

Sistemas de referencia acelerados

Esta traducción del texto "Introducción a la Física I", de R. W. Pohl. Ed. Springer, Berlin, fue realizada por el ex profesor del Departamento de Física Gerardo Melcher, y se publicó en la Revista de Matemática y Física de abril 1966. El artículo trata de sistemas de referencia en diversas situaciones. Este tema se puede visualizar en una película clásica de Física del PSSC titulada "Sistemas de referencia", la que se puede ver en dos partes en Youtube doblada al español, en las siguientes direcciones URL:

(Parte 1) <https://www.youtube.com/watch?v=7jBCZh-6lWg>

(Parte 2) <https://www.youtube.com/watch?v=uiQ7r0VkJAgU>



El carrito de una montaña rusa constituye un sistema de referencia acelerado.

En general, se estudian los fenómenos físicos desde un punto de vista de un laboratorio fijo, es decir, el sistema de referencia es la Tierra misma, supuesta rígida y en reposo. El paso a otro sistema de referencia, en algunos casos especiales, no tiene mayores consecuencias. En esos casos especiales el nuevo sistema de referencia debe moverse con respecto al laboratorio con una velocidad constante. Dicha velocidad no debe cambiar ni de módulo ni de dirección. Experimentalmente se encuentra realizada esa situación, en ciertas ocasiones, por medio de un vehículo que se mueve "suavemente", por ejemplo, en un barco o en un vagón de tren. En estos casos, encontrándose el observador en el interior del vehículo no "siente" nada del movimiento del sistema de referencia. Todos los fenómenos ocurren en el vehículo exactamente como en el laboratorio en reposo. Este tipo de sistemas se denominan Sistemas de Referencia Inerciales. Estos son, sin embargo, casos excepcionales que se dan raras veces.

Un vehículo en general constituye un sistema de referencia acelerado: su velocidad cambia continuamente tanto de módulo como de dirección. Esta aceleración del sistema de referencia produce profundos cambios en la observación de procesos físicos. Realizar observaciones en un sistema acelerado requiere nuevos conceptos para lograr una representación sencilla de la fenomenología física. Para el observador acelerado aparecen fuerzas nuevas. Su nombre genérico es "fuerzas inerciales". Algunas de ellas han recibido nombres especiales (fuerza centrífuga, fuerza de Coriolis). Veremos a continuación estas fuerzas inerciales. En el estudio de aceleraciones resulta práctico distinguir dos casos extremos: pura aceleración a lo largo de la trayectoria y pura aceleración radial. Corresponden, una al cambio del módulo de la velocidad y otra al cambio de la dirección. En forma análoga estudiaremos en lo que sigue separadamente estos dos casos extremos, sistema con pura aceleración a lo largo de la trayectoria y sistemas con pura aceleración radial.

Sistemas de referencia con pura aceleración a lo largo de la trayectoria se encuentran con frecuencia. Piense en vehículos de toda clase que parten o frenan en trayectorias rectilíneas. Por cierto que el intervalo de tiempo que duran las aceleraciones son siempre cortos, el módulo de las aceleraciones a lo más es constante por pocos segundos.

Es diferente el caso de sistemas de referencia que sólo tienen aceleración radial. Todo carrusel que rota con velocidad angular constante ω , permite mantener constante la aceleración radial por un tiempo arbitrariamente largo. Ante todo, nuestro propio planeta, la Tierra es un gran carrusel, por esta razón presentaremos detalladamente el sistema carrusel.

Con el objeto de facilitar la representación de lo que sigue haremos uso de un artificio: dividiremos el texto en dos columna paralelas. En la columna de la izquierda se presentará el fenómeno brevemente en forma usual, es decir, visto y descrito desde el punto de vista de un observador localizado en un sistema de referencia en reposo, fijo al laboratorio o al suelo. En la columna de la derecha aparecerá frente a la anterior la descripción desde el punto de vista de un observador acelerado. Ambos observadores encabezan sus estudios con la ecuación fundamental

$$a = \frac{F}{m} \quad \text{y} \quad \text{consideran a las fuerzas como causa de las aceleraciones.}$$

A.-SISTEMAS DE REFERENCIA CON PURA ACELERACIÓN A LO LARGO DE LA TRAYECTORIA

1.- Uno de los observadores está sentado firmemente sobre un carro y frente a él, sobre una mesa sin roce, hay una esfera. Mesa y silla están apernadas al carro. El carro es acelerado hacia la izquierda (puntapié). Entonces la esfera y el hombre sobre el carro se acercan mutuamente. Resultan las dos descripciones que siguen:

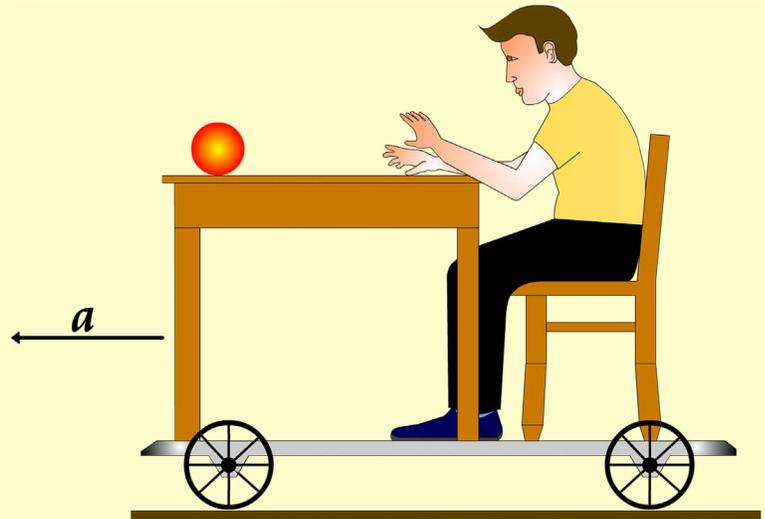


Fig. 1

OBSERVADOR EN REPOSO

La esfera continúa en reposo. No actúa ninguna fuerza sobre ella por estar sobre una mesa sin roce. En cambio el carro y el hombre sentado en el carro son acelerados hacia la izquierda. El hombre se acerca a la esfera.

OBSERVADOR ACELERADO

La esfera se mueve aceleradamente hacia la derecha. Por lo tanto sobre la esfera está actuando una fuerza dirigida hacia la derecha. Tiene el nombre de FUERZA INERCIAL. (El nombre elegido para designar a esta fuerza presupone que el observador sabe que se está moviendo con aceleración. Un nombre más neutro o una palabra análoga a la palabra "peso" habrían sido preferible).

2.- El observador en el carro sujeta a la esfera intercalando un dinamómetro de compresión.

El carro es acelerado hacia la izquierda. Durante la aceleración el observador en el carro percibe una sensación de fuerza en los músculos del brazo y de la mano. El dinamómetro acusa una deflexión F .

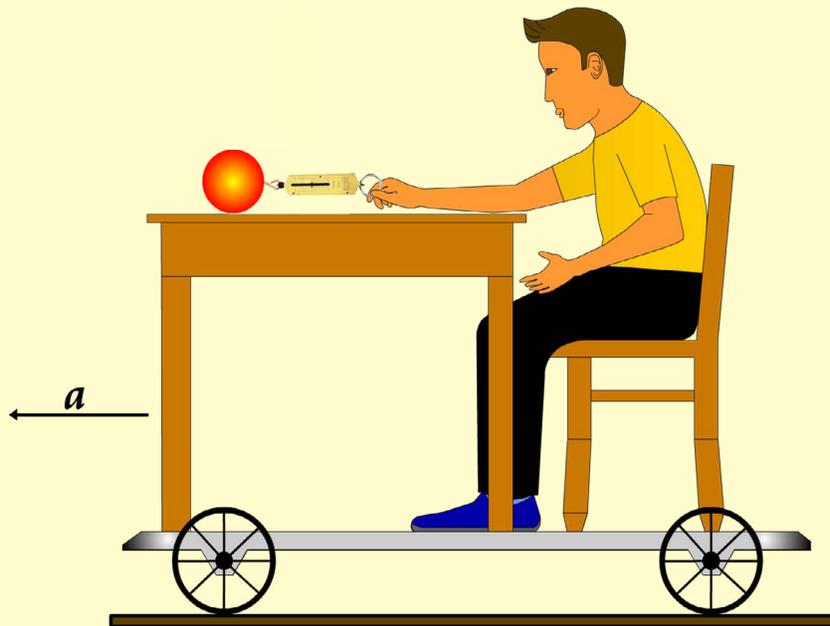


Fig. 2

OBSERVADOR EN REPOSO

La esfera es acelerada hacia la izquierda. Sobre ella actúa una fuerza F dirigida hacia la izquierda. La magnitud de la aceleración es

$$a = \frac{F}{m}$$

OBSERVADOR ACELERADO

La esfera queda en reposo. No experimenta ninguna aceleración. Luego la suma de las fuerzas que actúan sobre ella es cero. La fuerza inercial $F = m a$ dirigida hacia la derecha y la fuerza muscular dirigida hacia la izquierda son iguales y de sentido opuesto. Su magnitud la acusa el dinamómetro.

3.- El carro es acelerado hacia la izquierda. Durante el arranque el observador parado sobre el carro debe adoptar una posición inclinada como indica la fig.3, de lo contrario se cae hacia atrás. Siguen las dos representaciones.

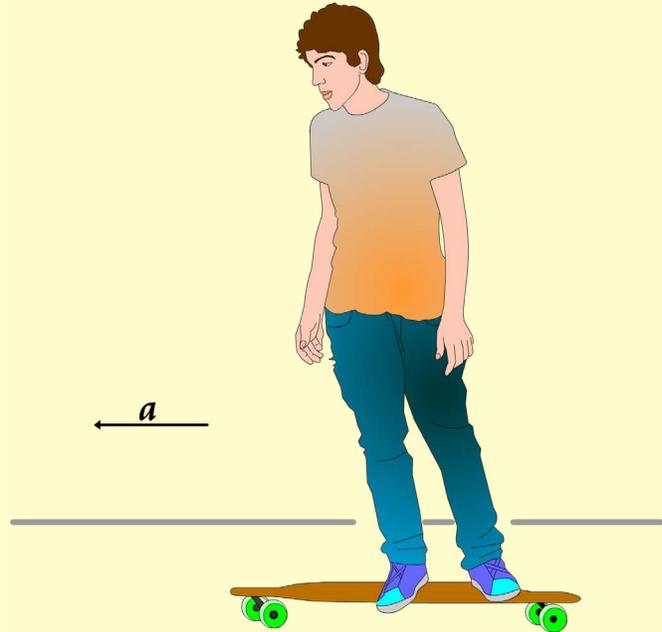


Fig. 3

OBSERVADOR EN REPOSO

El centro de masa del hombre debe ser acelerado con igual módulo e igual dirección que el carro. La fuerza F requerida para acelerar hacia la izquierda el centro de masa, el hombre la produce con ayuda de su peso F_2 y de una fuerza producida por la deformación elástica de la plataforma del carro, F_3 . Con ese objeto el hombre se inclina hacia adelante.

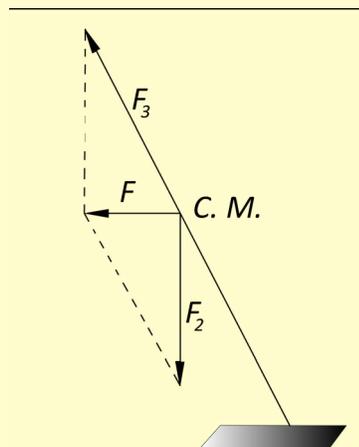


Fig. 4

OBSERVADOR ACELERADO

El centro de masa del hombre queda en reposo. La suma de las fuerzas que actúan sobre él es cero. Hacia abajo actúa el peso F_2 , hacia la derecha la fuerza inercial $F = -m a$. Ambas dan la resultante F_3 . Esta resultante deforma la plataforma del carro bajo los pies del hombre y con ello produce la fuerza F_1 igual y opuesta a F_3 .

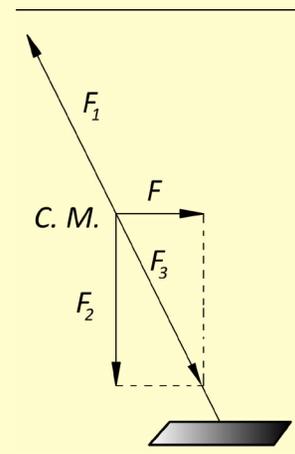


Fig. 5

4.- Uno de los observadores se encuentra en un ascensor. Frente a él, sobre una mesa hay una balanza de resorte y sobre ella un cuerpo con masa m (ver fig. 6). La deflexión de la balanza acusa una fuerza F_0 igual y opuesta al peso F_2 del cuerpo. En seguida el ascensor comienza un movimiento acelerado hacia abajo. Entonces la balanza acusa una deflexión menor F_1 .

OBSERVADOR EN REPOSO

El cuerpo es acelerado hacia abajo. Sobre él actúan dos fuerzas de diferente magnitud y de sentido opuesto. El peso F_2 impulsa al cuerpo hacia abajo, la fuerza del resorte F_1 (menor que F_2) lo impulsa hacia arriba. La resultante del módulo $F_2 - F_1$ imprime al cuerpo la aceleración hacia abajo.

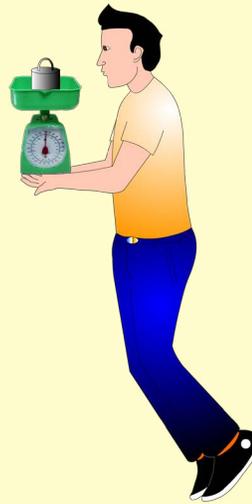
$$a = \frac{(F_2 - F_1)}{m}$$

OBSERVADOR ACELERADO

El cuerpo está en reposo, la suma de todas las fuerzas que actúan sobre él es cero. La fuerza del resorte de la balanza F_1 dirigida hacia arriba es menor que el peso F_2 del cuerpo, luego está actuando además una segunda fuerza hacia arriba, es la fuerza inercial con módulo $F_2 - F_1 = m a$.



Fig. 6



5.- Uno de los observadores, con la balanza de resorte en la mano, salta de una mesa alta al suelo. Sobre el platillo de la balanza hay un cuerpo con masa m . Inmediatamente después de iniciarse el salto la deflexión de la balanza baja del valor F_2 a cero (ver figura 7). Es decir, la balanza no acusa peso para el cuerpo.

(Es lamentable que para este experimento se disponga tan solo de una fracción de segundo. Es posible subsanar este inconveniente experimentando en el interior de un satélite artificial. Caso 3 de sistemas de referencia con pura aceleración radial).

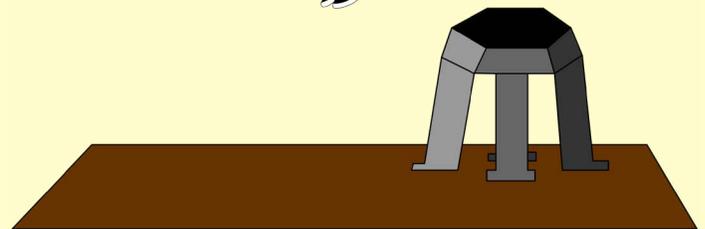


Fig. 7

OBSERVADOR EN REPOSO

El cuerpo con masa m es acelerado. Cae igual que el hombre con aceleración de gravedad g . La única fuerza que queda actuando sobre el cuerpo es la fuerza F_2 dirigida hacia abajo y llamada peso. No hay fuerza muscular actuando hacia arriba ni fuerza del resorte.

OBSERVADOR ACELERADO

El cuerpo con masa m está en reposo, la suma de las fuerzas que actúan sobre él es cero. El peso F_2 dirigido hacia abajo queda compensado por la fuerza inercial dirigida hacia arriba. Ambas fuerzas son iguales y opuestas, su módulo es mg .

Esperamos que con estos ejemplos quede suficientemente claro el concepto de fuerza inercial. LA FUERZA INERCIAL SOLO EXISTE PARA EL OBSERVADOR ACELERADO. Ese observador tiene que participar de la aceleración de su sistema de referencia, o por lo menos debemos imaginarlo participando. Una mano que acelera una bola de palitroque es un sistema de referencia acelerado. Por la misma razón la mano siente una fuerza inercial.

SISTEMAS DE REFERENCIA CON ACELERACIÓN PURAMENTE RADIAL Fuerza centrífuga y Fuerza de Coriolis

1.- Uno de los observadores está sentado en una silla giratoria que tiene un momento de inercia grande y gira en torno a un eje vertical como indica la figura.

En la parte delantera la silla giratoria lleva una mesa lisa dispuesta horizontalmente. El observador sentado en la silla que gira coloca una esfera sobre esa mesa y la suelta (ver figura 8). La esfera escapa cayéndose de la mesa por el borde que queda alejado del experimentador.



Fig. 8

OBSERVADOR EN REPOSO

La esfera no experimenta aceleración. No actúa ninguna fuerza sobre ella, por lo tanto no puede moverse a lo largo de una órbita circunferencial. Escapa tangencialmente con la velocidad constante $v = \omega r$, en donde ω = velocidad angular de la silla giratoria, r = distancia entre la esfera y el eje de la silla giratoria, en el momento de soltar a la esfera.

OBSERVADOR ACELERADO

La esfera sobre la mesa se desplaza aceleradamente partiendo del reposo. Durante su movimiento la esfera se aleja del centro de giro de la mesa. Por lo tanto, sobre la esfera en reposo actúa una fuerza inercial. Se la llama fuerza centrífuga. Su módulo es

$$F = m \omega^2 r.$$

2.- El observador en la silla giratoria intercala un dinamómetro entre la esfera y los músculos de la mano. El dinamómetro se orienta radialmente y acusa durante el giro de la silla una fuerza $F = m \omega^2 r$.

OBSERVADOR EN REPOSO

La esfera se mueve a lo largo de una circunferencia de radio r , es decir, la esfera es acelerada. La aceleración es producida por una fuerza dirigida radialmente hacia el eje de giro de la silla. Esta fuerza radial o centrípeta vale

$$F = - m \omega^2 r$$

OBSERVADOR ACELERADO

La esfera permanece en reposo. No experimenta aceleración, luego la suma de las fuerzas que actúan sobre ella es nula. La fuerza centrífuga que actúa radialmente hacia afuera y la fuerza muscular que actúa radialmente hacia adentro son iguales y de sentido opuesto. Los módulos de ambas fuerzas valen $m \omega^2 r$.

3.- El observador en la silla giratoria monta un péndulo sobre la mesa, por ejemplo una esfera suspendida de un hilo. Este péndulo no toma la dirección de la vertical (ver figura 9). Se desvía de la vertical hacia afuera en el ángulo α , quedando siempre en el plano determinado por el eje de giro y el radio r . El ángulo α aumenta al aumentar la frecuencia de giro de la silla.

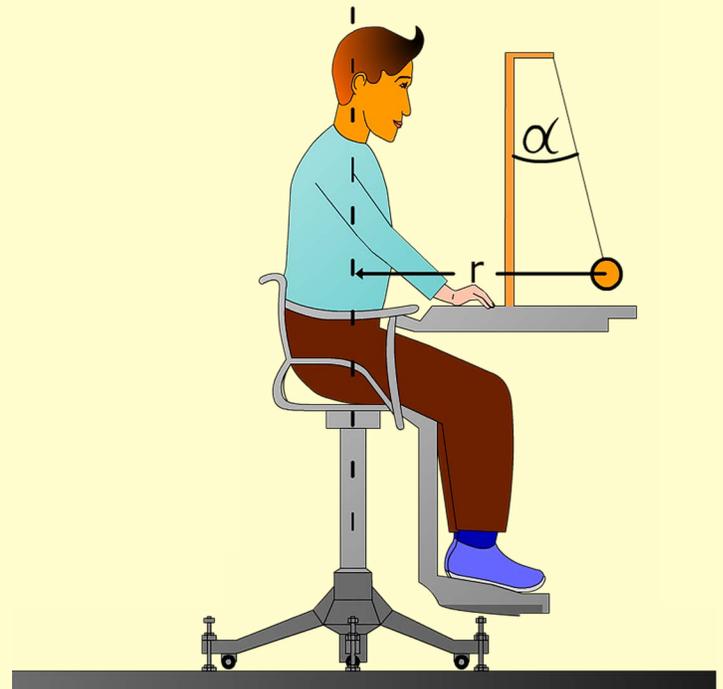


Fig. 9

OBSERVADOR EN REPOSO

La esfera del péndulo se mueve a lo largo de una circunferencia de radio r y el movimiento es acelerado. Para que esto ocurra es necesario que exista una fuerza $F = -m\omega^2 r$, radial y horizontal dirigida hacia el eje de giro (fuerza centrípeta). Es producida por el peso F_1 y una tensión elástica. F_2 del hilo.

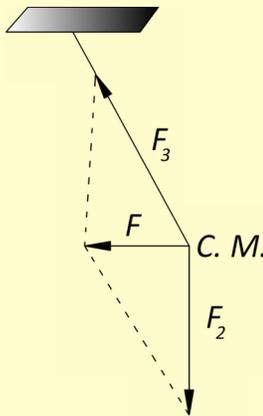


Fig. 10

OBSERVADOR ACELERADO

La esfera del péndulo está en reposo, la suma de las fuerzas que actúan sobre su centro de masa es cero. Hacia abajo actúa el peso F_2 , hacia afuera actúa la fuerza centrífuga $F = m\omega^2 r$. La resultante de ambas es F_3 . Esta fuerza F_3 ejerce tracción sobre el hilo, el cual responde con la fuerza elástica F_1 igual a F_2 pero de sentido opuesto.

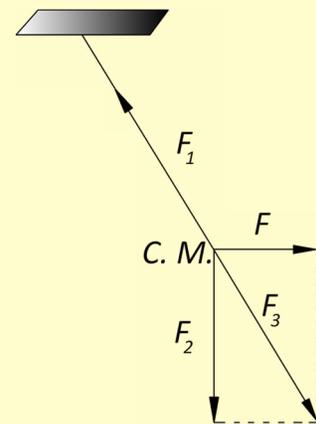


Fig. 11

4.- Un satélite artificial, podría ser una esfera hueca, orbita en torno a la Tierra a la distancia de algunos cientos de km, describiendo una órbita circunferencial.

En el interior del satélite no ocurre ninguno de los fenómenos que en condiciones normales (terrenales) están relacionados con las fuerzas llamadas pesos. En el experimento 5 de movimiento con pura aceleración a lo largo de la trayectoria, que vimos antes, se dispone sólo de una fracción de segundo para observar la ausencia de las fuerzas de peso, en el satélite artificial en cambio se dispone de tiempos arbitrariamente largos para efectuar estas observaciones. Podría levantarse al compañero de viaje con el dedo meñique y dejarlo flotando libremente en el interior del satélite. Otro ejemplo: Colocando un trozo de metal sobre una balanza de resorte, ésta no acusa deflexión alguna. Siguen las dos posibilidades de descripción:

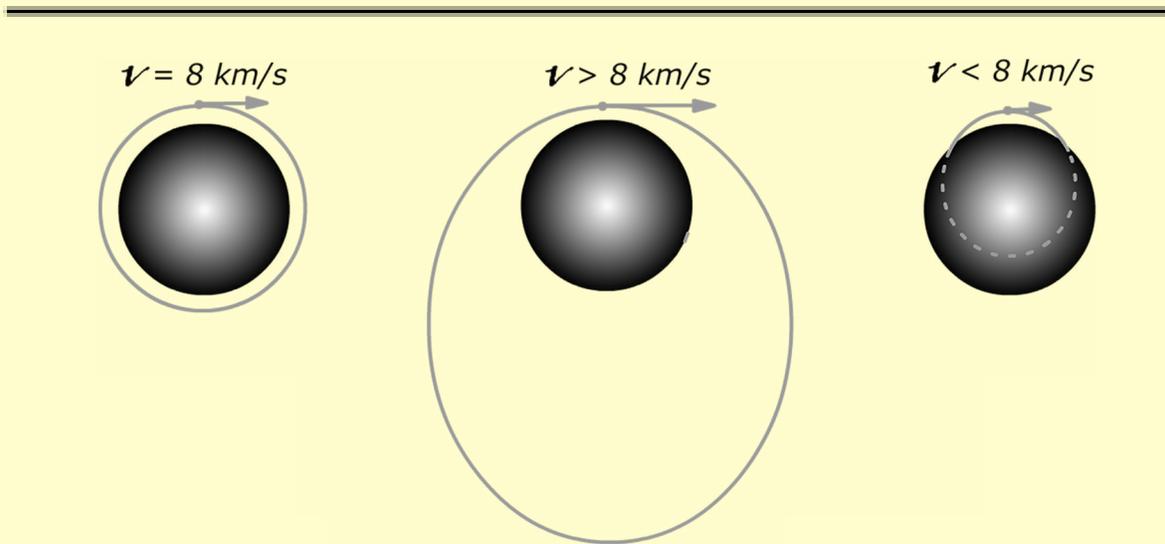


Fig. 12

OBSERVADOR EN REPOSO

Igual que el satélite mismo, todos los cuerpos en su interior son acelerados permanentemente hacia el centro de la Tierra, es decir, en la dirección del radio de la órbita. De lo contrario no podríamos participar del movimiento circunferencial. La aceleración del trozo de metal es producida por su peso $F = m g$. Este peso debe ser la única fuerza que actúa sobre el trozo y no debe ser compensada por una fuerza restitutiva de un resorte deformado.

OBSERVADOR ACELERADO

Igual que todos los cuerpos en el interior del satélite, también el trozo de metal está en reposo. Por lo tanto la suma de todas las fuerzas que actúan sobre el trozo es cero. La fuerza que atrae al trozo hacia el centro de la Tierra, su peso, es compensada por la fuerza centrífuga que actúa alejándose radialmente del centro de la Tierra. Ambas fuerzas son de sentido opuesto y el módulo de ambas es $m g$.

A 300 km de distancia $g = 8,9 \text{ m/s}^2$

En los experimentos realizados hasta aquí se observaron cuerpos que se encontraban en reposo con respecto a la silla giratoria. Sólo interesaba estudiar si acaso los cuerpos partían con movimiento acelerado o no. El paso siguiente consiste ahora en estudiar la situación de cuerpos que se mueven con respecto a la silla giratoria. Aparecen entonces nuevas fuerzas llamadas *fuerzas de Coriolis*, que se presentarán en un número próximo.