Capítulo Tercero

Movimiento Circular

¿Por Qué no se Cae la Peonza Mientras Está Girando?
Millares de personas han jugado en su infancia a "bailar" la peonza o la perinola, pero pocas de ellas son las que pueden contestar bien a esta pregunta. Y en realidad, ¿qué explicación se le puede dar al hecho de que una peonza en rotación, situada en posición vertical o inclinada, no se caiga? ¿Qué fuerza la mantiene en esa posición aparentemente inestable? ¿A caso no actúa sobre ella la gravedad?
En este juguete se produce una interacción de fuerzas muy interesante. La teoría de la peonza es bastante compleja y no es nuestro propósito profundizar en ella, pero sí queremos dar a conocer la causa principal de que la peonza no se caiga mientras está girando.

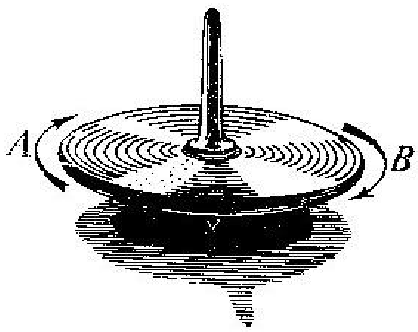

Fig. 27. ¿Por qué no se cae la perinola?

En la fig. 27 se representa una perinola que gira en la dirección que indican las flechas. Prestemos atención a la parte A de su borde y a la parte B, opuesta a aquélla. La parte A tiende a moverse alejándose de nosotros; la B, por el contrario, tiende a acercarse a nosotros. Veamos ahora qué movimiento reciben estas partes si empujamos hacia abajo el borde de la perinola para que se incline hacia nosotros.

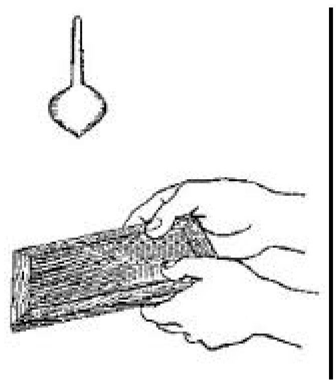

Fig. 28. Si se echa por alto una perinola en rotación, su eje conserva la dirección que tenia.

Al hacer esto obligamos a la parte A a moverse hacia arriba y a la B a moverse hacia abajo; la dirección del empuje forma un ángulo recto con el movimiento propio de estas partes. Pero como la perinola gira rápidamente y la velocidad circular que tienen las partes del disco es muy grande, la nueva velocidad que le comunicamos al hacer que se incline es insignificante en comparación con la que ya tenía, por eso se suma a ella, produciendo una velocidad resultante, que se aproxima mucho a la circular, y el movimiento de la perinola casi no varía. Esto explica por qué la perinola (o la peonza) parece que se resiste a que la vuelquen. Cuanto más pesada sea la peonza y más rápidamente gire, tanto más resistencia opone a ser volcada.

La esencia de esta explicación está relacionada directamente con la ley de la inercia. Cada una de las partículas de la peonza se mueve, describiendo una circunferencia, en un plano perpendicular al eje de giro. Por la ley de la inercia, cada una de estas partículas tiende en cada instante a salirse de la circunferencia siguiendo una línea recta tangente a aquélla. Pero cada una de estas tangentes se encuentra en el mismo plano que la circunferencia; por lo tanto, cada partícula tiende a moverse sin abandonar el plano perpendicular al eje de giro en que se halla. De aquí se deduce que todos los planos de la peonza, perpendiculares al eje de rotación, tienden a conservar su posición en el espacio y por esto, la perpendicular común a todos ellos, es decir, el propio eje de rotación, también tiende a conservar su dirección.

Los movimientos que pueden provocar en la peonza las fuerzas exteriores son muy variados y no vamos a examinarlos. Esto exigiría explicaciones demasiado detalladas que resultarían ,aburridas. Mi propósito se reducía a aclarar por qué todos los cuerpos que giran tienden a conservar invariable la dirección de su eje de rotación.

Esta propiedad tiene gran importancia en la técnica moderna en los barcos y aviones modernos se instalan aparatos giroscópicos (basados en las propiedades de la peonza), como son las brújulas, los autopilotos, los estabilizadores, etc. El efecto de giro sirve también para estabilizar las trayectorias de los proyectiles y de las balas. Este mismo efecto se utiliza para estabilizar el movimiento de los cohetes cósmicos y de los satélites artificiales. Todas éstas son aplicaciones prácticas de lo que parecía un simple juguete.

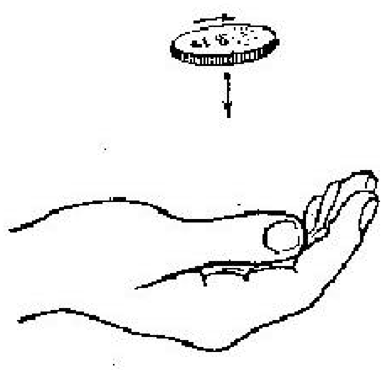

Fig. 29. Así cae una moneda si se echa hacia arriba girando alrededor de su eje.

El Arte de los Malabaristas

Muchos de los espectaculares juegos de manos que incluyen en sus programas los malabaristas se basan también en la propiedad que tienen los cuerpos giratorios de mantener la dirección de su eje de rotación. A continuación me permito citar unos párrafos del ameno libro del físico y profesor inglés John Perry "La Peonza Giratoria":

"En una ocasión estaba yo demostrando algunos de mis experimentos ante un auditorio que tomaba café y fumaba plácidamente en el magnífico salón de conciertos "Victoria" de Londres. Yo hacía lo posible por interesar a mis oyentes explicándoles que si queremos echarle a alguien un sombrero, para que pueda recogerlo con su bastón, hay que lanzarlo de forma que vaya girando, de la misma manera que cuando tiramos una anilla para que caiga en un sitio determinado. Porque todo cuerpo giratorio opone una resistencia al cambio de dirección de su eje de rotación en la que se puede confiar siempre.

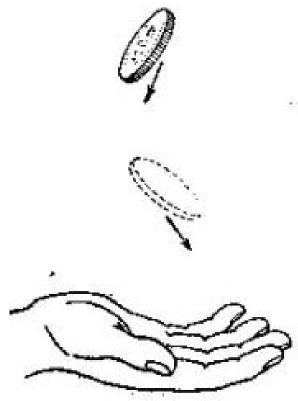

Fig. 30 Si la moneda se echa hacia arriba sin rotación puede caer de cualquier manera.

Luego expliqué a mis oyentes que por muy liso que sea el acabado de un cañón de arma de fuego, no puede garantizar una buena puntería; por eso, las armas modernas tienen los cañones rayados, es decir, en el alma del cañón se hacen unas estrías helicoidales en las que encajan las bandas de forzamiento del proyectil, de forma que este último debe entrar en rotación cuando la fuerza de la explosión de la pólvora le obliga a avanzar por el ánima del cañón. A esto se debe que el proyectil salga del cañón con un movimiento de rotación perfectamente determinado.

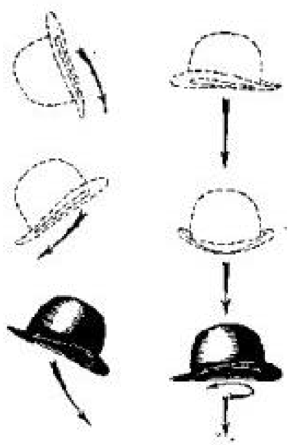

Fig. 31. Un sombrero es más fácil de coger cuando se tira dando vueltas alrededor de su eje.

Esto fue todo lo que yo pude hacer durante esta conferencia, puesto que no soy ducho en lanzar sombreros ni discos. Pero cuando terminó mi charla, empezaron a actuar dos malabaristas y yo, francamente, no hubiera podido desear una ilustración mejor para las leyes que acababa de explicar que la que ofrecía cada uno de los juegos que hacían estos artistas. Se echaban el uno al otro sombreros, anillos, platos, sombrillas, todo ... girando. Uno de los malabaristas echaba por alto toda una serie de cuchillos, los volvía a coger y otra vez los lanzaba hacia arriba con suma precisión; el público, que conocía ya el por qué de estos fenómenos, se regocijaba, se daba cuenta del movimiento giratorio que el malabarista comunicaba a cada cuchillo, soltándolo de manera que sabía con seguridad en qué posición volvería a sus manos. Yo me quedé admirado de ver que casi todos los números que presentaron los malabaristas servían de ilustración al principio enunciado anteriormente".

Otra Solución al Problema del Huevo de Colón

Colón resolvió de una manera extraordinariamente fácil el problema de poner un huevo en pie: simplemente, chafó la punta del cascarón[1].

Pero esta solución del problema no es justa, porque al chafar el cascarón varió la forma del huevo y, por consiguiente, no puso en pie un huevo, sino un cuerpo distinto, puesto que la esencia del problema está precisamente en la forma que tiene el huevo. Colón, pues, resolvió el problema para otro cuerpo, pero no para el que se buscaba.

Y no obstante el problema del huevo de Colón se puede resolver sin cambiar en absoluto la forma del huevo. Para esto no hay más que aprovechar la propiedad que tienen las peonzas, es decir, hacer que el huevo gire alrededor de su eje mayor. De esta forma el huevo se mantendrá en pie, durante cierto tiempo, sobre su extremo romo o incluso sobre su punta. La manera de conseguir esto se puede ver en el dibujo. El huevo se hace girar con los dedos. Al separar las manos vemos que gira, durante algún tiempo, de pie sobre su punta; por lo tanto el problema está resuelto.

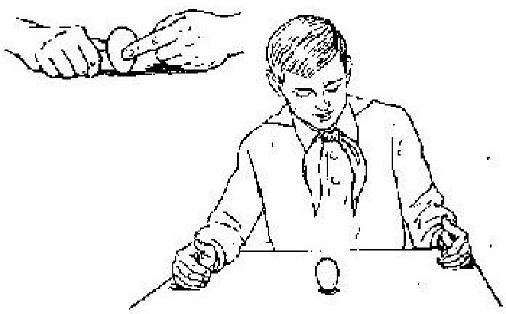

Fig. 32. Solución del problema del huevo de Colón: el huevo gira sobre su punta.

Para que el experimento salga bien hay que emplear un huevo duro. Esto no contradice las condiciones del problema de Colón, puesto que este último, al plantearlo, cogió un huevo de los que estaban en la mesa, y es de suponer que los huevos que habían servido no serían crudos.

[1] La leyenda del huevo del Colón carece de base histórica. La tradición ha atribuido al gran navegante algo que mucho antes había realizado otro personaje y con motivo completamente distinto. Fue el arquitecto italiano F. Brunelleschi (1377-1446), autor de la enorme cúpula de la catedral de Florencia, el que dijo: "Mi cúpula está tan segura como este huevo sobre su punta".

Los huevos crudos no se pueden hacer girar de pie, porque la masa líquida que tienen dentro hace las veces de freno. Esta peculiaridad sirve para distinguir con facilidad los huevos cocidos de los crudos. Este procedimiento lo emplean muchas amas de casa.

La "Anulación" de la Gravedad

"El agua no se derrama de una vasija que gira, incluso cuando dicha vasija se encuentra boca abajo, porque se lo impide la rotación" - escribía hace dos mil años Aristóteles. En la fig. 33 se representa este experimento, que sin duda han hecho muchos. Procurando que el cubito con el agua gire con suficiente rapidez se consigue que esta última no se derrame ni siquiera en aquella parte de la trayectoria en que el cubo está boca abajo.

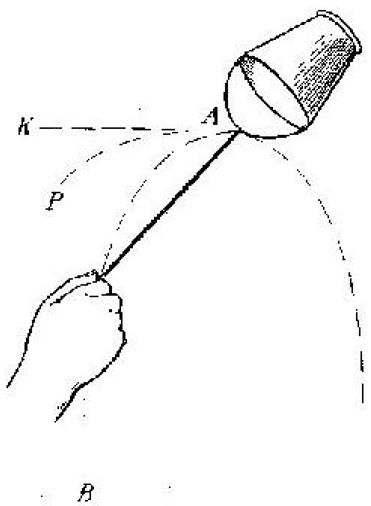

Fig. 33. ¿Por qué no se derrama el agua cuando le damos vueltas al cubo?

Generalmente se suele explicar este fenómeno por la acción de la "fuerza centrífuga", entendiendo por ésta una fuerza imaginaria que, al parecer, va aplicada al cuerpo y que hace que 58 tienda a separarse del centro de rotación. Pero esta fuerza no existe. La tendencia antedicha no es otra cosa que una manifestación de la inercia, y todo movimiento inercial se realiza sin que en él tome parte fuerza alguna. En Física se entiende por fuerza centrífuga otra cosa, es decir, la fuerza real con que el cuerpo en rotación tensa el hilo que lo sujeta o presiona sobre el camino circular que recorre. Pero esta fuerza no está aplicada al cuerpo que se mueve, sino al obstáculo que impide que este cuerpo se mueva en línea recta, es decir, al hilo, a los raíles en los trozos curvos de las vías, etc.

Volviendo al caso del cubito que gira, procuraremos esclarecer la causa de este fenómeno sin recurrir al concepto de la "fuerza centrífuga". Empezaremos por plantearnos la pregunta siguiente: ¿Hacia dónde se dirigiría el chorro de agua si hiciéramos un orificio en la pared del cubo? Si no existiera la gravedad, el chorro de agua seguiría por inercia, la dirección de la tangente AK a la circunferencia AB (fig. 33). Pero la gravedad hace que el chorro descienda y describa la curva AP (parábola). Si la velocidad circular es suficientemente grande esta curva será exterior a la circunferencia AB. Este chorro nos indica el camino que seguiría el agua (mientras gira el cubo) si las paredes que presionan sobre ella no se lo impidieran. Con esto queda claro por qué el agua no tiende en general a moverse verticalmente hacia abajo y por qué no se derrama del cubo. Para que se derramase sería necesario que la boca del cubo estuviera orientada en el sentido de su rotación.

Calculemos ahora con qué velocidad debe girar el cubo de este experimento para que el agua no se derrame. Esta velocidad deberá ser suficiente para que la aceleración centrípeta del cubo en rotación no sea menor que la aceleración de la gravedad; en estas condiciones el agua tenderá a seguir una trayectoria que se encontrará fuera del círculo descrito por el cubo y, por consiguiente, no podrá quedar rezagada con respecto a él. La fórmula para calcular la aceleración ceritrípeta W es la siguiente:

$$W = \frac{v^2}{R}$$

siendo v la velocidad circular y R el radio del camino que recorre el cubo. Como la aceleración de la gravedad en la superficie de la Tierra es g = 9,8 m/seg2, tendremos la desigualdad

$$\frac{v^2}{R} \geq 9.8$$

Si tomamos R igual a 70 cm,

$$\frac{v^2}{0.7} \geq 9.8$$

de donde

$$v \geq \sqrt{0.7 * 9.8} \Rightarrow v \geq 2.6 m / seg$$

No es difícil calcular que para obtener esta velocidad es necesario que la mano dé cerca de vuelta y media por segundo. Esta velocidad de giro es fácil de conseguir y, por consiguiente, el experimento se puede realizar sin dificultad.

La propiedad que tienen los líquidos de apretarse contra las paredes del recipiente que los contiene, cuando éste gira alrededor de un eje horizontal (o vertical), se emplea en la técnica de la fundición en la llamada colada centrífuga. Este procedimiento tiene la ventaja de que si el líquido no es homogéneo se distribuye por capas según los pesos específicos de sus partes componentes, con la particularidad de que las partes más pesadas ocupan los puntos más alejados del eje de rotación, mientras que las más ligeras se sitúan próximas a dicho eje. Esto hace que los gases que contiene el metal fundido (que suelen ocasionar las llamadas "sopladuras") son expulsados de dicho metal hacia el centro, es decir, hacia la parte hueca de la fundición. Las piezas de fundición fabricadas por este procedimiento son compactas y no presentan sopladuras. La fundición por colada centrífuga resulta más barata que la colada a presión y tiene la ventaja de que para ella no se necesitan máquinas complicadas.

En Lugar de Galileo

Para los aficionados a las sensaciones fuertes se suelen organizar diversiones especiales, como, por ejemplo, el llamado "columpio del diablo". Aquí reproducimos la descripción de este artificio que se da en el libro de entretenimientos científicos de Fedaut:

"El columpio va colgado a una sólida barra horizontal que atraviesa toda la habitación, a una altura determinada sobre el suelo. Cuando todos ocupan sus asientos, un empleado cierra la puerta de la habitación, quita la tabla que sirve de pasarela de 60 entrada, dice que el respetable público va a tener ahora ocasión de realizar un pequeño viaje aéreo y comienza a balancear ligeramente el columpio. Hecho esto, se monta en la parte posterior de este último, lo mismo que hacían los cocheros en el estribo trasero, o se marcha de la sala.

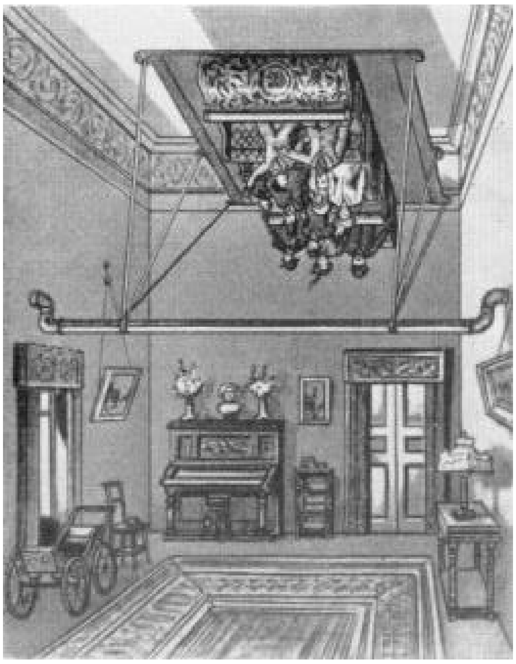

Fig. 34. Esto piensan los que se montan en el "columpio del diablo".

Entre tanto va aumentando el balanceo del columpio, éste llega hasta la altura de la barra, luego la sobrepasa cada vez más y finalmente describe un círculo completo. El movimiento se va acelerando de manera cada vez más sensible y las personas que se "columpian", aunque en la mayoría de los casos están advertidas, experimentan la sensación inconfundible del balanceo y del movimiento rápido; les parece que surcan el espacio cabeza abajo e instintivamente se agarran a los espaldares de los asientos para no caerse".

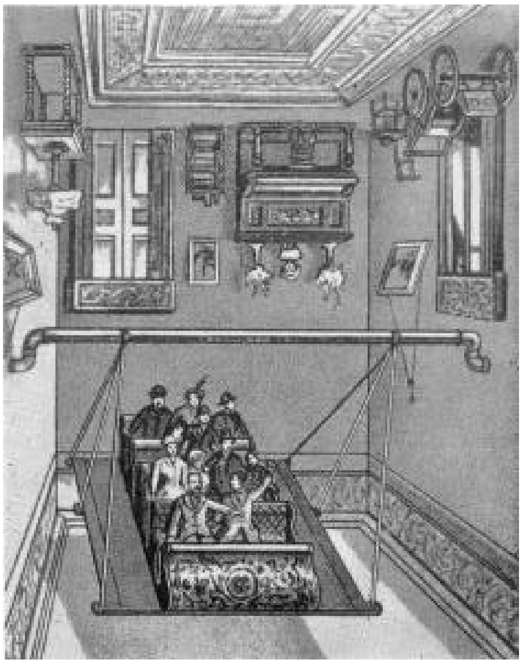

Fig. 35. Esto es lo que ocurre en realidad

"La amplitud del balanceo comienza a disminuir; el columpio no sube ya hasta la altura de la barra, y al cabo de unos segundos se para por completo".

"En realidad, durante todo este tiempo el columpio no se mueve de su sitio. Lo que se mueve es la habitación, que por medio de un mecanismo bastante simple gira alrededor del eje horizontal y de los espectadores. Los muebles que hay en la habitación están sujetos al suelo y a las paredes de la sala; la lámpara que hay en la mesa está soldada a ella, pero de forma que al parecer puede caerse fácilmente. Esta lámpara consiste en una bombillita eléctrica tapada por una gran pantalla. El empleado, que parecía que empezaba a balancear el columpio dándole ligeros empujones, en realidad no hacía más que acompasar sus movimientos con las oscilaciones de la sala y fingir que balanceaba el columpio. De esta forma toda esta instalación contribuye a que el engaño sea perfecto".

El secreto de esta ilusión, como puede verse, es tan simple que hace reír. No obstante, si después de conocer este secreto se encontrara el lector en el "columpio del diablo", caería también en el engaño. ¡Tan grande es la ilusión que produce!

A propósito de esto, nos acordamos de unos versos que dicen:

Un sabio de larga barba,[2]
Seguro de su opinión,
Que el movimiento no existe
Afirmó en una ocasión.
Otro sabio allí presente[3],
Palabra no respondió.

[2] Se refiere al filósofo griego Zenón de Elea (siglo V a de n. e.) que enseñaba que en el mundo todo es invariable y que el movimiento es una ilusión forjada por nuestros sentidos.

[3] Diógenes.

Pero a pasear se puso
Delante del anterior.
Réplica más convincente
A nadie se le ocurrió,
Y la gente, al alabarla,
Su ingenio reconoció.
Ahora recuerdo otro ejemplo,
Señores, ruego atención,
¿A caso sobre nosotros
no pasa a diario el Sol?
Claro está que nos, movemos,
¡Galileo tenía razón!

Entre los pasajeros del "columpio" que no conocieran el secreto, el lector sería una especie de Galileo, pero al revés, puesto que éste demostraba que el sol y las estrellas están fijas y que la Tierra y nosotros nos movemos, a pesar de todo lo que parece evidente, mientras que el lector pretendería demostrar que los que estamos fijos somos nosotros y que la habitación es la que se mueve en torno a nosotros. Y no está descartado que tuviera que sufrir la triste suerte de Galileo, es decir, que lo miraran como a quien discute ... cosas evidentes.

Mi Discusión con el Lector

Al lector no le sería tan fácil demostrar, como él seguramente piensa, que los razonamientos anteriores son justos. Supongamos que el lector se encuentra efectivamente en el "columpio del diablo" y que quiere convencer a sus vecinos de que están equivocados. Si uno de los vecinos soy yo, tendrá que discutir conmigo. Nos montamos en el "columpio", esperamos a que después de balancearse empiece a describir, aparentemente, circunferencias completas y empezamos a discutir sobre qué es lo que da vueltas, el columpio o la habitación. Pero ante todo, ruego al lector que tenga en cuenta que mientras dure la discusión no podremos abandonar el columpio; hay, pues, que prevenir todo lo que sea necesario y llevarlo consigo.

Lector. !Cómo es posible poner en duda que estamos quietos y que lo que gira es la habitación! Si nuestro columpio se pusiera de verdad quilla arriba, nosotros nos caeríamos, no nos íbamos a quedar colgados cabeza abajo. Pero como ve, no nos caemos. Por lo tanto lo que da vueltas es la habitación.

Yo. Sí. Pero recuerde usted que tampoco se derramaba el agua del cubo que daba vueltas rápidamente, a pesar de que también se ponía boca abajo. El ciclista del "rizo de la muerte" tampoco se cae cuando va cabeza abajo.

Lector. Si eso es así, vamos a calcular la 'aceleración centrípeta y veremos si efectivamente es suficiente para que no nos caigamos del columpio. Sabiendo a qué distancia nos encontramos del eje de rotación y el número de vueltas por segundo, podemos hallarla por la fórmula ...

Yo. No pierda usted el tiempo haciendo cálculos. Los constructores del "columpio del diablo", enterados de nuestra discusión, me advirtieron que el número de vueltas es más que suficiente para que el fenómeno se pueda explicar cómo yo digo. Por consiguiente, el cálculo no puede resolver nuestra polémica.

Lector. No obstante, tengo la esperanza de qué podré convencerle. Mire usted, el agua de este vaso no se derrama ... Sí, usted me va a recordar el experimento del cubo que da vueltas ... Bueno, pero vea, esta plomada que tengo en la mano siempre se dirige a nuestros pies, es decir, hacia abajo. Si nosotros diéramos vueltas y la habitación estuviera parada, la plomada se dirigiría al suelo, es decir, tensaría el hilo unas veces hacia nuestras cabezas, otras hacía nuestros costados...

Yo. Está usted en un error. Si giramos con suficiente velocidad, el peso de la plomada tira en la dirección del radio de giro y en sentido contrario al eje, es decir, hacia nuestros pies, como ahora ocurre.

Fin de la Discusión

Ahora permítame que la aconseje cómo se puede vencer en un debate como éste. Cuando se va al "columpio del diablo" hay que llevar consigo un dinamómetro (o peso de muelle), colgar en él una pesa cualquiera, por ejemplo, de 1 kg, y observar la señal que marca el índice. Este último indicará siempre un mismo peso, el correspondiente a la pesa colgada (en nuestro caso, 1 kg). Esta es precisamente la demostración de que el "columpio" no se mueve.

Si el "columpio" girase alrededor de un eje, sobre la pesa no sólo actuaría la gravedad, sino también el efecto centrífugo, el cual en los puntos inferiores del camino recorrido haría aumentar el peso de la pesa, mientras que en los superiores le haría disminuir ' es decir, nos daríamos cuenta de que la pesa se hace unas veces más pesada y otras casi ingrávida. Como esto no ocurre, está claro que lo que gira es la habitación y no nosotros.

En La Esfera "Encantada"

Un empresario norteamericano construyó, para divertir al público, un carrusel muy interesante e instructivo que tenía la forma de una habitación esférica giratoria. Dentro de esta habitación el público experimentaba sensaciones tan extraordinarias como las que suelen ocurrir en sueños o en los cuentos de hadas.

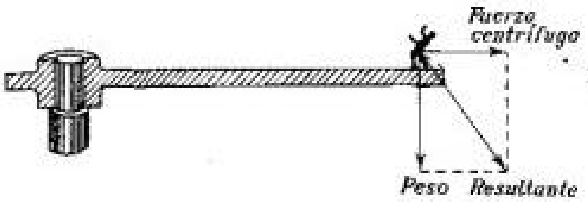

Fig. 37. Fuerzas que actúan sobre una persona que se encuentra en el borde de una plataforma giratoria.

Antes de entrar en detalles, recordemos el efecto que experimenta una persona cuando se encuentra en una plataforma redonda que gira de prisa. El movimiento giratorio tiende a lanzar la persona hacia fuera; cuanto más lejos esté del centro, con mayor fuerza se sentirá inclinada y arrastrada hacia fuera, Si cierra los ojos, le parecerá que no está de pie sobre un suelo plano, sino sobre una superficie inclinada en la que cuesta trabajo guardar el equilibrio. Esto se comprende fácilmente estudiando las fuerzas que actúan sobre esta persona (fig. 37). El efecto giratorio arrastra su cuerpo hacia fuera, al mismo tiempo que la gravedad tira de él hacia abajo. Estos dos movimientos se componen según la regla del paralelogramo y dan una resultante cuya acción está dirigida oblicuamente hacia abajo. Cuanto más rápida sea la rotación de la plataforma, tanto mayor será la resultante y tanto menor su inclinación.

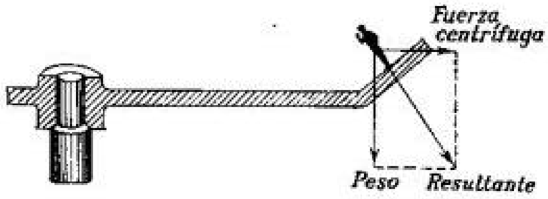

Fig. 38. Cuando la plataforma tiene el borde inclinado, la persona que se encuentra en él guarda el equilibrio perfectamente.

Pero supongamos que el borde de la plataforma está torcido hacia arriba y que nos encontramos de pie en esta parte inclinada (fig. 38). Cuando la plataforma esté inmóvil nos será difícil mantenernos en esta posición, puesto que nos deslizaremos hacia abajo o quizá nos caigamos. Ahora bien, si la plataforma gira, todo será muy distinto: a una velocidad determinada, la superficie nos parecerá horizontal, ya que la resultante de los dos movimientos que experimentamos también estará dirigida oblicuamente, es decir, formando un ángulo recto con el borde torcido de la plataforma.[4]

Si a la plataforma se le da una forma curva, calculada de manera que su superficie sea en cada punto perpendicular a la resultante, la persona que se encuentre en pie en esta superficie se sentirá en todos sus puntos como si estuviera sobre un plano horizontal. Los cálculos matemáticos realizados dan como resultado que esta superficie curva sería la de un cuerpo geométrico que se llama paraboloide. Esta superficie se puede obtener haciendo que un vaso, lleno de agua hasta la mitad, gire rápidamente alrededor de su eje; en estas condiciones, el agua asciende junto a las paredes del vaso, desciende en el centro y su superficie libre toma la forma de paraboloide.

Si en lugar de agua echamos en el vaso cera derretida y hacemos que gire hasta que ésta se enfríe, la superficie solidificada de la cera nos da la forma exacta del paraboloide. A una velocidad de rotación determinada, esta superficie tiene para los cuerpos pesados propiedades semejantes a las de una superficie horizontal fija, es decir, una bola colocada en cualquier parte de esta superficie no rueda hacia abajo, sino que permanece al mismo nivel (fig. 39).

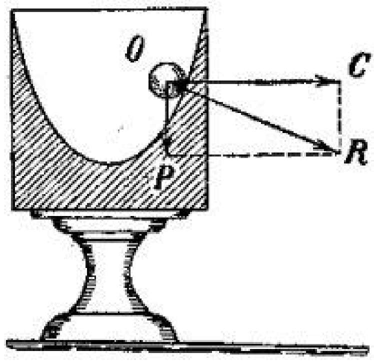

Fig. 39. Si se hace que esta copa gire con suficiente

[4] Esto mismo explica por qué en las curvas de ferrocarril la vía externa está más alta que la interna, por qué los velódromos tienen la pista inclinada hacia adentro y por qué los ciclistas y los motoristas profesionales pueden correr por entarimados circulares muy pendientes.

velocidad la bola no caerá al fondo.

Después de lo dicho se comprenderá sin dificultad en qué consiste la esfera "encantada". El fondo de esta esfera (fig. 40) es una gran plataforma giratoria cuya superficie tiene la forma de paraboloide. Aunque la rotación, producida por un mecanismo oculto, es extraordinariamente suave todas las personas que estuvieran en la plataforma sentirían mareos si no se movieran también las paredes. Para que nadie se pueda dar cuenta del movimiento, la plataforma giratoria se halla dentro de una gran esfera, de paredes opacas, que gira con la misma velocidad que ella.

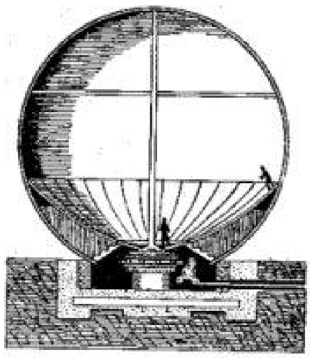

Fig. 40. La esfera "encantada" (corte)

Esta es, en pocas palabras, la estructura del carrusel llamado esfera "encantada". ¿Qué se siente cuando se está en la plataforma, dentro de la esfera? Mientras gira la plataforma, el suelo que hay debajo de los pies parece siempre horizontal, cualquiera que sea el punto de la curva en que nos encontremos, bien junto al eje (donde en realidad es horizontal), o bien junto a los bordes (donde la inclinación es de 45°). Los ojos ven perfectamente que el suelo es cóncavo, pero los músculos transmiten una sensación que atestigua que dicho suelo es plano. Las sensaciones que producen estos dos sentidos se contradicen entre sí categóricamente. Si desde un borde de la plataforma nos trasladamos al opuesto, nos parece que la enorme esfera se inclina hacia el lado contrario, influida por el peso de nuestro cuerpo, con la misma liviandad que si fuera una pompa de jabón, puesto que en cualquier punto nos sentimos como si estuviéramos en el plano horizontal. La posición oblicua de las demás personas que se encuentran en la plataforma nos parece extraordinariamente anormal: dan la sensación de personas que andan por las paredes lo mismo que las moscas (fig. 41).

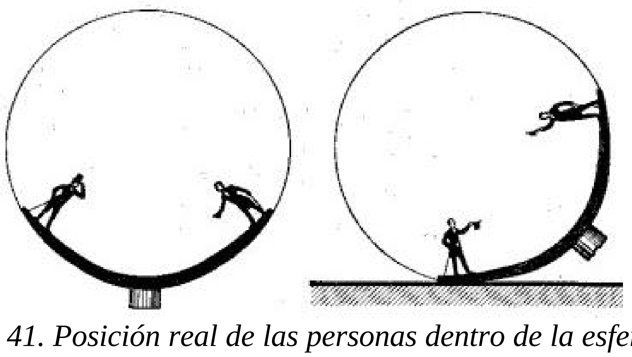

Fig. 41. Posición real de las personas dentro de la esfera

"encantada" (a la izquierda) y lo que cree cada una de ellas (a la derecha)

Si se derrama agua en el suelo de la esfera "encantada" se extiende por toda su superficie curva formando una capa uniforme. Pero a las personas les parece que delante de ellas tienen una pared líquida inclinada.

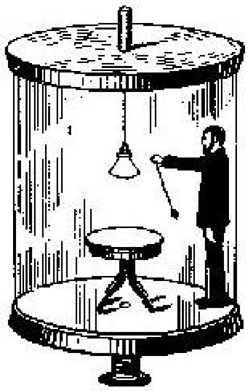

Fig. 42. Laboratorio giratorio. Posición real.

Dentro de esta esfera asombrosa parece que dejan de cumplirse las leyes de la gravedad, tal como las concebimos de ordinario, y que nos trasladamos a un mundo maravilloso.
Esta misma sensación la experimentan los pilotos cuando dan un viraje. Si vuelan a una velocidad de 200 km por hora siguiendo una curva cuyo radio sea igual a 500 m, les parece que la tierra se levanta y se inclina 16°.

Fig. 43. Laboratorio giratorio. Posición aparente.

En la ciudad alemana de Gotinga (o Göttingen) se construyó con fines de investigación científica un laboratorio giratorio. Este laboratorio (fig. 42) tenía la forma de una habitación cilíndrica de 3 m de diámetro y giraba con una velocidad de 50 revoluciones por segundo. Como el suelo era

plano, al girar producía en la persona que se encontraba junto a la pared la sensación de que la habitación se inclinaba hacia atrás y que ella estaba semirrecostada en la pared (fig. 43).
En el futuro, cuando en el cosmos aparezcan satélites-laboratorios de gran duración, habrá que hacer que giren, para de esta forma crear en ellos una gravedad artificial. Hoy día ya se hacen proyectos de satélites de este tipo.

UN TELESCOPIO LIQUIDO

La forma ideal del espejo del telescopio reflector es la parabólica, es decir, precisamente la forma que toma de por sí la superficie de un líquido cuando se hace girar alrededor de su eje el recipiente que lo contiene. Los constructores de telescopios emplean muchas horas de trabajo en darle al espejo una forma semejante a la antedicha. La fabricación del espejo de un telescopio dura años enteros. El físico norteamericano Wood soslayó estas dificultades haciendo un *espejo líquido.* Para esto hizo girar mercurio dentro de un recipiente ancho, con lo cual consiguió una superficie parabólica ideal que podía servir de espejo, puesto que el mercurio refleja los rayos de luz. El inconveniente de este telescopio es que cualquier impulso provoca ondulaciones en la superficie del espejo y, por consiguiente, se deforma la imagen. A pesar de que su sencillez es seductora, la idea del telescopio de mercurio de Wood no encontró aplicación práctica. Ni su propio autor, ni los físicos contemporáneos de este invento, tomaron en serio este aparato tan original. He aquí, por ejemplo, lo que después de ver el telescopio escribió Webster, director de la sección de Física de una de las universidades norteamericanas:

Tirilín, tirilán,
En un pozo está.
¿Qué cogió Wood de valija?
Mercurio en una vasija.
Y, ¿qué dio el experimento?
Casi nada, por supuesto.

EL "RIZO DE LA MUERTE"

Casi todos conocen el vertiginoso truco velosipédico que presentan a veces en los circos en el cual un ciclista entra en un rizo, de abajo arriba, y describe una circunferencia completa, a pesar de que la parte superior de esta circunferencia la recorre con la *cabeza hacia abajo.* En la arena del circo construyen generalmente una pista de madera en forma de rizo con una o más vueltas, como la que se puede ver en la fig. 44. El ciclista desciende por un plano inclinado, sube rápidamente por la pista circular, pasa la parte superior de esta pista con la cabeza para abajo y después de recorrer una circunferencia completa llega felizmente a tierra.[5]
El público suele creer que este truco es la cumbre del arte acrobático. Algunos espectadores se preocupan y preguntan: ¿qué fuerza misteriosa sostiene a este intrépido ciclista cabeza abajo? Otros, más incrédulos, sospechan que se trata de un engaño. Pero en esto no hay nada sobrenatural. Este truco se explica totalmente por las leyes de la Mecánica. Una bola de billar puesta a rodar por esta misma pista la recorrería hasta el fin con el mismo éxito que el ciclista. En los gabinetes de Física de las escuelas hay "rizos de la muerte" en miniatura.

[5] El "rizo de la muerte" es invención simultánea de dos artistas de circo. "Diablo" (Johnson) y "Mefisto" (Nuassetti). Se dio a conocer en el año 1902.

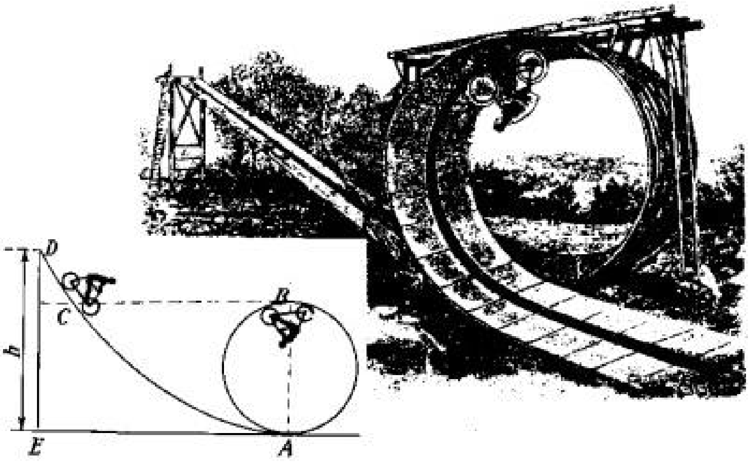

Fig. 44. El "rizo de la muerte". Abajo a la izquierda el esquema para el cálculo.

"Mefisto", el célebre inventor y ejecutor de este truco, antes de lanzarse él mismo a "rizar el rizo", probaba la solidez de la pista echando a rodar por ella una bola cuyo peso era igual al del artista con la bicicleta. Si la bola hacía el recorrido sin contratiempos, "Mefisto" se arriesgaba a ejecutar el truco.

El lector comprenderá, naturalmente, que este fenómeno se debe a la misma causa que explica el experimento del cubo giratorio (pág. 59). Para poder pasar felizmente la parte peligrosa del rizo, es decir, la parte superior, el ciclista debe llevar una velocidad suficientemente grande. Esta velocidad viene determinada por la altura desde la cual empieza a descender el artista. La velocidad mínima tolerable depende del radio del rizo. De aquí se deduce que para que el truco salga bien hay que calcular exactamente la altura desde la cual se lanza el ciclista, de lo contrario puede ocurrir una catástrofe.

LAS MATEMATICAS EN EL CIRCO

Yo sé que las fórmulas "secas" repelen a los aficionados a la Física. Pero si renuncian a conocer el lado matemático de los fenómenos, estos enemigos de las ciencias exactas se verán privados de la posibilidad de prever el desarrollo de los fenómenos y de determinar las condiciones en que deben realizarse. En nuestro caso concreto, por ejemplo, dos o tres fórmulas son suficientes para determinar exactamente las condiciones necesarias para que se realice con éxito un truco tan sorprendente como el de recorrer el "rizo de la muerte".

Hagamos, pues, los cálculos.

Designemos con letras aquellas magnitudes que intervienen en dicho cálculo:

llamemos h a la *altura* desde la cual se lanza el ciclista; designemos por x la parte de la altura h que sobrepasa del punto más alto del "rizo"; según la fig. 44, $x = h - AB$;

r representará al radio de la circunferencia del rizo;

m designará la *masa* total del ciclista y la bicicleta; el peso conjunto estará expresado por mg, siendo g *la aceleración de la gravedad,* que como sabemos es igual a 9,8 m por segundo cada segundo;

la letra v será la *velocidad* del ciclista en el momento de llegar al punto más alto de la circunferencia.

Todas estas magnitudes pueden relacionarse entre sí por medio de dos ecuaciones. En primer lugar, sabemos por la Mecánica que la velocidad que adquiere el ciclista en el momento que, descendiendo por el plano inclinado, llega al punto C (que se encuentra al nivel de B, como puede verse en la parte inferior de la fig. 44) es igual a la que tendrá en la parte superior del rizo, es decir, en el punto B. La primera de estas velocidades viene expresada por la fórmula[6]

$$v = \sqrt{2gh}$$

o

$$v = \sqrt{2gh}$$

Por consiguiente, la velocidad del ciclista en el punto B será igual a $v = \sqrt{2gh}$, es decir, $v = \sqrt{2gh}$. Pero para que el ciclista no se caiga al llegar al punto más alto de la curva hace falta (véase "La anulación de la gravedad") que la aceleración centrípeta que produzca sea mayor que la aceleración de la gravedad, es decir, hace falta que $\frac{v^2}{r} > g$ o $v^2 > gr$. Pero como ya sabemos que $v^2=2gx$, tendremos que $2gx>gr$, *o* $x>r/2$.

De esta forma ya sabemos que para que este truco se pueda ejecutar con éxito hay que construir el "rizo" de tal forma que el vértice de la parte inclinada de la pista esté 1/2 radio más alto que el punto superior de la circunferencia. La inclinación de la pista no desempeña ningún papel, lo que importa es que el punto desde el cual comienza a descender el ciclista se encuentre como mínimo 1/4 de diámetro más alto que la cumbre del rizo. En este cálculo no hemos tenido en cuenta el rozamiento de la bicicleta y hemos considerado que la velocidad en el punto C es igual a la velocidad en el punto B. Por esto no es conveniente alargar demasiado la bajada, haciéndola más suave. Cuando el descenso es suave, el rozamiento hace que la velocidad del ciclista al llegar al punto B sea menor que la que tenía en C. Si, por ejemplo, el rizo tiene 16 m de diámetro, el artista debe lanzarse desde una altura de 20 m por lo menos. Si esta condición no se cumple, no hay arte que le ayude a "rizar el rizo"; antes de llegar al punto más alto se caerá.

Cuando realiza este truco la bicicleta va sin cadena. El ciclista confía su máquina a la acción de la gravedad, puesto que ni puede ni debe acelerar ni frenar su movimiento. Todo su arte consiste en mantenerse en el centro de la pista de madera. La menor desviación representa un peligro inminente de salir despedido hacia un lado. La velocidad de la carrera por el interior de la circunferencia es muy grande. Suponiendo que el diámetro de ésta sea igual a 16 m, el ciclista dará la vuelta en 3 segundos. Esto representa una velocidad de... ¡60 km por hora! A esta velocidad no es fácil guiar una bicicleta. Pero esto es precisamente lo que no hace falta. Hay que ser decidido y confiarse a las leyes de la Mecánica. "El truco de la bicicleta no es peligroso de por sí - leemos en un folleto escrito por un profesional -, cuando el aparato está bien calculado y su construcción es sólida. El peligro está en el propio artista. Si le tiembla una mano, se pone nervioso, pierde el control sobre sí mismo o se marea inesperadamente, todo puede esperarse".

En esta misma ley se basa el "rizo de Nésterov" o "looping" y otras figuras de alto pilotaje. Para hacer el "rizo" tiene una importancia primordial tomar buena "carrera" por la curva y mandar diestramente el avión.

FALTA DE PESO

Un bromista dijo una vez que sabía un procedimiento de ahorrar en el peso sin engañar a los clientes. El secreto estaba en comprar las mercancías en países próximos al ecuador y venderlas lo más próximo posible a los polos. Ya hace mucho tiempo que sabemos que cerca del ecuador

[6] Despreciamos la energía de rotación de las llantas de las ruedas de la bicicleta; este factor influye muy poco en el resultado del cálculo.

las cosas pesan menos que junto a los polos; 1 kg trasladado desde el ecuador a un polo aumenta en peso 5 g. Claro que para que esta diferencia se note hay que pesarlo en una báscula de resorte hecha (o graduada) en el ecuador, de lo contrario no hay ganancia; porque si las mercancías se hacen más pesadas, lo mismo le ocurre a las pesas.

No creo que nadie se pueda hacer rico comerciando por este procedimiento, pero el bromista tenía razón: la gravedad aumenta realmente al alejarse del ecuador. Esto ocurre porque los cuerpos que están en el ecuador describen las mayores circunferencias al girar la Tierra y también porque la esfera terrestre está más hinchada en el ecuador.

La parte más importante de la pérdida de peso se debe a la rotación de la Tierra. Esta rotación hace que el peso de los cuerpos en el ecuador disminuya, en comparación con el que tienen en los polos, en una fracción igual al 1/290.

Cuando los cuerpos que se trasladan de una latitud a otra son ligeros, la diferencia de peso es insignificante. Pero si se trata de objetos pesados puede alcanzar valores bastante considerables. Nadie sospecha, por ejemplo, que una locomotora que pesa en Moscú 60 t, al llegar a Arcángel resulta 60 kg más pesada, y si va a Odesa, 50 kg más ligera. En un tiempo, desde la isla de Spitzberg se transportaban anualmente a puertos más meridionales cerca de 300.000 t de carbón. Si esta cantidad hubiera sido transportada a un país ecuatorial y pesada en básculas de resorte traídas de Spitzberg, se habría notado una falta de carbón de 1.200 t. Un acorazado que pese en Arcángel 20.000 t, cuando navegue por aguas ecuatoriales será 80 t más ligero; pero esto no se nota, porque todos los demás cuerpos también se hacen más ligeros, sin excluir, naturalmente, el agua del mar[7].

Si la Tierra girara alrededor de su eje más de prisa que ahora, por ejemplo, si los días en vez de tener 24 horas tuvieran 4, la diferencia de pesos de los cuerpos en los polos y en el ecuador sería mucho más sensible. Con días de cuatro horas, por ejemplo, una pesa de 1 kg en el polo pesaría en el ecuador 875 g nada más. Así son las condiciones de gravedad que existen en Saturno. En este planeta los cuerpos que se encuentran en los polos pesan 1/6 parte más que en el ecuador.

Como la aceleración centrípeta aumenta proporcionalmente al cuadrado de la velocidad, no es difícil calcular a qué velocidad de rotación se hará 290 veces mayor en el ecuador, es decir, a qué velocidad se hará igual a la fuerza de atracción. Esto sucedería si la Tierra girase 17 veces más de prisa que en la actualidad (17 *17 = aproximadamente a 290). En estas condiciones los cuerpos dejarían de ejercer presión sobre los sitios en que se apoyan. En otras palabras, si la Tierra girara 17 veces más de prisa, las cosas que estuvieran en el ecuador... *¡no pesarían nada!*

En Saturno pasaría lo mismo si su velocidad de rotación aumentara dos veces y media nada más.

De lo expuesto se deduce que el lanzamiento de los satélites artificiales es preferible hacerlo desde regiones ecuatoriales y en dirección oeste - este. Para lanzar satélites cuyas órbitas formen ángulos grandes con el ecuador hay que gastar mucha más energía. Precisamente por esto los primeros satélites norteamericanos volaban solamente sobre las regiones ecuatoriales, ya que los cohetes portadores de que disponían eran poco potentes y no servían para ponerlos en órbitas más inclinadas con respecto al ecuador.

[7] Por esto en las aguas ecuatoriales el barco se hundirá hasta la misma profundidad que en las polares, porque aunque él se hace más ligero, al agua que desaloja le ocurre lo mismo.