

MOVIMIENTO UNIFORME Y PRIMERA LEY DE NEWTON

Las naves espaciales Apolo que llevaron al hombre a la Luna apagaron sus motores luego de abandonar la órbita terrestre. ¿Qué las impulsaba entonces hacia nuestro satélite? “Creo que Isaac Newton realiza la mayor parte del impulso ahora”, respondió el astronauta Bill Anders, a esta pregunta de su hijo durante el viaje del Apolo 8. En este capítulo usted entenderá lo que Anders quería decir, y podrá interpretar desde el punto de vista de la física la intuición aristotélica de su hijo. Al finalizar el capítulo podrá relacionar el conocimiento científico con el conocimiento común o cotidiano, para que pueda dar explicaciones a hechos o sucesos que ocurren en su alrededor.



MOVIMIENTO UNIFORME

Mientras en la física aristotélica el movimiento se clasifica, sobre todo, en movimiento natural y violento, en la física actual se clasifica principalmente en *movimiento uniforme** (MU) y no uniforme, más comúnmente llamado *movimiento acelerado** (MA). Comprender esta distinción es esencial, pues el primero tiene una importancia fundamental, incluso para definir el segundo. La figura 4 muestra una “fotografía de destellos múltiples” de un choque entre dos bolas de billar (una de las cuales estaba inicialmente en reposo en el centro de la fotografía, saliendo después del choque por la derecha, la otra entró por la izquierda y salió por la parte superior). Este tipo de imágenes se obtiene iluminando la escena en movimiento en los instantes t_1 , $t_1 + \Delta t$, $t_1 + 2\Delta t$, $t_1 + 3\Delta t$, ..., $t_1 + n\Delta t$ (siendo Δt el intervalo entre destellos y $n+1$ el número de destellos; el resto del tiempo la escena permanece totalmente a oscuras). Las sucesivas posiciones de cada bola, destello tras destello, quedan registradas en la película. Mida con una regla el trayecto cubierto, entre destello y destello, por la bola de la izquierda antes del choque. Podrá apreciar que “recorre espacios iguales en tiempos iguales”.

La figura 5 muestra otra fotografía del mismo tipo, pero ahora se trata de una bola de billar que cae, soltada desde el reposo. Se observa con claridad el aumento progresivo de la distancia recorrida a medida que transcurre el tiempo. Para el mismo intervalo de tiempo Δt (el tiempo que media entre destellos sucesivos), hay una variación en la magnitud del “desplazamiento”, o cambio de posición. En consecuencia, el movimien-

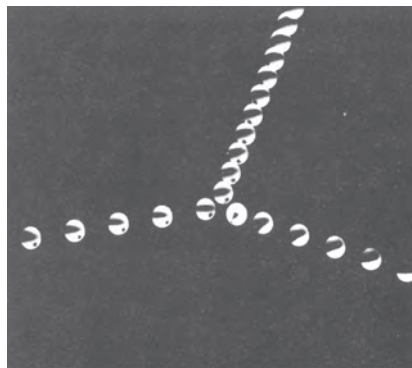


Figura 4.
Movimiento uniforme



Figura 5.
Movimiento acelerado

to de esta bola no es uniforme, según el concepto que acabamos de ver (o, dicho de otra manera, es un movimiento acelerado). En estas notas no estamos interesados en el evidente patrón, regularidad, o ley que parecen seguir dichos incrementos; su estudio requiere un tratamiento matemático que dejamos para un curso formal de Física.

En la física cotidiana, cualitativa, lo esencial es el movimiento en sí, sin que importe la relación cuantitativa entre la distancia y el tiempo, lo que distingue el MU del MA. En cambio, para los físicos esta distinción es primordial. La principal razón es que el primero no necesita una causa externa para explicar su continuación, mientras el segundo sí la requiere. En esta segunda parte de las notas, en la que trataremos sobre todo del MU, expondremos la razón y las consecuencias de esta suposición, que surge de un cambio radical en el concepto mismo de movimiento. No obstante, partiremos de la intuición acerca de la necesidad de que exista un “algo” dentro del cuerpo en MU, y que hemos discutido en la primera parte de las notas, reconociendo en ella una comprensión coherente con lo que nos enseña la física newtoniana, aunque formulada en un lenguaje más preciso.

CONCEPTOS DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO E INTERACCIÓN

Según los postulados del recuadro 1, cualquier movimiento, incluyendo el MU, es un proceso complejo, pues requiere siempre un impulsor, extrínseco o intrínseco al objeto. Por el momento aceptemos el carácter absoluto del movimiento uniforme (cuando más adelante abandonemos esta suposición veremos las modificaciones que sufrirá el concepto que vamos a introducir enseguida). En el MU del disco de hockey de la ilustración 1 (es decir, en el movimiento posterior al golpe), este impulsor debe ser intrínseco, inherente al cuerpo. Aristóteles y nuestra intuición tienen cierta razón en postular su existencia, en cuanto tiene que existir algo *en* el cuerpo que lo mantenga en movimiento. La física newtoniana llama a ese algo *cantidad de movimiento** en lugar de *ímpetu** o “fuerza intrínseca”, pues establece una distinción fundamental entre la cantidad de movimiento y la fuerza: mientras la primera caracteriza el *estado** de movimiento del cuerpo considerado en sí mismo, la fuerza describe la *interacción** entre dos cuerpos: el proceso por el cual dos objetos se alteran mutuamente en algunas de sus propiedades. Esta distinción refleja dos aspectos diferentes en el movimiento: a) movimiento como estado o condición de un cuerpo en cada instante, en lo que respecta a sus relaciones de posición; b) proceso de cambio de ese estado durante un intervalo de tiempo, lo que necesariamente involucra, como veremos enseguida, dos cuerpos en interacción.

Sin embargo, la transformación conceptual obrada al poner el nombre de “cantidad de movimiento” para lo que Aristóteles (más precisamente,

los físicos del siglo XIV) llamaba el ímpetu, el “impulsor intrínseco” del MU, es muy profunda. Pues, en la física newtoniana, la cantidad de movimiento no se interpreta de manera causal, como un agente activo. Al contrario de lo que solemos creer, el MU, en la visión newtoniana, supone la ausencia completa de un *agente* impulsor, incluso interno. Para exponer el porqué de este contraste tan radical, es necesario comenzar comprendiendo que no existe, ni podrá existir jamás, un “impulsor intrínseco” a un cuerpo aislado, ya que todo cuerpo en realidad se pone en movimiento, o modifica su estado de movimiento, como resultado de una interacción con un segundo cuerpo. Una “experiencia de pensamiento” muy sencilla puede convencer al lector. ¿Le es posible levantarse de la silla sobre la que está sentado actualmente sin apoyar los pies sobre el piso ni las manos sobre la silla o cualquier otro objeto? Entre las muchas experiencias cotidianas que indican la necesidad de una interacción entre dos cuerpos para cambiar el estado de movimiento, podemos mencionar lo que sucede cuando un carro enfrenta una curva muy cerrada con la carretera cubierta de hielo, por lo que no hay adherencia o interacción entre las llantas y el pavimento. En lugar de cambiar la dirección de movimiento para tomar la curva, el auto continúa en su movimiento original y se sale de la carretera, pues es la interacción entre las llantas y el piso lo que produce la fuerza sobre el auto necesaria para cambiar su dirección –observe la ilustración 2– (al igual que es la interacción entre los pies y el suelo lo que nos hace mover y controlar nuestro cuerpo al caminar –ver ilustración 3–)¹.



Ilustración 2. Carro en curva cerrada

¹ Los cohetes pueden parecer un ejemplo que contradice la suposición de la necesidad de una interacción entre dos cuerpos para cambiar sus estados de movimiento. Lo que sucede es que en estos casos la interacción se produce entre la estructura del cohete con los gases expulsados por las toberas, gases que constituyen un material diferente.



Ilustración 3. Personas en movimiento

VELOCIDAD, ACELERACIÓN, MARCO DE REFERENCIA

Una distinción conceptual importante, relacionada con los dos aspectos del movimiento que hemos discutido (movimiento como estado versus movimiento como proceso de interacción, o cantidad de movimiento versus fuerza) es la distinción entre las magnitudes físicas *velocidad** y *aceleración**. La primera describe el estado de movimiento, o su intensidad, en un instante dado (también se puede denominar “rapidez”, con una pequeña diferencia de significado que no es necesario tener en cuenta por el momento); la segunda describe el *cambio* de velocidad como consecuencia de una interacción.

Para definir cuantitativamente la velocidad tenemos que retomar la cuestión del carácter no absoluto del movimiento (ver afirmación 1 del recuadro 1, p. 6). Comprender la física newtoniana presupone darse cuenta de que no existe ninguna razón para considerar alguna, entre todas las velocidades que observan los diferentes espectadores del movimiento, como más verdadera que las demás. En consecuencia, para establecer su valor es preciso primero definir explícitamente el *marco de referencia**: el punto considerado inmóvil en el espacio y con respecto al cual se miden las posiciones de los cuerpos. Como medida de la velocidad (para un cuerpo en MU) se toma entonces la distancia recorrida, *respecto al observador* (o su marco de referencia), por unidad de tiempo. El carácter no absoluto del movimiento significa que todos los diferentes marcos de referencia, que se mueven unos respecto de otros con movimiento uniforme, son igualmente válidos, por lo que un cuerpo puede estar, a la vez, en reposo (con respecto a cierto marco) y con una cierta velocidad uniforme (respecto a otro marco).

Podemos entender la arraigada tendencia psicológica a atribuir al movimiento un carácter absoluto debido a que en la vida cotidiana el marco de referencia está siempre implícito, porque lo constituye la superficie de la Tierra². Más adelante profundizamos en estos dos nuevos conceptos, la *relatividad del movimiento** y el de marco de referencia; por el momento continuaremos despejando el arraigado prejuicio de que todo movimiento requiere un impulsor (manifiesto u oculto), prejuicio que es el más profundo obstáculo psicológico para la comprensión de la física newtoniana.

Recapitulando, el concepto newtoniano de movimiento requiere distinguir las magnitudes que describen el movimiento como tal, de las que describen su cambio. Entre las primeras hemos hablado de la velocidad, y entre las segundas mencionamos la aceleración. Mientras la velocidad no produce efectos en el organismo (pues es relativa al marco de referencia), el cambio de velocidad, que llamamos “aceleración”, sí los produce (como lo experimentan los astronautas al despegar). En cualquier texto formal de Física estudiará estas nociones y las relaciones entre sus valores numéricos (estudio que se denomina *cinemática**, que describe de manera precisa el cómo del movimiento y de sus cambios, en términos de la relación entre la posición y el tiempo³). En la tercera parte procederemos a introducir los conceptos y variables que describen las interacciones y con ello la explicación del cambio de movimiento, pero antes es necesario analizar con más detalle el movimiento uniforme hasta estar convencidos de que la teoría de Newton al respecto es razonable.

INERCIA

El MU persiste, entonces, por sí mismo, según Newton, no solamente sin que requiera una interacción, sino que no puede haber ninguna o, si la hay, debe haber *otra* interacción compensatoria que anule exactamente el efecto de la primera (las interacciones se combinan según ciertas leyes que luego estudiaremos). Pero entonces, ¿qué queda de nuestra intuición de la causalidad, tan profundamente arraigada en nuestra mente y por la que nos es imposible imaginar un suceso que no tenga una razón para su ocurrencia? Esta necesidad psicológica explica la inclinación a atribuir la persistencia del MU a la acción de un “impulsor oculto” en el mismo cuerpo,

² Por ello pudimos suponer provisionalmente que el MU es absoluto, cuando en la sección anterior introdujimos el concepto de cantidad de movimiento. Pero, en realidad, la cantidad de movimiento de un cuerpo es también relativa a un marco de referencia, al igual que la velocidad (veremos en la tercera parte que ambas magnitudes son directamente proporcionales). Cuando no se especifica el marco de referencia es porque se trabaja con el marco de referencia terrestre.

³ Junto con la *dinámica**, constituye la *mecánica newtoniana* en su formulación pedagógica clásica.

algo transferido a éste por el “impulsor externo”, es decir, el generador del movimiento a partir del reposo. Si nos deshacemos del impulsor oculto, a la pregunta por la *causa* de esta permanencia pueden darse dos explicaciones. Una primera propone que la cantidad de movimiento obedece la siguiente *ley de conservación**:

La cantidad de movimiento de un cuerpo puede cambiar únicamente como consecuencia de interacciones con otros cuerpos.

Recuadro 2. Ley de conservación de la cantidad de movimiento

Una segunda explicación atribuye a los cuerpos una especie de “resistencia” a cambiar su estado de movimiento. La propiedad de oponer esta resistencia se denomina *inercia*⁴. Newton usó algunas veces la expresión “fuerza de inercia” para esta propiedad, pero este nombre no prosperó pues la palabra “fuerza” se reservó para describir la interacción entre dos cuerpos (además sugiere erróneamente que la inercia tiene un carácter activo).

Algunos ejemplos cotidianos nos permiten “percibir” esta propiedad. Es lo que explica la necesidad de que un bebé en un carro debe viajar en una silla especial con correas. De otra manera, ante un frenazo del carro, su movimiento respecto a la Tierra, que proseguiría luego de detenerse el vehículo, le llevaría a estrellarse contra el parabrisas (figura 6). De la misma manera, si usted lleva agua en una ponchera y para bruscamente, verá que el agua se derrama por delante. Ello es debido a la permanencia inercial del propio movimiento del volumen de agua. De hecho, mientras más rápido camina, más lejos llegará el agua.

Un último ejemplo de inercia, de los muchos que podemos imaginar, es el que se presenta a continuación. Amarre un tarro pesado a una cuerda, y por medio de ésta haga girar al tarro sobre su cabeza en un plano horizontal, a modo de honda (figura 7). Si la rapidez de giro aumenta progresivamente hasta que, ¡zás!, la cuerda se revienta (figura 8), ¿cuál va a ser la trayectoria del tarro inmediatamente después del reventón?: ¿Sigue luego girando un poco la piedra, como muestra la trayectoria rotulada como (a)?; ¿o, más bien, su nueva trayectoria será la (b)? La realidad es que el resultado es el mostrado en la trayectoria (b) –si no lo cree haga el experimento-. Así pues, esta experiencia nos muestra que la inercia se manifiesta en que

⁴ ¿No es la inercia otro nombre para el impulsor oculto que nos imaginamos intuitivamente como causa del movimiento uniforme? La distinción esencial es que este impulsor es una entidad transeúnte (es decir, que está presente en el cuerpo sólo durante el movimiento), y que produce activamente el estado de movimiento; en cambio, la inercia es una propiedad permanente por la cual el cuerpo se opone pasivamente al cambio de su estado de movimiento.

el cuerpo conserva, no sólo la rapidez del movimiento, sino también su *dirección*.

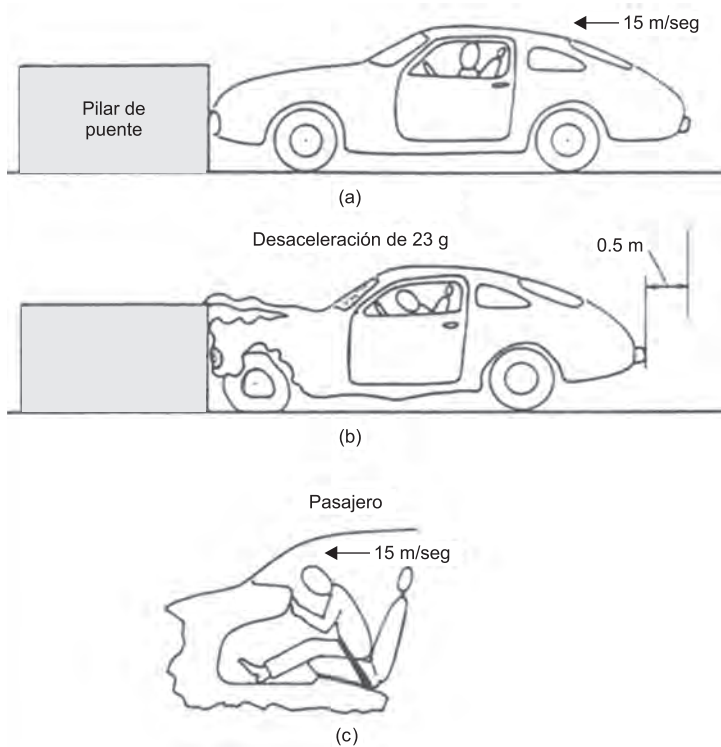


Figura 6. Inercia



Figura 7. Situación inicial

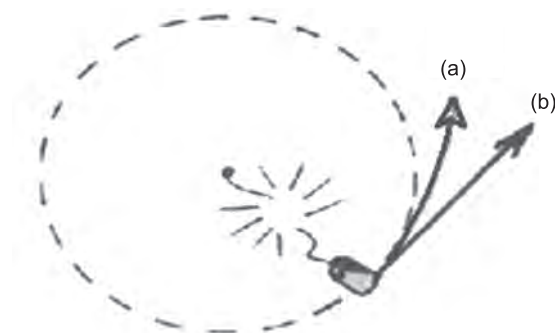


Figura 8. ¿Qué camino sigue el móvil?

La propiedad de la inercia puede verse desde otro punto de vista: si el movimiento no es uniforme, entonces sí que es necesario atribuir el cambio del estado de movimiento (bien sea en magnitud o dirección) a una “interacción neta”, un conjunto de interacciones no compensadas. La existencia de la inercia hace que se necesite una interacción para pasar del reposo a un estado de movimiento, del movimiento al reposo o para cambiar la dirección de movimiento. Esta propiedad, considerada cuantitativamente, también da cuenta de la mayor o menor “intensidad de interacción” (lo que llamaremos más adelante “fuerza”) que se necesita aplicar a diferentes cuerpos para *ponerlos en movimiento*, según su mayor o menor inercia.

En consecuencia, nuestra intuición, y con ella el modelo aristotélico, tiene razón al sostener el principio: para que un cuerpo *empiece* a moverse, se necesita un motor que lo ponga en movimiento. En otras palabras, cuando hablamos del paso del reposo al movimiento, es verdad que *todo lo que se mueve es movido por otro*. Este principio, al que todos estamos correctamente habituados, nos habla, por tanto, de algo que podríamos llamar *inercia de reposo*. La *inercia de movimiento*, el que los cuerpos conserven por sí mismos su estado actual de movimiento, es mucho más difícil de aceptar, aunque la creciente familiaridad con la tecnología moderna del transporte nos puede hacer más fácil esta aceptación. Más adelante nos preguntaremos: ¿Cómo se llegó al concepto de inercia, tan contrario al sentido común que ha sido muchas veces llamado “revolucionario”? Para responder esta pregunta tendremos que profundizar en la relatividad del movimiento, que nos permitirá disipar un poco el misterio de la inercia al despegarnos, por decirlo así, del planeta Tierra.

MÁS SOBRE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO

Hemos dicho que la pregunta por la causa de que un cuerpo en MU continúe en su estado de movimiento, después de haber cesado la interacción impulsora, admite otra respuesta, que rescata, en parte, nuestra intuición familiar del movimiento, por lo que tiene una historia importante: todo cuerpo en estado de movimiento uniforme mantiene este movimiento debido a que hay algo en ellos, una especie de poder o cualidad cuantificable asociada a su movimiento⁵, que hemos denominado anteriormente cantidad de movimiento. También hemos visto que esta cualidad permanece constante, o se conserva, en ausencia de interacciones con otros cuerpos. Asignar a los cuerpos esta cualidad es una manera de dar cuenta de la sensación que se tiene, al detener una pelota de béisbol, de recibir un golpe en la dirección que lleva la pelota (ver ilustración 4). De la misma manera podemos explicar los efectos destructores que causa el choque de un camión contra un auto detenido, así como las innumerables experiencias que nos llevan a imaginar el movimiento como una situación completamente distinta del reposo.

Nota terminológica: Es muy probable que usted respondiera la pregunta por el nombre de ese “algo” que tiene un cuerpo en movimiento, y que *no tiene* cuando está en reposo, usando el término *energía** (aunque no podría explicar lo que entiende por energía). En este uso del término, el lenguaje cotidiano y el científico coinciden: un cuerpo que se mueve (respecto a un observador) tiene más energía (también respecto a ese observador) que un cuerpo en reposo, al igual que tiene mayor cantidad de movimiento.



Ilustración 4. El bateador comunica a la pelota una cantidad de movimiento. Si el receptor detuviera sin guante la pelota, esta cantidad de movimiento produciría un daño considerable.

⁵ Más, precisamente, esta cantidad está asociada a la relación entre el objeto y el marco de referencia, no al objeto en sí mismo, puesto que el movimiento se define con respecto a un cierto marco de referencia. En la siguiente sección nos detendremos en esta importante aclaración.

PRINCIPIO DE RELATIVIDAD DEL MOVIMIENTO

Este principio, que enunciamos unas páginas más atrás, afirma que el valor de la velocidad depende del marco de referencia respecto al cual se mide. Históricamente, la evolución desde la inercia de reposo, hasta la inercia de movimiento, es muy compleja y en ella ocupó un papel esencial este principio fundamental de la Física. Pero nuestro objetivo no es convertirnos en historiadores sino facilitar la formación en nuestra mente de la concepción newtoniana. Por eso vamos a simplificar esa historia a sus rasgos esenciales.

Si la Tierra está en movimiento en el espacio, ¿por qué no lo vemos así?

La gran discusión científica y filosófica en los siglos XVI y XVII, en los que ocurrió la llamada “revolución científica”, fue sobre el movimiento o no de la Tierra, tanto el de rotación diaria como el movimiento siguiendo una órbita alrededor del Sol (figura 9). Nosotros, como habitantes de la Tierra, desde nuestro punto de observación, desde nuestra nave espacial que es este planeta, *vemos* que nuestro planeta está en reposo, y que el Sol está en movimiento a nuestro alrededor. Si viajáramos al Sol y nos detuviéramos sobre su superficie veríamos lo contrario: el Sol en reposo y la Tierra girando a nuestro alrededor. Así, pues, el modelo astronómico propuesto por Copérnico presupone implícitamente que estar o no en movimiento depende del punto de vista.

Sucede lo mismo dentro de un vehículo: para los pasajeros, las sillas del vehículo están en reposo, pero para el observador parado en el andén, las mismas sillas están en movimiento (figura 10). En conclusión, para hablar de movimiento o reposo necesi-



Nicolás Copérnico (1473-1543), astrónomo polaco, conocido por su teoría según la cual el Sol se encontraba en el centro del Universo y la Tierra, que giraba una vez al día sobre su eje, completaba cada año una vuelta alrededor de él. Este sistema recibió el nombre de heliocéntrico o centrado en el Sol.

riamente se necesita definir lo que anteriormente hemos llamado un *marco o sistema de referencia* determinado. Es decir, un objeto considerado en reposo por el observador y respecto al cual éste determina la posición. Decimos así que *el movimiento es relativo al marco que se toma como referencia*. Esta noción de movimiento nos permite comprender el significado del principio de relatividad: *el estado de reposo es “físicamente equivalente” al estado de movimiento uniforme*. En general, el principio afirma que todos los marcos de referencia que se encuentran en movimiento uniforme entre sí son igualmente válidos⁶. Una de las principales contribuciones de Galileo a la física fue este principio.

El principio de relatividad significa, volviendo a nuestro ejemplo del tren, que no tiene sentido pensar que la verdad sobre el movimiento o reposo de las sillas dentro del tren la tenga, o bien el pasajero, o bien el observador en el andén. Desde el punto de vista particular de cada uno, ambos están en lo cierto. Debemos abandonar nuestra intuición de que estar en reposo es una condición fundamentalmente diferente de la condición de movimiento uniforme, si queremos comprender el movimiento tal como lo concibe la física actual.

Aunque el concepto de relatividad se formuló primero que el concepto de inercia, el primero depende del segundo pedagógicamente y lógicamente. Pues, sin la inercia, el concepto de relatividad parece un contrasentido, pues afirma algo que contradice nuestra



Galileo (Galileo Galilei) (1564-1642), físico y astrónomo italiano que, junto con el astrónomo alemán Johannes Kepler, comenzó la revolución científica que culminó con la obra del físico inglés Isaac Newton.

⁶ *Al cambiar de marco de referencia, cambia el valor numérico de la velocidad; pero este cambio no es arbitrario: estos valores están relacionados entre sí y con la velocidad de uno de los marcos de referencia respecto al otro. En el curso formal de Física se estudia la relación matemática entre los valores de la velocidad para los diferentes marcos de referencia.*

percepción: “el movimiento es equivalente al reposo”. Esta percepción se debe a que estamos tan acostumbrados a referir todo el movimiento a la Tierra, que concebimos el movimiento como algo absoluto, dejando implícito el marco de referencia.

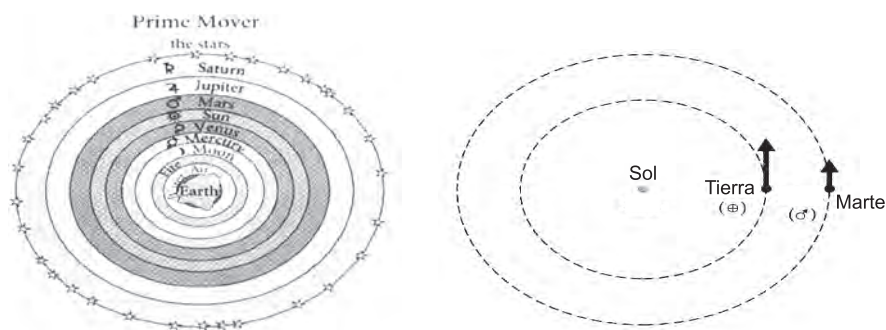
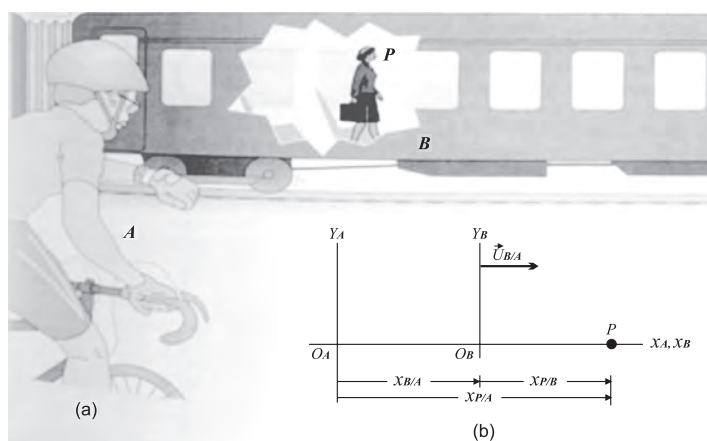


Figura 9. Modelos astronómicos aristotélico y copernicano



**Figura 10. El reposo es equivalente al movimiento uniforme:
¿quién está en lo cierto respecto al movimiento o reposo de las sillas del tren:
el pasajero o el observador en el andén?**

El principio de relatividad se puede expresar de otra manera, más cuantitativa, mediante la cantidad de movimiento: *el valor de la cantidad de movimiento depende del marco de referencia*. Es la diferencia conceptual fundamental de este concepto con el pre-newtoniano de ímpetu (aparte de su definición cuantitativa, rigurosa en términos de masa y velocidad, como veremos en la tercera parte). Podemos aumentar nuestra comprensión de este principio volviendo a nuestro jugador de béisbol en trance de detener

una bola con su manilla. Si nos imaginamos que corre a la misma velocidad que la bola y en su misma dirección, al cogerla no sentiría presión contra el guante, pues, en ese caso, la cantidad de movimiento de la bola sería cero (respecto al jugador).

PRIMERA LEY DEL MOVIMIENTO DE NEWTON

Newton publicó su construcción teórica en el año 1687, en su famoso libro *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (*Principios matemáticos de la filosofía natural*), siguiendo el modelo axiomático de la geometría de Euclides⁷. El punto de partida de sus deducciones fueron sus famosas tres leyes, de las cuales la primera postulaba:

Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme hacia delante, a menos que sea obligado por las fuerzas impresas a cambiar su estado.

Recuadro 3. Primera ley del movimiento de Newton

Este postulado resume la discusión sostenida durante el medio siglo precedente, en Europa, por los científicos, a la que contribuyeron especialmente Galileo y Descartes. Combina el concepto de inercia que hemos discutido y el principio de relatividad del movimiento, a la vez que introduce la noción científica de *fuerza** como la explicación del cambio de velocidad. En términos más modernos, esta ley se suele expresar así: *la velocidad de un cuerpo es constante si y sólo si no hay “interacción neta”*⁸. Otra forma equivalente de expresarla es: *la cantidad de movimiento de un cuerpo es constante en ausencia de interacción y únicamente las interacciones ocasionan la variación de la cantidad de movimiento*.

Otros argumentos a favor de la primera ley de Newton

Un cambio de visión tan radical, como el que propone la Física, entre la concepción aristotélica-cotidiana (el movimiento uniforme requiere un impulsor) y la newtoniana (el movimiento uniforme se mantiene por

⁷ Se atribuye al famoso matemático Euclides (cuya vida es poco conocida, y se supone que vivió en el siglo III a. C.) el famoso libro *Elementos de Geometría*, en los que el saber geométrico de los griegos se organizó en un sistema deductivo de axiomas, postulados y teoremas.

⁸ Hay diferencias cualitativas fundamentales entre la situación de ausencia de interacción (algo que no se da en la realidad) e interacciones compensadas (lo que se da con mucha frecuencia, por ejemplo, al intentar arrastrar una caja muy pesada y no lograr moverla). Sin embargo, estas dos situaciones no se diferencian matemáticamente.



René Descartes (1596-1650), filósofo, científico y matemático francés, considerado el fundador de la filosofía moderna.

inercia, o por conservación de la cantidad de movimiento), necesita algo más que argumentos lógicos para ser aceptado y asimilado. Afortunadamente ahora disponemos de la posibilidad de realizar experimentos con objetos sometidos a interacciones que se compensan exactamente, *de modo que no haya interacción neta*. Es el caso del llamado “riel de aire” que se encuentra en los laboratorios universitarios de física. Se trata efectivamente de un riel sobre el que se monta “a caballo” un carrito adaptado a la forma del riel, como se ve en la ilustración 5. A lo largo de los lados superiores del riel se han hecho agujeritos por los que fluye aire a presión. El aire evita el contacto entre el carrito y el metal, formando un colchón de aire. Se comprueba que efectivamente los carritos se mueven a velocidad prácticamente constante después de ser impulsados.



Ilustración 5. Riel de aire

Galileo, el primer defensor del concepto de inercia de movimiento, argumentó a favor de este principio a partir de la periodicidad del movimiento pendular (ver figura 11). Es bien sabido que la esfera tiende a volver a la

altura inicial una vez y otra. En realidad sabemos que un péndulo termina, al cabo de muchas oscilaciones, por detenerse. Sin embargo, Galileo sostuvo, si pudiéramos eliminar la presencia de cualquier fuerza de resistencia al movimiento (de las que hablaremos más adelante), el movimiento pendular persistiría indefinidamente. El péndulo imaginario de Galileo constituye lo que se llama actualmente un *experimento mental*: una modificación hipotética e ideal de un experimento real o de la experiencia común, que extrapola lógicamente el comportamiento realmente observado a condiciones que podemos pensar teóricamente, pero que, por razones prácticas, no se pueden realizar.

Así, si imaginamos el péndulo en el vacío y que está soportado en un pivote perfecto, veríamos que continúa oscilando indefinidamente. Para llegar a esta conclusión, consideremos que construimos péndulos cada vez más perfectos, que se aproximan de modo cada vez mejor a las condiciones ideales del experimento mental (es decir, que vamos eliminando las fuerzas de resistencia al movimiento): si vamos disminuyendo más y más éstas, el movimiento de subida de la pesa se va acercando más y más al nivel de partida, hasta que en el límite matemático de fricción cero alcanzaría exactamente dicho nivel.

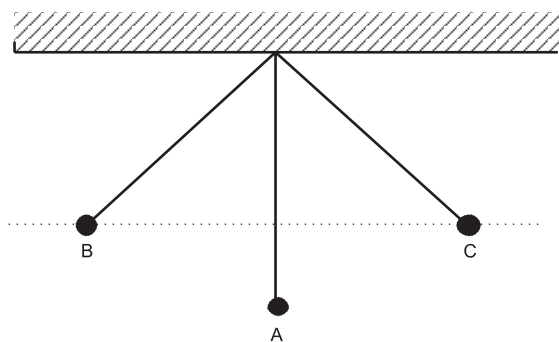


Figura 11. Soltamos en B una bola amarrada por una cuerda al techo. Si consideramos el caso límite en el que las fuerzas de fricción se hacen despreciables, la bola alcanza el mismo nivel de partida en el punto C. Desde C se devuelve hasta B y así sucesivamente.

Las figuras 12 y 13 representan otro experimento mental de Galileo, mediante el cual construyó uno de sus argumentos más poderosos para defender la inercia de movimiento. Un cuerpo se mueve entre dos planos inclinados separados por una superficie horizontal. Los tres planos nuevamente se consideran imaginariamente como sin fricción. Por un razonamiento similar al empleado con el péndulo, sabemos que la bola ascendería por la pared derecha hasta el nivel de partida. Si disminuimos la

pendiente de esta pared (figura 13), la bola recorrería distancias cada vez mayores, siempre alcanzando el nivel de partida. En el caso límite en el que la “pared” llega al caso límite de inclinación nula (es decir, se convierte en una prolongación indefinida del plano horizontal), la bola recorrería una distancia infinita.



Figura 12. *Si las superficies fueran perfectamente lisas el movimiento de vaivén continuaría por siempre.*



Figura 13. *La pared de la derecha tiende a una posición horizontal. ¿Hasta dónde llega la bola en el caso límite?*

TERCERA LEY DE NEWTON

En la tercera sección, al estudiar la segunda ley de Newton, precisaremos cuantitativamente la noción de fuerza para el caso en que existe una interacción neta. Por el momento la hemos introducido como la descripción del proceso de interacción entre dos cuerpos que *explica* el cambio de velocidad. El concepto de fuerza, en la teoría newtoniana, es más sofisticado que la noción cotidiana. La tercera ley de Newton formula varios aspectos fundamentales de tal concepto, por lo cual la introduciremos antes que la segunda. El hecho de que las fuerzas describan interacciones, procesos que tienen lugar *entre dos cuerpos* (un cuerpo no puede interactuar consigo mismo), implica que la fuerza no tiene una existencia independiente del *proceso* de interacción que describe. También implica que siempre se dan en pareja: la fuerza que ejerce un cuerpo sobre otro va acompañada necesariamente de otra fuerza que ejerce el segundo cuerpo sobre el primero. Es un hecho experimental que, cuando se define cuantitativamente la magnitud “fuerza” (de la manera que indicaremos en la tercera parte), ambos elementos de la pareja de fuerzas tienen el mismo valor numérico (aunque

el cambio de movimiento que tienden a producir sigue direcciones opuestas). Este hecho experimental es el contenido esencial de la tercera ley de Newton:

A la acción se opone siempre una reacción contraria e igual, o sea, las acciones recíprocas entre dos cuerpos son siempre iguales y se dirigen en sentidos contrarios.

Recuadro 4. Tercera ley de Newton.

Por ejemplo, el caballo de la figura 14 ejerce sobre la carreta una cierta fuerza, representada mediante la flecha que va de izquierda a derecha con la letra **F**. A la vez; la carreta ejerce sobre el caballo *otra* fuerza, **P**, representada mediante la flecha que va de derecha a izquierda. Ambas fuerzas describen la misma interacción, que es diferente de otras interacciones también presentes, como la que hay entre las herraduras del caballo y el piso. Las fuerzas **F** y **P** forman lo que se llama un “par de acción y reacción”, y tienen la misma magnitud, pero su sentido es contrario.

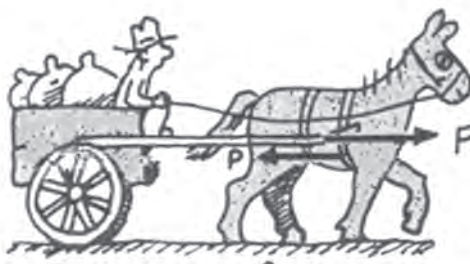


Figura 14. Par de acción y reacción

Cuando intenta empujar lateralmente una caja grande llena de papeles sobre una alfombra usted ejerce una fuerza hacia delante mientras la caja ejerce, como respuesta a esta interacción, una fuerza sobre usted (que es la fuerza que percibe). Esto sucede sea que la caja se mueva o sea que la fuerza que usted ejerce no logre ponerla en movimiento. Pero ¿cómo puede ocurrir esto último, si la fuerza es lo que causa el cambio de velocidad?

RESISTENCIA AL MOVIMIENTO

Nuestro estudio del movimiento uniforme deja algunos cabos sueltos, que tenemos que atar antes de pasar de lleno al movimiento acelerado. Por ejemplo: *¿cómo explicar la ausencia de movimiento cuando hay fuerza, o su disminución, cuando parece no haberla?* (por ejemplo, sabemos que cuando vamos en bicicleta y dejamos de pedalear nos vamos frenando poco a poco).

Según la concepción intuitiva del movimiento, la persistencia de la velocidad requiere la persistencia de la fuerza intrínseca, denominada ímpetu en la física prenewtoniana, y viceversa. Por tanto, la experiencia común de la disminución progresiva de velocidad que sufre un cuerpo en movimiento que se desplaza sobre un piso horizontal rugoso, por ejemplo, se interpretaría intuitivamente como si tal ímpetu se fuera agotando o consumiendo, hasta que su efecto, el movimiento, desapareciera por completo. Ya hemos visto que este modelo del movimiento se puede rescatar desde la física cambiando la noción de ímpetu por la de cantidad de movimiento. Desde la perspectiva newtoniana o inercial, la progresiva disminución de la cantidad de movimiento (manifestada en la disminución de la velocidad), requiere una explicación. También la requieren las muchas ocasiones como la de la caja que se niega tercamente a moverse a pesar de nuestro esfuerzo. La teoría newtoniana construye esta explicación suponiendo una clase de interacciones entre los cuerpos y el medio que los rodea y las superficies sobre las que se mueven. La totalidad de los movimientos que experimentamos cotidianamente terminan por extinguirse debido a la actuación de una diversidad de fuerzas que oponen *resistencia al movimiento**. Por ejemplo, la adhesión entre dos superficies sólidas rugosas en contacto que se desplazan entre sí (como en el caso de nuestra caja y la alfombra), el efecto contrario al movimiento del *océano de aire* dentro del cual nos movemos (como en el caso del ciclista), entre otros. Es comprensible haber pasado por alto tales fuerzas, siempre “destructoras del movimiento”, a diferencia de las fuerzas aristotélicas, que producen movimiento; en efecto, la palabra “fuerza”, en su significado más general, nos trae a la mente acción, desarrollo, aumento, etc.

Desde la visión aristotélica del movimiento, en la que la fuerza es aquello que *causa* el movimiento, hablar de fuerzas que se oponen al movimiento parece contradictorio. Debemos distinguir conceptualmente dos clases de fuerzas por su origen (aunque matemáticamente no se diferencian), que podrían llamarse “fuerzas activas” y “fuerzas pasivas”. Las primeras son las que corresponden al concepto intuitivo de fuerza: los empujones, jalones, entre otros, cuyo efecto es producir movimiento en la dirección en que se ejercen (a menos que sean contrarrestadas por otras fuerzas). Las

fuerzas pasivas, en cambio, son siempre contrarias al movimiento (actual o posible), y surgen como respuesta a una fuerza activa. Para entender este hecho, observe la figura 15. Al presionar una pared, las moléculas de ésta actúan como un muelle comprimido y siento mi interacción con la pared (es decir, con los muelles microscópicos que la forman) como una presión contra mi mano, de acuerdo con la tercera ley de Newton. Las fuerzas de resistencia del aire son del tipo pasivo.



Figura 15

El estudio matemático de las fuerzas de resistencia al movimiento es sumamente complejo, y todavía hoy existen aspectos que no se comprenden por completo. Por lo general no existe una ley simple que permita obtener el valor cuantitativo de la fuerza de resistencia (al contrario de lo que sucede con el peso, como se conoce cotidianamente la fuerza de atracción gravitatoria que estudiaremos en el siguiente capítulo). No obstante, existen leyes aproximadamente válidas, que permiten construir modelos de los sistemas físicos, útiles para un amplio rango de aplicaciones.

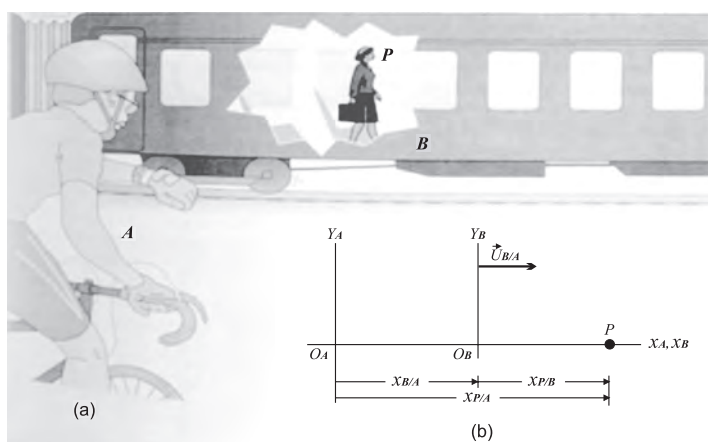
Recuerde:

Lo más importante del capítulo es la primera ley de Newton, que define la propiedad de la inercia y elimina la necesidad de una causa para la continuidad del movimiento uniforme. También es importante el principio de relatividad, según el cual el movimiento uniforme es equivalente al reposo (visto desde otro sistema de referencia).

PREGUNTAS DE COMPRENSIÓN

1. ¿Cómo puede ser compatible con el principio de relatividad la frase publicitaria de algunas campañas promovidas por la Secretaría de Tránsito, a saber: *la velocidad mata*?

2. Suponga que el pasajero A dentro del tren mencionado en el texto (figura 10, repetida al margen) realiza algunos experimentos sobre el suelo de su vehículo. Recuérdese que el observador B está situado en una posición fija en el andén. B observa los experimentos que A realiza dentro del tren. En cada uno de los siguientes experimentos, describa lo que cada observador aprecia desde su propio marco de referencia, mediante un diagrama de la trayectoria observada por A y por B.



- A coloca en reposo una bola en cierta posición del piso.
 - A hace que la bola ruede sobre el piso en línea recta con velocidad uniforme con respecto a él: 1) hacia el chofer; 2) hacia la parte posterior del tren; 3) en dirección perpendicular a la del movimiento del tren.
 - A deja caer la bola desde sus manos, directamente hacia sus pies.
 - A lanza la bola hacia arriba verticalmente y la agarra cuando desciende.
 - A suspende la bola del techo mediante una cuerda.
 - A arroja la bola hacia delante con una velocidad horizontal inicial.
 - A arroja la bola hacia atrás con una velocidad inicial horizontal (como parte de este problema, considere el caso especial en que la magnitud de su velocidad horizontal es igual a la magnitud de la velocidad horizontal del tren relativa a la Tierra).
3. ¿Por qué es necesario que el movimiento del tren, en el ejercicio 2, sea uniforme?

4. Una mariposa vuela dentro del tren del ejercicio 2.
 - i) ¿Tiene que hacer más esfuerzo al volar hacia delante que hacia atrás?;
 - ii) ¿Afecta la velocidad del tren (con respecto a la Tierra) el vuelo de la mariposa?
5. La Tierra ha estado girando sobre sí misma y alrededor del Sol por miles de millones de años. ¿De dónde ha obtenido el combustible para mantener este movimiento?
6. ¿En qué sentido es correcto decir que *una fuerza causa que un cuerpo se mueva* y en qué sentido no es correcto?
7. Algunas personas hablan de que *la fuerza del motor vence la fuerza de inercia del carro* . ¿Es correcta esta expresión?