

Juguetes en clases y demostraciones de física

J Güémez

Departamento de Física Aplicada,
Universidad de Cantabria, Santander, España

C Fiolhais y M Fiolhais

Departamento de Física y Centro de Física Computacional,
Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal

Abril 5, 2010

Resumen

Los juguetes se han utilizado habitualmente en Física como materiales pedagógicos. Los juguetes son útiles, tanto en el desarrollo de las clases y de las conferencias sobre Física, como para motivar el interés de los alumnos sobre esta materia. Son también dispositivos muy interesantes desde un punto de vista científico y pueden utilizarse para desarrollar proyectos de investigación con los alumnos. Sin embargo, en algunos juguetes la física subyacente puede llegar a ser tan compleja para ciertas audiencias que se desaconseja su uso en tales situaciones.

Un breve repaso de la literatura pedagógica [1] permite comprobar que los juguetes han sido ampliamente utilizados para explicar Física a todo tipo de auditorios, tanto en clases magistrales, de bachillerato [2] o de universidad [3], como en conferencias de divulgación para el público en general [4]. Juguetes tales como el tentetieso [5] (Fig. 1–(i)) o la lámpara de plasma [6] (Fig. 1–(d)) proporcionan un modo divertido de enseñar física a audiencias muy diversas [7]. Sin embargo, la explicación del funcionamiento de ciertos juguetes puede llegar a ser complicada, por lo que el docente que quiera utilizar juguetes en sus clases debe conocer bien la física subyacente a los mismos si quiere contestar con convicción y soltura a las preguntas de la audiencia [8]. Con determinado público, aquel con poca formación en física, es recomendable no utilizar juguetes que pudieran fomentar la confusión al ser demasiado complejos para la audiencia.

Las peonzas, de todo tipo, se encuentran entre los juguetes más antiguos y ya fueron utilizadas por los antiguos romanos. Hay una amplísima variedad de las mismas (Fig. 2). La peonza más característica, un cono invertido terminado habitualmente en una punta metálica, gira con elegancia. Para ello, debe estar perfectamente torneada. La estabilidad de su rotación vertical (o casi vertical) se explica

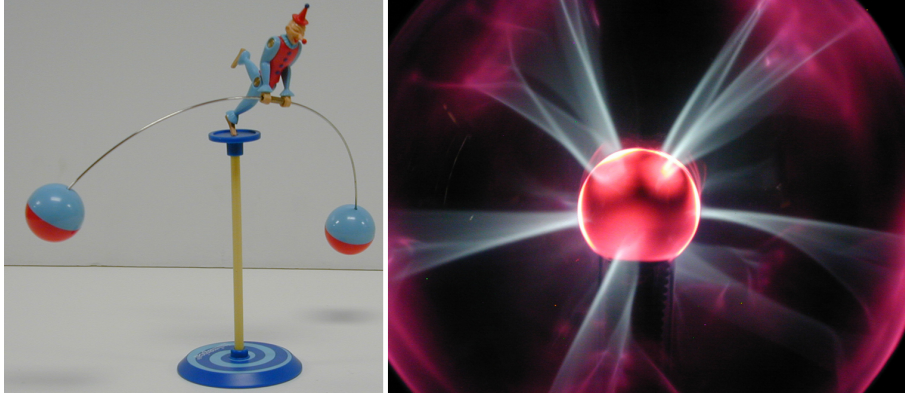


Figura 1: (i) *Tentetieso*. Sus contrapesos laterales consiguen que su centro de gravedad se sitúe por debajo de su punto de apoyo en la peana, proporcionándole la estabilidad que exhibe. (d) *Lámpara de plasma*. Conteniendo un gas a baja presión, en su centro se encuentra una bobina de Tesla capaz de generar altas tensiones, produciendo la ruptura dieléctrica del gas y la visualización del recorrido de los electrones.

mediante las leyes de conservación del momento angular y de la energía mecánica. El giróscopo, otro tipo de peonza, fue inventado por Léon Foucault (1819-1868). La rotación en equilibrio de un giróscopo sobre un soporte estrecho es espectacular, todavía más si el eje del giróscopo se sujeta del extremo de una cuerda vertical y éste precesa mientras gira [9]. Aunque resulta bastante sencillo hacer girar estos objetos, así como dar una primera explicación de su movimiento, las ecuaciones que gobiernan el movimiento de una peonza o un giróscopo son complejas y sólo pueden ser abordadas a nivel universitario [10].

Muchos dispositivos que giran presentan comportamientos contrarios a la intuición física. Uno de los más espectaculares es el *tip-top* (o *tippe-top*) (Fig. 3), que se presenta en varios modelos [11]. Esta peonza, similar a un champiñón cerrado, tiene forma de esfera a la que se le ha retirado el casquete superior, y a la que se le ha colocado un vástago para hacerla girar. Cuando esta peonza rota sobre su base esférica, el eje de simetría comienza a inclinarse hasta que, en un salto brusco, la peonza se invierte y comienza a girar, más lentamente, sobre el vástago [12]. Un comportamiento muy similar se observa en la rotación de un huevo cocido. Cuando a un huevo cocido se le hace girar a partir de su posición de equilibrio estable (es decir, reposando en horizontal), éste eleva su centro de gravedad y gira, más lentamente, alrededor de su eje de simetría. Parte de la energía cinética de rotación inicial se emplea en aumentar su energía potencial, produciendo un giro final más lento. Una primera explicación de este comportamiento del huevo, o del *tip-top*, es matemáticamente compleja: su rotación es estable sólo alrededor de su eje de simetría, del que se separa debido al rozamiento cuando gira en horizontal o cuando el *tip-top* lo hace sobre su base redondeada. Un huevo crudo no presenta



Figura 2: (i) *Peonza de madera*. Fabricada en una sola pieza, mientras permanece en rotación su centro de gravedad se encuentra por encima de la posición que ocuparía si se encontrase en reposo. (d) *Peonza india*. Formada por varias piezas, el cuerpo esférico móvil superior gira alrededor de un eje central.

este comportamiento debido al líquido en su interior, lo que sirve para distinguir fácilmente un huevo cocido de otro crudo [13]. Aprovechando el Principio de Inercia, se puede también distinguir un huevo cocido de otro crudo. Si sobre un huevo que está girando, no muy deprisa, se coloca suavemente un dedo y se le detiene por un breve instante, al levantar el dedo, el huevo crudo continuará girando, mientras que el cocido se detendrá por completo.

Una curiosa peonza, también con líquido en su interior, consta de varias piezas, con una carcasa exterior y un depósito interior, medio lleno de agua coloreada, que puede girar (Fig. 4). Cuando toda ella se hace girar, el agua se sitúa en la parte del depósito más alejada del eje de rotación. Si durante el giro la peonza se detiene, fijando la carcasa, el depósito y el líquido continúan girando por inercia, de tal forma que al volver a dejar libre la carcasa, toda la peonza vuelve a girar. Un ejercicio pedagógico interesante consiste en relacionar el comportamiento de un huevo cocido con la evolución del *tip-top* y la rotación del huevo crudo con el comportamiento de la peonza de agua. Por ejemplo, tanto en la peonza líquida como en el huevo crudo la inercia de reposo hace que se resistan a ser puestas en movimiento y la inercia del movimiento hace que una vez girando se resistan a detenerse.

También sorprendente es el comportamiento del *rattleback* o piedra celta (Fig. 5), una peonza alargada con forma de barca [14]. Cuando se hace descender uno de sus extremos, con la peonza en reposo, y se deja libre, la peonza siempre gira en el mismo sentido anti-horario. Cuando a esta estructura se le aplica un par de fuerzas para que gire en sentido horario, al cabo de poco tiempo comienza a cabecear y pronto gira en sentido anti-horario. Una inspección más detallada permite observar que su estructura no es simétrica respecto del eje longitudinal, lo que hace que

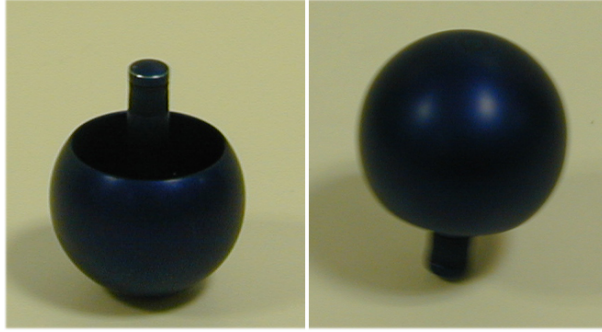


Figura 3: *Tip-Top*. Cuando esta peonza se ha invertido y gira sobre su vástago, la velocidad de rotación es menor que la velocidad de rotación cuando gira sobre la base esférica, pues al elevar su centro de gravedad parte de la energía cinética de rotación se ha invertido en energía potencial gravitatoria.



Figura 4: *Peonza de agua*. Al girar, el agua del depósito interior se desplaza hacia las paredes más alejadas del eje de giro. Si se detiene la carcasa exterior, el depósito interior y el agua continúan girando. Si poco después se libera la peonza, la carcasa vuelve a girar.

al girar en sentido horario su centro de gravedad ascienda lentamente hasta que la peonza se detiene. Al descender el centro de gravedad, su asimetría la hace girar espontáneamente en sentido anti-horario. Fueron arqueólogos que investigaban tumbas celtas y egipcias durante el siglo XIX los primeros que describieron el extraño comportamiento de estas piedras. Aunque el comportamiento del *rattleback* siempre sorprende, la explicación de su funcionamiento exige conocimientos avanzados de física [15].

La peonza que levita magnéticamente, el Levitron (Fig. 6) (patentado en 1983 por Roy Harrigan), consiste en una pequeña peonza y una base amplia con potentes imanes ocultos en ella. Haciendo girar la peonza y colocándola con cuidado a pocos centímetros sobre la base, ésta permanecerá girando y flotando durante mucho tiempo. El rozamiento con el aire va reduciendo gradualmente su velocidad angular hasta que, al cabo de algún tiempo, su equilibrio se hace inestable y la peonza cae.



Figura 5: *Rattleback*. Este tipo de piedras celtas transforman el movimiento de rotación en sentido horario en una elevación del centro de gravedad, gracias a su base asimétrica, para volverlo a transformar, al descender, en un giro anti-horario.



Figura 6: *Levitron* (cortesía de ThinkGeek, www.thinkgeek.com). Una pequeña peonza, bien equilibrada mediante pequeñas arandelas, se estabiliza por rotación y levita sobre el campo magnético complejo creado por una particular disposición de imanes ocultos en la base del aparato.

Diferentes tipos de péndulos – incluyendo los tentetiesos, que son ejemplos de péndulos físicos – son otro conjunto interesante de juguetes. Un juguete basado en la transformación de energía potencial gravitatoria en energía cinética, y a la inversa, mediante choques (casi) elásticos es la cuna de Newton (Fig. 7)[Isaac Newton (1643-1727)] [16]. Varias bolas metálicas suspendidas mediante una suspensión bifilar, con sus centros perfectamente alineados, chocan siguiendo (muy aproximadamente) las leyes de conservación del momento lineal y de conservación de la energía mecánica [17]. Estos choques casi elásticos se producen debido a que las fuerzas recuperadoras de las deformaciones de las esferas no siguen la ley lineal de Hooke [18] sino una ley de potencia $3/2$.

El *slinky* (Fig. 8) es un muelle grande capaz de descender escalones si su condición inicial es la adecuada [19]. Este versátil muelle, particularmente indicado para explicar la ley de Hooke [20], es muy útil en demostraciones relativas a ondas esta-

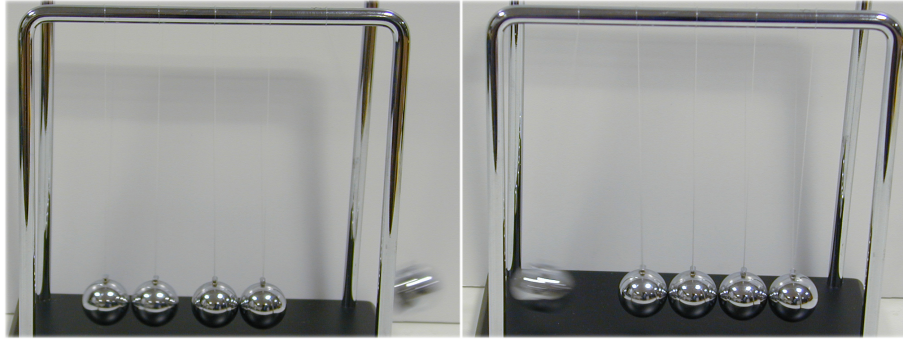


Figura 7: *Cuna de Newton*. Fue inventada por Willen J Gravesande (1688-1742) para estudiar la física de los choques. Las leyes de conservación del momento lineal y de conservación de la energía mecánica, implican que si una, dos, tres, etc., bolas son separadas hasta una cierta altura y luego dejadas caer, una, dos, tres, etc., bolas, respectivamente, serán desplazadas del otro lado de la cuna.



Figura 8: *Slinky*. Se trata de un muelle grande, muy versátil para ser utilizado en todo tipo de experimentos de oscilaciones y ondas.

cionarias, tanto transversales, con el muelle en horizontal y liberando varios anillos previamente agrupados, como longitudinales, fijando un extremo y moviendo a derecha e izquierda el otro [21].

Los juguetes que utilizan globos de caucho merecen una consideración especial, pues la energía elástica acumulada en el caucho deformado se libera presentando comportamientos curiosos. Muchos de estos juguetes, por ejemplo, el coche (Fig. 9–(i)) o el helicóptero (Fig. 9–(d)), son muy útiles para ilustrar la Tercera Ley de Newton [22]. En el caso del helicóptero, esta ley se ilustra de dos formas, una en la rotación, con el tubo con codo que desvía el flujo de aire, y otra en su elevación, con sus alas inclinadas golpeando el aire y lanzándolo hacia abajo. En ambos casos se tiene que los vehículos se mueven más lentamente, aunque alcanzando mayor distancia o altura, si el globo está muy hinchado que si está poco hinchado. Este comportamiento se debe a que la presión del aire en el interior de un globo es mayor



Figura 9: (i) *Coche movido por globo*. Vehículo movido por un globo hinchado unido a él que se deshinch a través de un orificio. (d) *Helicóptero de globo*. El giro del helicóptero es producido por el globo al deshincharse a través de un distribuidor que envía el aire a través de sus alas, con contienen un tubo hueco con un codo. Para permitirle ascender, sus alas tienen una cierta inclinación respecto de la horizontal.

cuando el globo está poco hinchado que cuando está más hinchado (¡exige más esfuerzo pulmonar hinch a un globo deshinchado que uno ya hinchado!). Esta circunstancia se puede comprobar conectando un globo poco hinchado y uno hinchado y observar que el menos hinchado se deshinch a [23]. El cohete de agua, también movido por aire a presión, tiene una física más compleja, con la Segunda Ley de Newton aplicada a un sistema de masa variable [24], pero su comportamiento es semejante al de los anteriores [25].

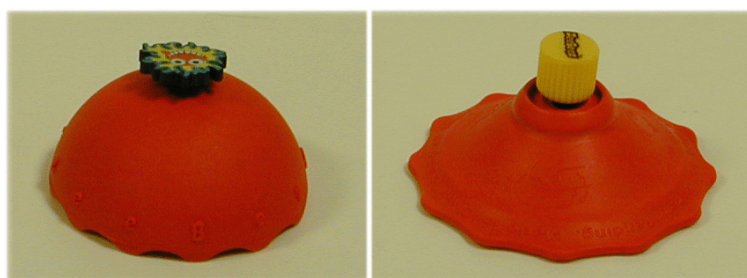


Figura 10: *Resorte de caucho*. Se trata de una cúpula hueca de caucho que permanece deformada si se la invierte. (i) En su posición normal. (d) Preparado para liberar la energía elástica y elevarse en vertical al ser dejado caer, haciéndole girar con la ayuda de la manilla, y chocar contra el suelo.

El resorte de caucho (Fig. 10) [26], es una semiesfera de paredes gruesas de caucho capaz de acumular energía elástica cuando se la deforma dándola la vuelta. En algunos tipos de resortes de caucho, si éste se deposita sobre una mesa, al cabo de un cierto tiempo recupera su forma original, ejerciendo una fuerza sobre la mesa. En otros tipos, el resorte se debe dejar caer desde una cierta altura y al chocar

contra el suelo, recupera su forma original y se eleva. De acuerdo con la Tercera Ley de Newton el suelo, o la mesa, ejerce una fuerza igual sobre el resorte de caucho que hace que éste alcance una altura mayor de la inicial.

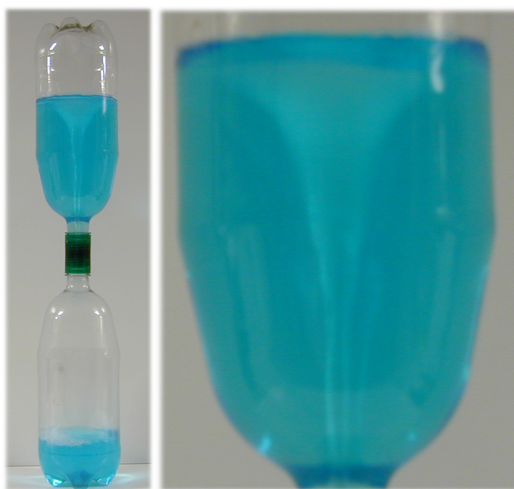


Figura 11: *Tornado en una botella*. Un tapón de doble rosca permite unir dos botellas, una de ellas casi llena de agua. Con el agua en la botella superior, al proporcionarle un movimiento de rotación, se forma un tornado y el agua comienza a descender por las paredes de la botella y el aire a ascender por el ojo del tornado.

Los juguetes en los que intervienen fluidos forman una categoría aparte por derecho propio. Un juguete muy interesante en el que interviene un fluido es el tornado en botella (Fig. 11). Éste consta de dos botellas unidas por un tapón agujereado de doble rosca. En su estado inicial el agua se encuentra en la botella superior. Pero en esta posición el agua no consigue descender debido a que al pasar agua de la botella superior a la inferior disminuye la presión del aire en dicha botella superior y la mayor presión del aire en la botella inferior hace que cese el flujo de agua. Imprimiendo un ligero giro al conjunto, se produce un torbellino que hace que el agua descienda por las paredes y que el aire ascienda por el ojo del tornado [27].

Los juguetes que de una u otra manera flotan, es decir, aquellos basados en el Principio de Arquímedes, parecen sencillos a primera vista, pero presentan a menudo comportamientos poco intuitivos, con una física compleja. El ludión, compartiendo la raíz de lúdico, o *buzo de Descartes* (Fig. 12), así denominado por René Descartes (1596-1650), es un buen ejemplo de dicha complejidad [28]. El buzo, en ocasiones una figurita de vidrio, hueca y con un capilar que permite la entrada y salida del agua, tiene atrapada en su interior una burbuja de aire, lo que le permite flotar en el interior de una botella cerrada y de paredes flexibles o de un cilindro de vidrio casi lleno de agua y cerrado por un tapón. Cuando la botella se comprime y la presión aumenta, el volumen de la burbuja disminuye, debido a la ley de Boyle, y el empuje

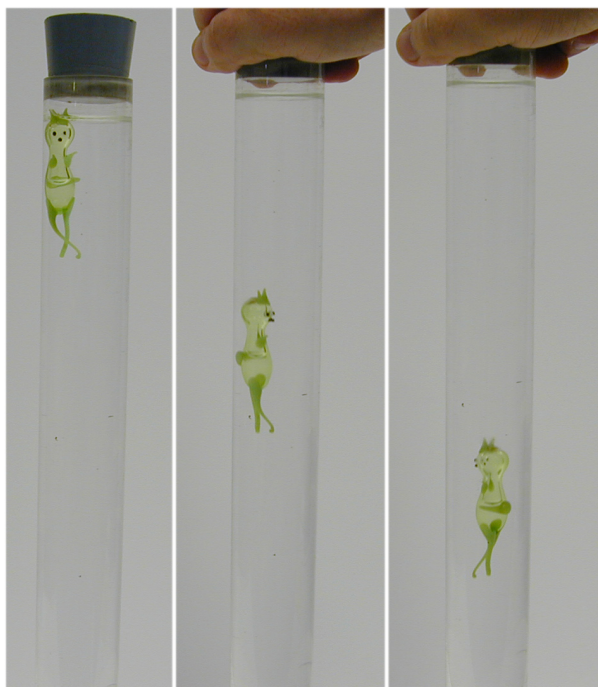


Figura 12: *Ludió*. La figurita con forma de diablillo, está dotada de un tubo capilar, en la cola del diablillo, y con una burbuja de aire atrapada en su interior, flota en el agua. Al apretar el tapón que cierra la probeta, el ludió termina por descender por debajo del nivel del líquido, alcanzando el fondo de ésta.

de Arquímedes sobre el ludió disminuye. Cuando éste empuje no consiga igualar el peso del buzo, éste se hundirá, en un comportamiento global que se describe matemáticamente como una *catástrofe en pliegue* [29].

La lámpara de lava, inventada por Edward C. Walker hacia 1960, es otro tipo de juguete basado en el comportamiento de los fluidos, en este caso, dos fluidos inmiscibles (Fig. 13–(i)). La cera coloreada, que se encuentra inicialmente en el fondo del recipiente, es más densa a temperatura ambiente que la mezcla transparente de alcohol isopropílico y agua que contiene la lámpara, por lo que se sitúa en el fondo. Al encender la lámpara incandescente oculta en la base, la cera aumenta su temperatura, con ayuda de una pieza metálica con forma de espiral situada entre la cera, se vuelve menos densa que el líquido situado encima, y comienza a ascender. La tensión superficial hace que las porciones flotantes de cera adopten formas esféricas. Al alcanzar la parte superior del recipiente la cera se enfría y desciende. Para que la lámpara funcione correctamente tanto las densidades de los líquidos como la potencia de la bombilla deben ser ajustadas con precisión.

El termómetro de Galileo [30], que recibe su nombre del físico italiano Galileo Galilei (1564-1642), puede considerarse como una variante del buzo de Descartes. En



Figura 13: (i) *Lámpara de lava*. Los glóbulos de cera caliente ascienden cuando su densidad se hace menor que la del líquido superior. (d) *Termómetro de Galileo*. Bolas cerradas y semillenas de líquido flotan o hunden en función de la temperatura del líquido que las contiene.

este caso, las esferas semillenas de líquido se encuentran cerradas y es la temperatura la magnitud física que controla la flotación o hundimiento de las mismas a través de la variación de la densidad del líquido y del correspondiente empuje de Arquímedes (Fig. 13–(d)). En este termómetro la temperatura ambiente viene indicada por la esfera, provista de una chapita con un número, que, todavía flotando, se encuentre en la posición más baja. Si la temperatura del líquido aumenta un par de grados, la densidad del mismo disminuye lo suficiente como para que el empuje de Arquímedes no consiga igualar el peso de la esfera, haciendo que ésta descienda y pasando la siguiente esfera a indicar la temperatura.

Otro ejemplo de juguete basado en el curioso comportamiento de los fluidos es la bola flotante (Fig. 14). En su versión más sencilla, una pipa de madera, con aberturas en su cazoleta, contiene una bola de corcho blanco. Cuando se sopla, la bola permanece suspendida en el aire, incluso cuando la cazoleta de la pipa se inclina ligeramente a un lado, con la bola siguiendo la trayectoria del aire. Sin embargo, si las aberturas se cierran con papel de celo, al soplar la bola no se mueve, incluso aunque, manteniendo el soplido, la pipa se invierta y termine boca abajo. En esta posición la bola cae justo cuando al dejar de soplar cesa el flujo de aire. La expli-

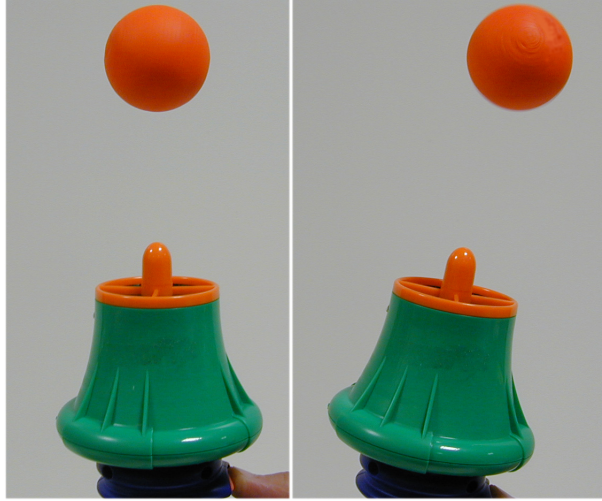


Figura 14: *Bola flotante en flujo de aire*. Una esfera ligera, pintada de color naranja, flota en el flujo de aire producido por un ventilador dotado de rejilla. Si el eje del flujo de aire se inclina, la bola se separa de la vertical y sigue al flujo de aire hasta que, para un cierto ángulo de inclinación, la bola cae en vertical. Este comportamiento brusco se puede describir también como una *catástrofe en plieque*.

cación de la estabilidad vertical de la bola se lleva a cabo en términos del Teorema de Bernoulli, mientras que la estabilidad de la bola inclinada se hace en términos del *efecto Coanda* [31], aunque no sin polémica. Una explicación física detallada sólo se puede hacer en un contexto universitario [32].

Aquellos juguetes que transforman el calor en energía mecánica constituyen la contrapartida de los juguetes mecánicos anteriormente mencionados, peonzas, cuna de Newton, muelles, etc., que la disipan. En este sentido, tanto la lámpara de lava como el termómetro de Galileo se pueden considerar máquinas térmicas, aunque no hayan sido diseñadas con ese propósito.

El molinete térmico (Fig. 15) es un dispositivo, con componentes comunes al tetieso, su estabilidad, y al helicóptero, la inclinación de sus álabes, que se comporta como una máquina térmica que transforma, gracias a la diferencia de temperaturas entre la de una llama y la del entorno, el calor producido por unas velas encendidas en un movimiento de rotación.

El balancín térmico es otro juguete que se comporta como máquina térmica (Fig. 16). Su secreto para oscilar mientras se aleja y se acerca a una llama, es la espiral bimetalica [33] que al calentarse y enfriarse proporciona los pares de fuerzas capaces de hacerlo oscilar [34]. Al calentar la espiral, debido a la diferencia en el coeficiente de dilatación de sus metales componentes, se produce un par de fuerzas que hace que una esfera de madera situada al final de una barra se vaya desplazando. Cuando

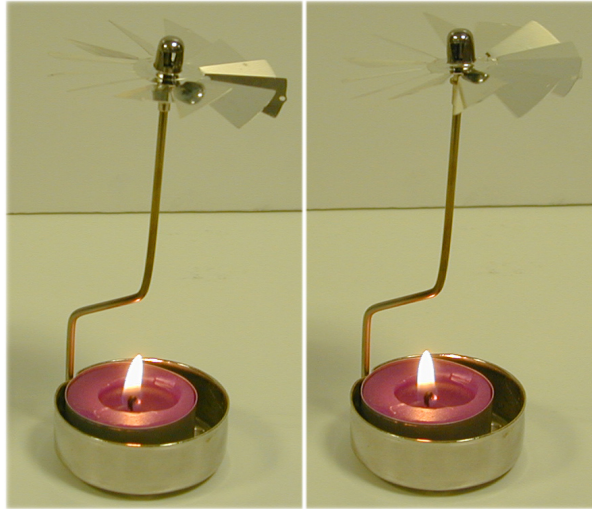


Figura 15: *Molinete térmico*. Apoyado sobre una punta, el aire caliente ascendente golpea sus álabes, cuya inclinación respecto de la vertical permite que, por reacción, se produzca el par de fuerzas que hace girar lo hace girar.

el desplazamiento de la esfera hace que el centro de gravedad del sistema alcance una posición inestable, el balancín bascula y se aleja de la llama. La espiral se enfría entonces, la esfera se desplaza en sentido contrario, y al volver a bascular el balancín la espiral vuelve a situarse sobre la llama, completándose el ciclo. Como en todas las máquinas térmicas se necesita tanto un foco caliente a temperatura alta como un foco frío a temperatura baja, pues sin el enfriamiento del muelle el ciclo no se completa. Igualmente, de acuerdo con el Segundo Principio de la Termodinámica, parte de la energía proporcionada a la espiral en forma de calor no se transforma en trabajo sino que se disipa en el entorno.

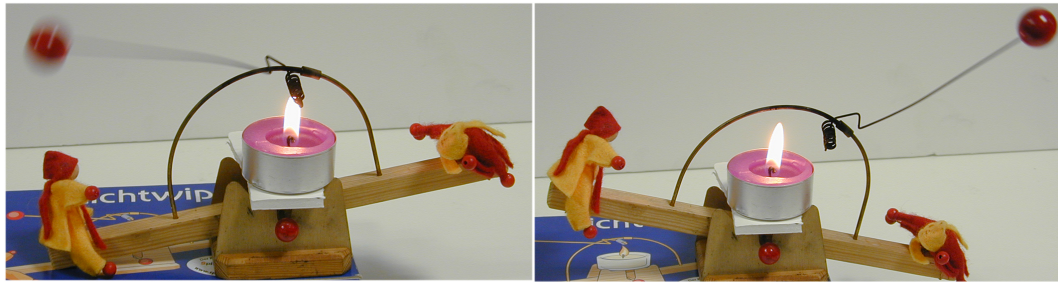


Figura 16: *Balancín térmico*. Con la espiral bimetálica situada sobre la llama, la esfera se desplaza hacia la derecha, haciendo girar el balancín y separando la espiral de la llama. Al enfriarse la espiral, la esfera de madera se desplaza hacia la izquierda, el balancín oscila hacia la izquierda y el muelle vuelve a situarse sobre la llama, cerrándose el ciclo.

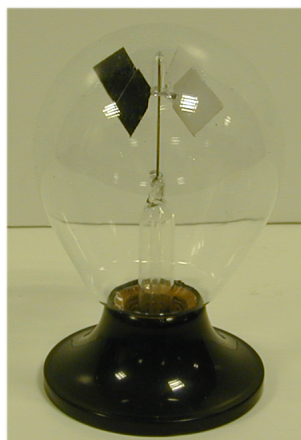


Figura 17: *Radiómetro de Crookes*. El radiómetro no funciona debido a la presión de radiación, la idea original de Crookes al construirlo, sino debido a un mecanismo de choques contra los bordes de los rombos, por lo que se necesita una pequeña cantidad de aire a baja presión. Si hubiera demasiado aire, el rozamiento haría que se detuviera el giro de las paletas.

El radiómetro de Crookes, así denominado por William Crookes (1832-1919), es otro ejemplo de máquina térmica, en esta ocasión movida por la luz (Fig. 17). En el interior de una esfera de vidrio de la que se ha evacuado casi todo el aire, y sobre un soporte de aguja, se coloca un tubito invertido de vidrio del que salen en cruz dos barras en cuyos extremos hay cuatro rombos pintados alternativamente de negro por una cara y plateados, o pintados de blanco, por la otra. Al ser iluminado, por el Sol o por una lámpara de incandescencia, el molinete del radiómetro comienza a girar. Si la presión de radiación fuera la responsable de su movimiento, las aspas girarían con la parte plateada de los aspas alejándose de la luz, debido a que los fotones reflejados producen una fuerza mayor sobre las aspas que los absorbidos. Por el contrario, el molinete del radiómetro gira con la parte pintada de negro de las aspas alejándose de la luz. La explicación habitual del funcionamiento del radiómetro tiene que ver con la mayor temperatura que alcanzan las moléculas del aire cerca de las partes pintadas de negro, que absorben bien la luz, en relación con la temperatura que alcanza el aire en la parte opuesta. Justo en los bordes de los rombos, la mayor temperatura de las moléculas provenientes del lado pintado de negro hace que los golpeen con mayor velocidad y mayor momento lineal, dando lugar a una fuerza que genera un momento de una fuerza que hace girar todo el conjunto con las superficies pintadas de negro alejándose de la luz [35]. Cuando los lados opuestos de los rombos están pintados de negro y de blanco el radiómetro gira más lentamente, para la fuente de luz situada a la misma distancia, que cuando estos están pintados de negro y plateados. La razón estriba en que en el primer caso la diferencia de temperaturas entre ambos lados es menor que en el segundo, con menor impulso neto sobre los

bordes de las aspas.

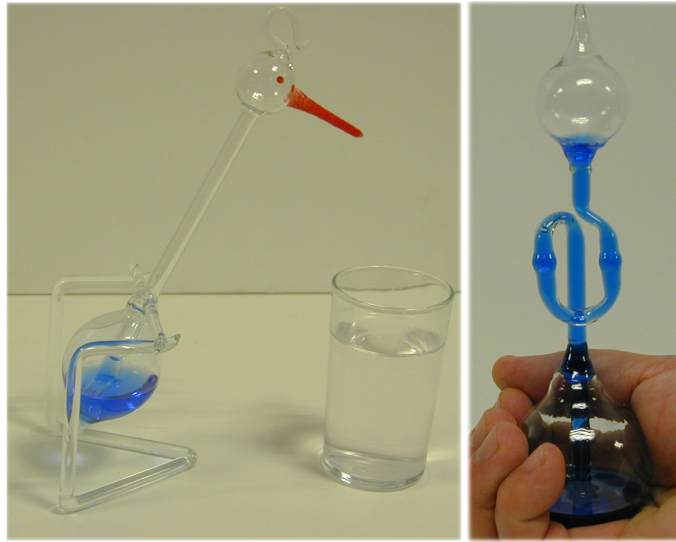


Figura 18: (i) *Pájaro bebedor*. El enfriamiento de su cabeza induce la diferencia de presiones suficiente como para que el líquido del cuerpo ascienda por el tubo central hasta su cabeza. (d) *Hervidor de mano*. Al calentar su base llena de líquido, la presión de vapor del líquido aumenta tanto que consigue elevarlo a través del tubo central hasta el bulbo superior.

El pájaro bebedor (Fig. 18), cuya patente original, de M V Sullivan, es de 1945, es otro ejemplo de máquina térmica. Este curioso dispositivo, transforma en trabajo mecánico la tendencia del agua en su cabeza a evaporarse, es decir, la diferencia de potencial químico entre el agua líquida en su cabeza y el menor potencial químico del vapor de agua en el aire no saturado de humedad [36]. Si el aire que rodea la cabeza mojada del pájaro no se encuentra saturado de humedad, algo de agua se evapora en la cabeza del pájaro, haciendo que disminuya su temperatura. La presión del vapor del líquido volátil que se encuentra en su interior disminuye con el descenso de la temperatura. Aunque la variación de temperatura es pequeña, debido a que la presión de vapor del líquido interno disminuye exponencialmente con la temperatura y a que dicho líquido tiene una temperatura próxima a su temperatura de ebullición, se establece una importante diferencia de presión entre la cabeza y el cuerpo del pájaro.

La mayor presión de vapor sobre el líquido en el cuerpo que en la cabeza hace ascender el líquido por el tubo hasta que la diferencia de presiones cuerpo-cabeza del pájaro equilibra una columna de líquido de la altura del pájaro. Esta altura se puede calcular aplicando el Teorema de Bernoulli. Cuando el líquido asciende lo suficiente por el tubo como para que el centro de gravedad del pájaro se encuentre por encima del fulcro, el equilibrio del pájaro se hace inestable, y su centro de gravedad desciende. El pájaro oscila, y con el centro de gravedad ligeramente adelantado

debido al peso del pico, cae sobre el vaso y moja el fieltro del pico en al agua. Con el pájaro casi en horizontal, cabeza y cuerpo del mismo se ponen en contacto directo, las presiones del vapor se equilibran, el líquido de la cabeza refluye y se vuelve a la situación inicial. El hervidor de mano (Fig. 18–(i)) tiene la misma estructura interna que el pájaro bebedor, y el líquido asciende por el tubo debido al calentamiento del líquido en la base.

Si el pájaro bebedor se coloca bajo una campana de cristal –u otro recipiente herméticamente cerrado–, la humedad del recinto alcanza rápidamente la saturación, pues el agua de la copa se evapora también, cesa la evaporación en la cabeza del pájaro, la cabeza no se enfría, se anula la diferencia de temperaturas cuerpo-cabeza y al no haber diferencia de temperaturas no hay producción de trabajo mecánico, por lo que el pájaro situado bajo la campana deja de oscilar al cabo de pocos minutos.



Figura 19: Barco “chop-chop”. El vapor producido por el calentamiento del agua en el interior del depósito dotado de una pequeña placa vibrante expulsa el agua de los tubos y, al enfriarse, vuelve a permitir la entrada de nueva agua, que al volver a evaporarse, cierra el ciclo térmico.

Otro juguete, relativamente antiguo, que se comporta como una máquina térmica es el barco “chop-chop” (Fig. 19), onomatopeya del sonido que produce una plaquita vibrante del mismo [37]. Con un fino tubo de latón doblado en forma de U, con la parte cerrada de la misma encima del bote y susceptible de calentarse con una vela, y los extremos abiertos situados bajo el agua, el cebado inicial del tubo con agua y su posterior calentamiento hace que se produzca vapor en el tubo, vapor que al impeler hacia afuera el agua del tubo consigue que el bote avance. La disminución de la presión del vapor por enfriamiento implica que vuelva a entrar agua en el tubo sumergido. La posterior ebullición del agua permite que continúe el movimiento del barco.

Los juguetes eléctricos y magnéticos tienen el encanto de la modernidad [38]. Incluso un motor eléctrico simple presenta un comportamiento interesante: una pequeña bobina de cobre, situada encima de un imán, gira, alimentada por una pila y apoyada en soportes metálicos (Fig. 20–(i)). La fuerza de Lorentz produce el par de fuerzas que explica que la bobina gire [39]. Otro motor electromagnético, también

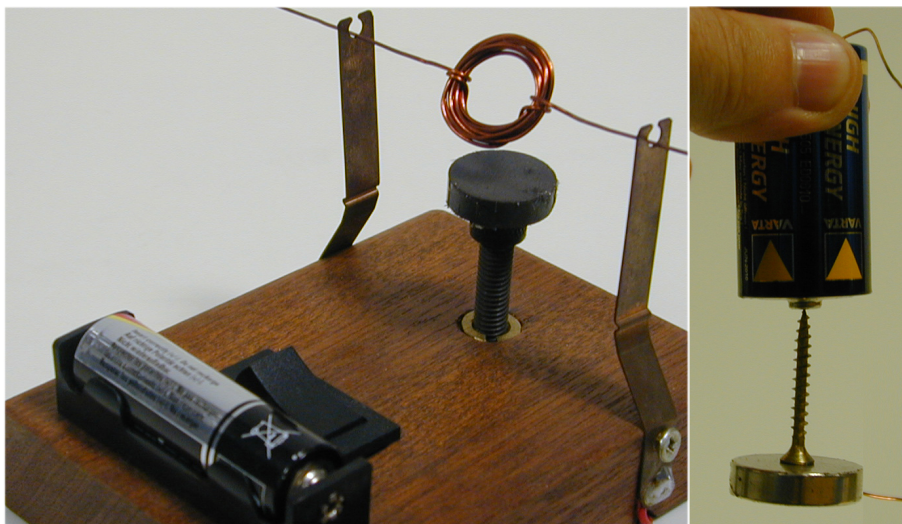


Figura 20: (i) *Motor eléctrico simple*. Cuando circula corriente por la pequeña bobina situada sobre el imán, ésta gira. (d) *Motor Homopolar*. Si se conecta el extremo superior de la pila con el borde del imán de neodimio con forma de disco, éste gira.

basado en la fuerza de Lorentz, se puede construir de tal forma que un imán plano gire pegado a la cabeza de un tornillo, sujeto magnéticamente a una pila [40]. Para construir este dispositivo, denominado motor homopolar (Fig. 20–(d)), se necesita un potente imán (por ejemplo, de neodimio, boro y hierro), un tornillo, una pila y un cable de cobre que conecte el borde del imán con el extremo opuesto de la pila del que cuelgan el tornillo y el imán. Se han descrito muchas variantes del motor homopolar [41].

Los imanes resultan ser objetos atractivos para todo el mundo [42]. El péndulo magnético caótico consiste en el movimiento de una esfera de metal en el campo magnético originado por varios imanes situados sobre la circunferencia de la base metálica del péndulo, que a veces se encuentran ocultos (Fig. 21). Este péndulo magnético se puede utilizar para una introducción visual a la teoría del caos determinista: posiciones iniciales de la esfera del péndulo muy próximas entre sí dan lugar, al cabo de muy poco tiempo, a trayectorias del mismo completamente diferentes, aunque el comportamiento del sistema se puede describir mediante las leyes de Newton.

El cañón de Gauss (Fig. 22), por Carl Friedrich Gauss (1777-1855), quién formuló las demostraciones matemáticas del efecto electromagnético usado en él, es otro juguete muy interesante, que muestra cómo la energía implicada en una interacción magnética se puede transformar en energía cinética o potencial [43].

Un imán de neodimio que se deja caer por el interior de un tubo de cobre y descendiendo con velocidad uniforme siempre produce impresión entre la audiencia, sobre

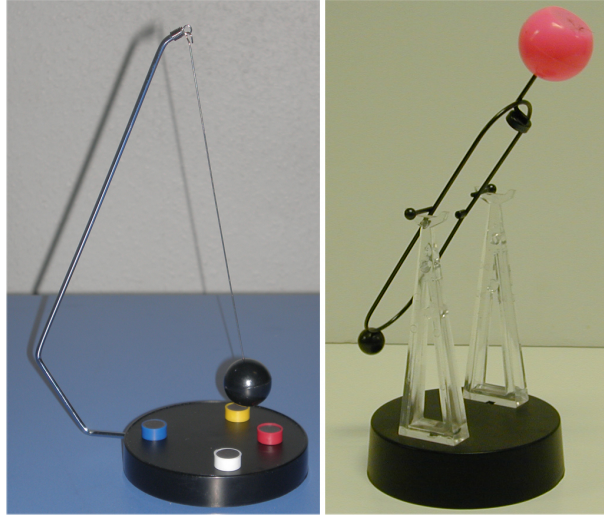


Figura 21: (i) *Péndulo magnético*. La bola del péndulo, que contiene una pieza de hierro, oscila caóticamente entre los imanes antes de detenerse. (d) *Péndulo controlado electrónicamente*. Al pasar cerca de la base, que oculta un electroimán controlado electrónicamente y una pila, recibe un impulso que compensa las pérdidas por rozamiento y le permite oscilar durante mucho tiempo.

todo si previamente se ha dejado caer una bola de acero no imantada del mismo peso y tamaño y si en el tubo de cobre se han practicado agujeros para observar el imán caer [44]. El descenso del imán, en contraste con el movimiento acelerado de la bola de acero, se explica basándose en la ley de inducción de Faraday, el experimento de Oersted y la ley de Lenz [45].

Un nuevo conjunto de juguetes, que ya se pueden adquirir en muchos museos de ciencia, están basados en electroimanes controlados mediante dispositivos electrónicos, y permiten una ilusión de movimiento perpetuo [46]. En el caso de la peonza sin descanso, dotada de un imán circular, ésta gira sobre una base cilíndrica de plástico duro que esconde en su interior un sensor de campo magnético, un microchip, un electroimán y una pila (Fig. 23–(i)). Cuando el sensor detecta que el polo sur del imán de la peonza se está alejando, el microchip está programado para activar el electroimán, produciendo un campo magnético que al repeler el imán de la peonza la impulsa de tal forma que consigue una energía adicional con la que compensar las pérdidas por rozamiento. El péndulo oscilante sin fin tiene un diseño semejante. En el caso del globo terráqueo levitante, con un imán en su polo norte, el sensor detecta, con una frecuencia de miles de hertzios, si el campo magnético disminuye, en cuyo caso se conecta el electroimán oculto en la parte superior, o si aumenta, en cuyo caso desconecta el electroimán y permite que el globo descienda (Fig. 23–(d)).

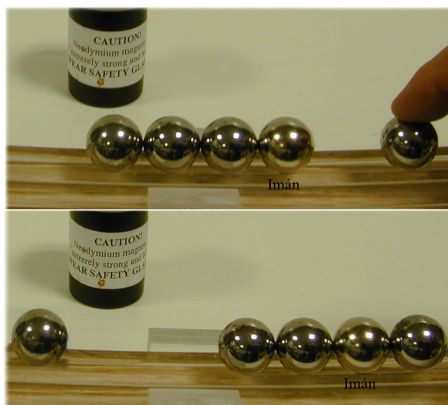


Figura 22: *Cañón de Gauss*. Cuatro bolas de acero, la cuarta es un imán de neodimio-boro-hierro, se colocan sobre un carril. Se deja libre una quinta bola, que es atraída por el imán. La primera bola sale despedida a gran velocidad, alcanza una altura importante y el restante conjunto de cuatro bolas, se desplaza moviéndose en sentido contrario (Tercera Ley de Newton).

Otros juguetes magnéticos presentan comportamientos levitantes, aunque basados en una física muy diferente de la del Levitrón. Los campos magnéticos inducidos por un imán en una placa de grafito, que es un material diamagnético, proporcionan la sustentación necesaria como para que un pequeño imán, situado bajo otro imán mayor, levite en equilibrio estable (Fig. 24) [47]. La explicación, tanto del comportamiento diamagnético como ferromagnético de los materiales, se basa en la mecánica cuántica [48].

Volviendo a la lámpara de plasma [49], inventada por Nikola Tesla (1856-1943) al investigar con corrientes de alta frecuencia en un tubo de vidrio con gas inerte a bajas presiones, o a su equivalente plano “luz aleatoria” (Fig. 25), su comportamiento sólo se puede entender utilizando conceptos de física moderna. La luz que se observa en su interior está formada por los fotones emitidos cuando los átomos que han sido previamente golpeados por el chorro de electrones acelerados bajo los altos campos eléctricos, producidos por la bobina de Tesla, y que han perdido alguno de sus electrones más externos, los recuperan. Puesto que se trata de un fenómeno cuántico, diferentes gases situados en el interior de la bola de plasma proporcionan distintos colores. La lámpara de plasma es adecuada para ser analizada en aquellos cursos en los que se estudia la estructura atómica de la materia y el átomo de Bohr.

Los juguetes relacionados con la óptica, como por ejemplo los kaleidoscopios, que utilizan espejos planos, se pueden explicar utilizando únicamente la ley de Snell de la reflexión [50]. Utilizando secciones de espejos esféricos se puede construir un juguete denominado espejismo [51]. Cuando un objeto, por ejemplo, una rana de



Figura 23: (i) *Peonza sin reposo*. Una vez puesta en movimiento, ésta peonza permanece girando de forma (casi) indefinida. (d) *Globo terráqueo levitante*. La bola flota, controlada por un dispositivo electrónico. Si el conjunto se coloca encima de un sensor de fuerzas se comprueba que el peso total es el mismo tanto si la bola se encuentra unida por su imán al cabezal superior como si aquella levita en equilibrio (Tercera Ley de Newton).

plástico de vivos colores, se oculta en el centro del espejo inferior, se puede observar su imagen, y su reflejo, en el orificio central que se practica en el espejo superior (Fig. 26). Si la imagen de la rana se ilumina, ésta presenta las mismas sombras que presentaría el objeto real.

Los juguetes, algunos de los cuales no han sido descritos en este artículo [52], pueden tener un papel ameno a la hora de motivar a los jóvenes a interesarse por la ciencia o a la hora de motivar su estudio de las diferentes partes de la física. Con la observación del comportamiento de estos juguetes se puede entender que la física de los mismos tiene muy diferentes aspectos y que su explicación puede llegar a requerir, simultánea o secuencialmente, conceptos de mecánica, termodinámica, electromagnetismo, física moderna, etc. La misma situación se presenta en el mundo físico, pues los fenómenos naturales casi nunca se nos muestran con una fenomenología simple.

De acuerdo con la experiencia de los autores en tareas de divulgación de la física, al utilizar juguetes se puede lograr un discurso tan interesante como coherente no sólo describiéndolos individualmente sino poniéndolos unos en relación con otros mediante las consideraciones de: (i) *Unidad de la Física*, con juguetes aparentemente muy diferentes que presentan un comportamiento que se puede explicar mediante las mismas leyes físicas, (ii) *Diversidad de la Física*, con juguetes aparentemente semejantes que presentan un comportamiento que debe ser explicado utilizando leyes físicas diferentes, y (iii) *Universalidad de la Física*, o la presentación de un concepto de Física que se pueda aplicar a juguetes muy diferentes.

Así, en el tentetieso, el molinete térmico, el balancín térmico y el pájaro bebedor,

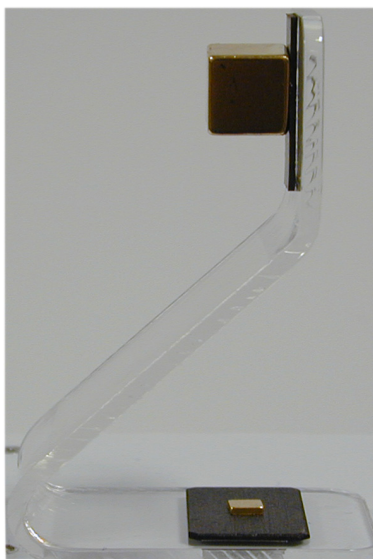


Figura 24: *Levitador diamagnético*. Sobre una capa de grafito pirolítico flota un pequeño imán plano al inducir un campo magnético opuesto en el material diamagnético. En la parte superior se encuentra un gran imán cúbico que compensa en parte la fuerza de la gravedad sobre el pequeño imán. A diferencia de lo que sucedería con una configuración de sólo imanes, éste equilibrio es estable.

la unidad de la física se manifiesta a través del concepto fundamental de equilibrio estable, con el centro de gravedad del sistema situado por debajo de su punto de apoyo. En los dos últimos, la transición entre equilibrio estable, y equilibrio inestable, con el centro de gravedad situado en un momento dado por encima del punto de apoyo, con movimiento de rotación inducido por el torque que aparece, proporciona una primera clave de su funcionamiento a saltos bruscos.

La cuna de Newton y el cañón de Gauss son dos dispositivos en los que se tienen cinco bolas de acero y en los que se hace chocar una contra las otras cuatro. Aunque visualmente parecen semejantes, en un caso es la energía potencial gravitatoria la que pone en marcha el dispositivo, mientras que en el cañón, es la fuerza magnética la que se encuentra implicada [53], lo que puede ponerse de manifiesto soltando la bola descendente a casi cualquier distancia de las otras cuatro y comprobando que la bola que sale lanzada siempre lo hace con la misma velocidad.

Un concepto muy interesante, con elementos de universalidad, pues se da en tipos muy diferentes de dispositivos, es el de energía (en forma) metaestable. En el tornado en botella (Fig. 11), el agua se encuentra inicialmente a una cota superior y en cuanto se produce el tornado, el agua desciende a su cota más baja. En el resorte de caucho (Fig. 10) la energía elástica se mantiene en un mínimo relativo



Figura 25: *Luz aleatoria*. Un punto central de alta tensión produce descargas que van buscando la parte exterior del disco a través de una matriz del tipo del camino aleatorio, cambiando constantemente la trayectoria de los rayos.

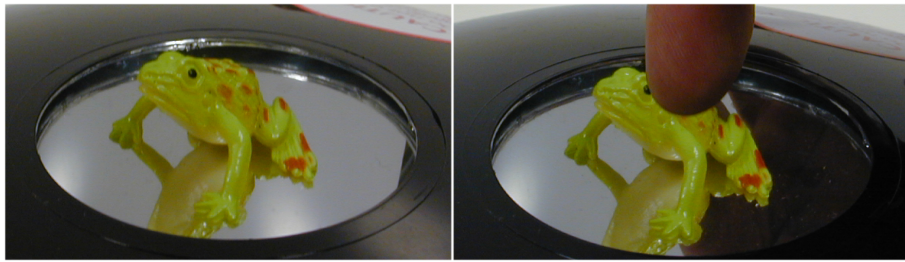


Figura 26: *Espejismo*. (i) Imagen real de la rana situada en el fondo del espejo base. (d) La posición del dedo elimina parte de la imagen.

debido a que la deformación inducida en él da lugar a un máximo entre este mínimo y el mínimo absoluto, con el resorte sin deformar, que el sistema no es capaz de superar por sí mismo. En las farmacias se puede adquirir un dispositivo que consiste en un recipiente de plástico traslúcido, flexible y cerrado, lleno de un líquido en cuyo interior hay una pequeña placa circular de hierro ligeramente abombada. Si se procede a doblar la chapa, se escucha un sonido seco, el líquido comienza a solidificar, aumenta su temperatura y se desprende una gran cantidad de calor. En este calentador de mano, el acetato de sodio disuelto en forma sobresaturada en el agua no encuentra el camino a la cristalización [54], lo que le permitiría liberar el calor latente de disolución que previamente ha absorbido y que finalmente libera si, con ayuda de la onda de choque producida por la chapa, se le hace cristalizar.

La estabilización por rotación, en el resorte de caucho, en el helicóptero, ciertos proyectiles que se lanzan girando, el Levitrón, etc., es un concepto con cierto carácter universal en física que ha sido utilizado en muchos juguetes.

Otro concepto que es común a todos los juguetes mecánicos es el de que la energía mecánica, la suma de la energía cinética (de traslación o de rotación) y la energía potencial gravitatoria o la energía elástica, no se conserva. En otras palabras, se necesitan conceptos de termodinámica para explicar el comportamiento último de estos dispositivos que se desplazan, giran u oscilan inicialmente para terminar por pararse. Por otro lado, la creación de energía mecánica siempre lleva asociada una diferencia de temperaturas, aunque lo sea de forma sutil como en el pájaro bebedor.

La descripción matemática del comportamiento de algunos juguetes, el resorte de caucho (y la barra abrazadora [26]), el ludión, el balancín térmico (y la placa bimetálica [33]), el pájaro bebedor y la bola flotante en flujo de aire, que funcionan “a saltos”, se puede hacer en el contexto común de la ‘catástrofe en cúspide’.

En un contexto más formativo, después de analizar en detalle la física de un juguete, se deben plantear preguntas del tipo: ¿qué se espera observar si ...? Por ejemplo, ¿qué cambia si un buzo de Descartes se construye de una altura de 1 m en vez de sólo 20 cm? Y, ¿cómo se comportará un pájaro bebedor cuyo cuerpo se pinta de negro y, privado de agua, se utiliza una luz para iluminarle [55]? Esta secuencia de preguntas avanzadas debe ser cuidadosamente preparada por el instructor o conferenciante para que los alumnos u oyentes puedan dar con facilidad los pasos sucesivos de razonamiento, pues en caso contrario el ejercicio puede resultar contraproducente.

Al igual que sucede con otros dispositivos sencillos, la física de los juguetes también se puede utilizar para motivar a los alumnos a desarrollar sus propios proyectos de investigación. La construcción de juguetes en el laboratorio, por ejemplo, un tentetieso de período predeterminado utilizando materiales que se puedan encontrar en tiendas de bricolage, es una magnífica manera de aprender a través de ponerse manos a la obra [56]. Los estudiantes pueden apreciar así que el mundo real cotidiano tiene un comportamiento más rico, sorprendente y complejo de lo que aparece en muchos libros de texto.

Finalmente, es importante señalar que los juguetes, a pesar de su indudable interés, no son la panacea pedagógica [57]. Por el contrario, no se recomienda su uso si sus principios básicos son demasiado complejos como para ser entendidos por la audiencia. Mientras que juguetes como el tentetieso, la cuna de Newton, el coche con globo, el motor eléctrico y el espejismo están basados en principios físicos relativamente básicos, no sucede lo mismo con otros juguetes como el *rattleback*, el radiómetro de Crookes o la lámpara de plasma. Es tarea del profesor y del conferenciante seleccionar cuidadosamente qué tipo de juguetes se van a utilizar y que tipo de discurso se va desarrollar en cada sesión.

Referencias

- [1] C P Jargodzki and F Potter, *Mad About Physics. Braintwisters, Paradoxes, and Curiosities*, John Wiley (2001); R Ehrlich, *Why Toast Lands Jelly-side Down*, Princeton University Press (1997); H R Crane, *How Things Work (1983-1995)*, AAPT Ed. (1996); R Ehrlich, *Turning the World Inside Out*, Princeton University Press (1990); J Walker, *The Flying Circus of Physics. With Answers*, John Wiley (1977).
- [2] J Sarquis, L Hogue, M Sarquis y L Woodward, *Investigating Solids, Liquids and Gases with TOYS*, Terrific-Science Press (1997); B A P Taylor, J Poth and D J Portman, *Teaching Physics with TOYS*, Terrific-Science Press (1995).
- [3] J Güémez, C Fiolhais y M Fiolhais, *Toys in physics lectures and demonstrations—a brief review*, Phys. Educ. **44** 53 (2009). Esta referencia, en la que se puede encontrar una bibliografía resumida sobre juguetes y su uso en la enseñanza de la física, constituye la base del artículo que se presenta en castellano.
- [4] H Aref, S Hutzler D Weaire, *Toying with physics*, Europhysics News **38**, 23 (2007), D Featonby, *Toys and physics*, Phys. Educ. **40** 537 (2005)
- [5] J Fort, J E Llebot, J Saurina and J J Suñol , *A counterintuitive toy: the bird that never falls down*, Phys. Educ. **33** 98 (1998)
- [6] N R Guilbert, *Deconstructing a plasma globe*, Phys. Teach. **37** 11 (1999)
- [7] *The science behind the 'magic'*, Phys. Educ. **45** 109 (2010)
- [8] D Featonby, *Magic physics?*, Phys. Educ. **45** 24 (2010)
- [9] W Case, *The gyroscope: an elementary discussion of a child's toy*, Am. J. Phys. **45** 1107 (1977)
- [10] E Butikov, *Precession and nutation of a gyroscope*, Eur. J. Phys. **27** 1071 (2006)
- [11] R J Cohen, *The tippe top revisited*, Am. J. Phys. **45** 12-25 (1977)
- [12] A R Del Campo, *Tippe Top (Topsy-Turnee Top) Continued*, Am. J Phys. **23** 544 (1955)
- [13] K Sasakia *Spinning eggs—which end will rise?*, Am. J. Phys. **72** 782 (2004)
- [14] R D Edge, R Childers, *Curious celts and riotous rattlebacks*, Phys. Teach. **37** 80 (1999)

- [15] H Bondi, *The rigid body dynamics of unidirectional spin*, Proc. R. Soc. Lond. A **405** 265 (1986)
- [16] D Kagan, *Happy balls, unhappy balls, and Newton's cradle*, Phys. Teach. **48** 152 (2010)
- [17] . J D Gavenda and J R Edgington, *Newton's cradle and scientific explanation*, Phys. Teach. **35** 411 (1997)
- [18] S Hutzler, G Delaney, D Weaire, y F MacLeod *Rocking Newton's cradle*, Am. J. Phys. **72** 1508 (2004)
- [19] Ai-Ping Hu, *A simple model of a slinky walking down stairs*, Am. J. Phys. **78** 35 (2010)
- [20] P Gluck, *A project on soft springs and the slinky*, Phys. Educ. **45** 178 (2010)
- [21] R A Young, *Longitudinal standing waves on a vertically suspended slinky*, Am. J. Phys. **61** 353 (1993)
- [22] Yee-kong Ng, Se-yuen Mak, y Choi-man Chung, *Demonstration of Newton's third law using a balloon helicopter*, Phys. Teach. **40** 181 (2002)
- [23] D Featonby, *Balloons hold the key to inflation*, Phys. Educ. **44** 344 (2009)
- [24] W Kunkel y R Harrington, *Modeling the motion of an increasing mass system*, Phys. Teach. **48** 243 (2010); J R Claycomb, C Zachary, y Quoc Tran, *Baking soda and vinegar rockets*, Phys. Teach. **47** 88 (2009)
- [25] G A Finney, *Analysis of a water-propelled rocket: A problem in honors physics*, Am. J. Phys. **68** 223 (2000)
- [26] S J Van Hook, *Teaching potential energy functions and stability with slap bracelets*, Phys. Teach. **43** 425 (2005)
- [27] H R Crane *A tornado in a soda bottle and angular momentum in the washbasin*, Phys. Teach. **25** 142 (1987)
- [28] J Güémez, C Fiolhais, y M Fiolhais, *A Demonstration apparatus for the Cartesian diver*, Phys. Teach. **41** 495 (2003)
- [29] J Güémez C Fiolhais y M Fiolhais, *The Cartesian diver and the fold catastrophe*, Am. J. Phys. **70** 710-714 (2002)
- [30] G D Nickas, *A thermometer based on Archimedes' principle*, Am. J. Phys. **57** 845 (1989)

- [31] T López-Arias, L M Gratton, S Bon y S Oss, *“Back of the Spoon” Outlook of Coanda Effect*, Phys. Teach. **47** 508 (2009)
- [32] H Babinsky, *How do wings work?*, Phys. Educ. **38** 497 (2003)
- [33] C Ucke and H-J Schlichting, *Revival of the jumping disc* Phys. Educ. **44** 612 (2009)
- [34] P. W. Hewson, *The bimetallic strip – a quantitative experiment*, Phys. Teach. **13** 350 (1975)
- [35] J-M Courty, E Kierlik, *Empuje lumínico*, Investigación y Ciencia **402** 90 (2010)
- [36] J Güémez, R Valiente, C Fiolhais y M Fiolhais *Experiments with the drinking bird*, Am. J. Phys. **71** 1257 (2003)
- [37] H R Crane *The Pop-Pop boat* , Phys. Teach. **35** 176 (1997)
- [38] T B Greenslade, Jr., *Electrostatic toys*, Phys. Teach. **20** 552 (1982)
- [39] Seok-In Hong, Jung-In Choi, y Seok-Cheol Hong, *Making a simple self-starting electric motor*, Phys. Teach. **47** 204 (2009); F Lane, *Cheap toys blow students away*, **44** 575 (2009)
- [40] H. K. Wong, *Motional mechanisms of homopolar motors and rollers* Phys. Teach. **47** 463 (2009)
- [41] H K Wong, *Levitated homopolar motor*, Phys. Teach. **47** 124 (2009); D Featonby, *An even simpler version of the neodymium motor*, Phys. Educ. **42** 236 (2007)
- [42] A Bonanno, G Bozzo, M Camarca y P Sapia, *Weighting magnetic interactions*, Phys. Educ. **44** 570 (2009)
- [43] D Kagan, *Energy and momentum in the Gauss Accelerator*, Phys. Teach. **42** 24 (2004)
- [44] M J Ruiz, *Lenz’s Law Magic Trick*, Phys. Teach. **44** 96 (2006)
- [45] G Donoso *et al*, *Magnet fall inside a conductive pipe: motion and the role of the pipe wall thickness*, Eur. J. Phys. **30** 855 (2009)
- [46] H R Crane, *A Spinning top, Lenz’s law and electric watches*, Phys. Teach. **22** 113 (1984)
- [47] M M J French, *The wonders of levitation* Phys. Educ. **45** 37 (2010)

- [48] C A Sawicki *Small inexpensive diamagnetic levitation apparatus*, Phys. Teach. **39** 556 (2001)
- [49] M Simon, *More on plasma globes*, Phys. Teach. **37** 195 (1999)
- [50] T B Greenslade, Jr., *Kaleidoscopes made with big mirrors*, Phys. Teach. **47** 334 (2009)
- [51] A Sieradzan, *Teaching geometrical optics with the “optic mirage”*, Phys. Teach. **28** 534 (1990)
- [52] H J Schlichting y W Suhr, *The buzzer—a novel physical perspective on a classical toy*, Eur. J. Phys. **31** 501 (2010); M Kires, *Astroblaster—a fascinating game of multi-ball collisions*, Phys. Educ. **44** 159 (2009); D Petrie, J L Hunt, y C G Gray , *Does the Euler Disk slip during its motion?*, Am. J. Phys. **70** 1025 (2002); H R Crane, *A reluctant hourglass and a backing-down woodpecker*, Phys. Teach. **31** 501 (1993); D P J Mulder *Children’s toys*, Phys. Teach. **18**, 134-135 (1980); R B Prigo, *The wobbling Christmas tree toy*, Am. J. Phys. **52** 335 (1984)
- [53] J A Rabchuk, *The Gauss rifle and magnetic energy*, Phys. Teach. **41** 158 (2003)
- [54] J Güémez, C Fiolhais and M Fiolhais, *Quantitative experiments on supersaturated solutions for the undergraduate thermodynamics laboratory*, Eur. J. Phys. **26** 25 (2005)
- [55] J Güémez, R Valiente, C Fiolhais, and M Fiolhais, *Experiments with a sunbird* Am. J. Phys. **71** 1264 (2003)
- [56] N Amir y R Subramaniam, *Making physics toys fosters creativity*, Phys. Educ. **41** 18 (2006)
- [57] A Macdonald, *Why ‘wow’ will not work*, Physics World **19** 56 (2006)