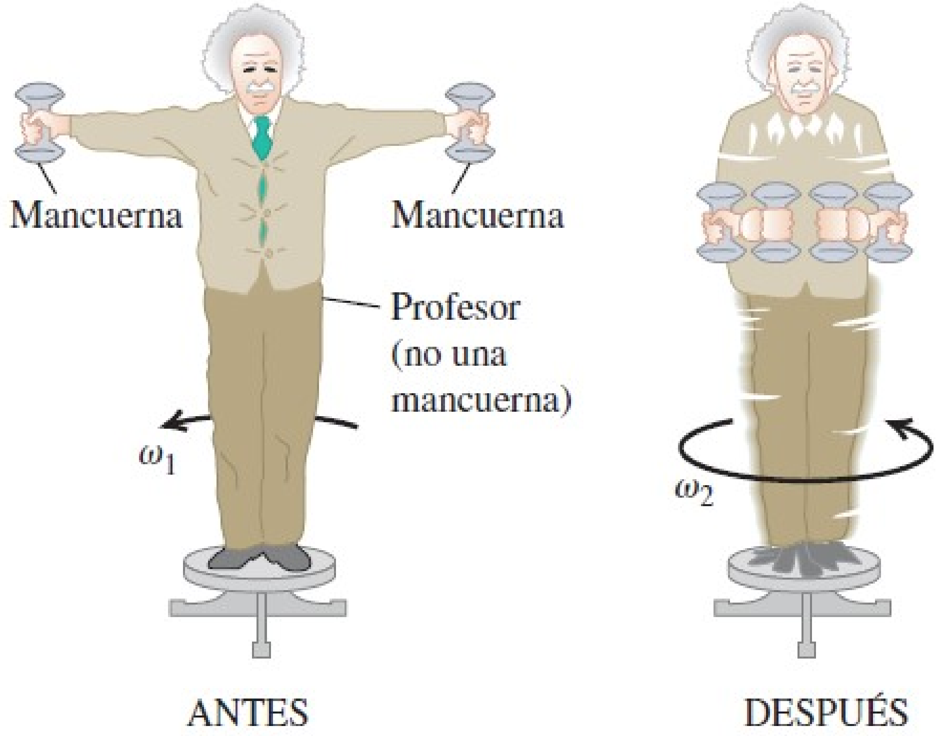
EJEMPLO: CUALQUIERA PUEDE BAILAR BALLET

Un ágil profesor de física se pone de pie en el centro de una mesita giratoria y sin fricción con los brazos extendidos horizontalmente y una mancuerna de 5,0 kg en cada mano. Se le pone a girar sobre un eje vertical, dando una revolución cada 2,0 s.

Calcule la velocidad angular final del profesor si él pega las mancuernas a su abdomen.

Su momento de inercia (sin las mancuernas) es de 3,0 kgm^2 con los brazos extendidos, y baja a 2,2 kg m^2 si coloca las manos en el abdomen.

Las mancuernas están a 1,0 m del eje al principio y a 0,20 m al final.



Con estas hipótesis se conserva el momento angular y podemos escribirlo como: L = Iω

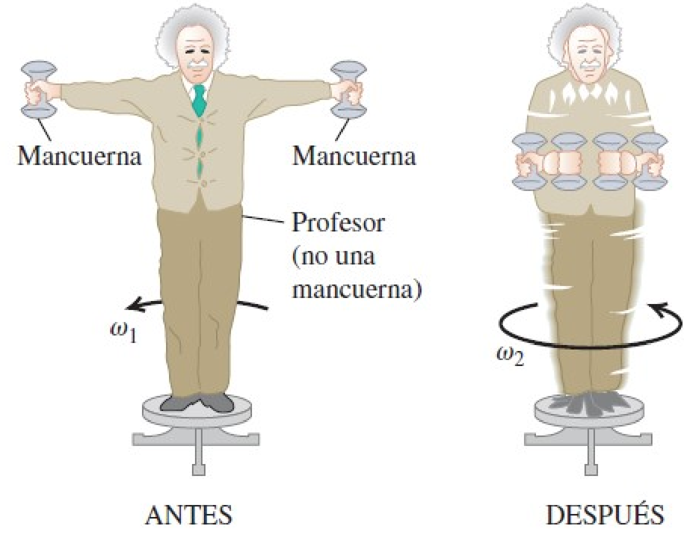
Modelamos al sistema profesor + mancuernas + mesa como uno sobre el que no se le aplican toques externos.

Además supondremos que el eje de rotación es eje de simetría.

Datos: ω_1= 0,50 rev/s; I_{P1}= 3,0 kgm^2 ; I_{P2}= 2,2 kgm^2 m= 5,0 kg; r_1=1,0 m; r_2=0,20 m

EJEMPLO: CUALQUIERA PUEDE BAILAR BALLET

Un ágil profesor de física se pone de pie en el centro de una mesita giratoria y sin fricción con los brazos extendidos horizontalmente y una mancuerna de 5,0 kg en cada mano. Se le pone a girar sobre un eje vertical, dando una revolución cada 2,0 s.
Calcule la velocidad angular final del profesor si él pega las mancuernas a su abdomen.
Su momento de inercia (sin las mancuernas) es de 3,0 kgm^2 con los brazos extendidos, y baja a 2,2 kg m^2 si coloca las manos en el abdomen.
Las mancuernas están a 1,0 m del eje al principio y a 0,20 m al final.



Voy a considerar que las mancuernas se comportan como masas puntuales.

Datos: ω_1= 0,50 rev/s; I_{P1}= 3,0 kgm^2 ; I_{P2}= 2,2 kgm^2 m= 5,0 kg; r_1=1,0 m; r_2=0,20 m

Como se conserva el momento angular del sistema: $I_1\omega_1 = I_2\omega_2$

$$I_1 = I_{P1} + 2mr_1^2 = 3,0 + 2(5,0)(1,0)^2 = 13\ kg.m^2$$

$$I_2 = I_{P2} + 2mr_2^2 = 2,2 + 2(5,0)(0,20)^2 = 2,6\ kg.m^2$$

$$\omega_2 = \frac{I_1}{I_2}\omega_1 = \frac{13}{2,6}\omega_1 = 5\omega_1$$

ω_2 =5 ω_1 = 2,5 rev/s

Pero ¿qué pasó con la energía cinética de rotación?