

LA FÍSICA DE LOS JUGUETES^(*)

Vicente López García
Parque de las Ciencias de Granada

(*) Texto escrito de la conferencia presentada por el autor en el III Encuentro de Profesores de Ciencias celebrado en Cádiz en Mayo de 2003 y dedicado a "La Ciencia y la vida cotidiana".

RESUMEN

En este trabajo se analizan las posibilidades didácticas de una serie de juguetes y artilugios curiosos con potencial interés a la hora motivar a los alumnos y estudiar los principios físicos sobre los que se apoya. Para ello se describe inicialmente su funcionamiento y se pasa posteriormente a revisar su utilidad como recurso didáctico dirigido a ofrecer una enseñanza de la Física más rica y estimulante.

Palabras claves: *enseñanza de las ciencias, física recreativa, juguetes, motivación.*

INTRODUCCIÓN

Quizás convenga empezar preguntándonos, ¿qué pinta una conferencia sobre juguetes en un Encuentro de Ciencia en la vida cotidiana?

Desde luego que los juguetes son cotidianos. Son imprescindibles cuando somos niños, estimulando el aprendizaje y el desarrollo de habilidades, pero siguen siendo cotidianos para los padres y, cómo no, para los abuelos, tanto al comprarlos como al jugar con ellos puesto que el juego nos aporta muchas otras cosas. Hoy pretendo exponer que son enormemente útiles para los profesores, especialmente para los profesores de Física.

Creo que me he sentido atraído por los juguetes a lo largo de toda mi vida por dos razones principales: porque sigo manteniendo la curiosidad y porque soy profesor de Física. Los juguetes están llenos de Física. Funcionan de acuerdo con los principios físicos más variados y, además, a veces lo hacen produciendo sorpresa en el resultado lo que, a mi juicio, puede ser una buena base sobre la que comenzar un tema en el aula.

Lo que vamos a hacer esta tarde es desentrañar los principios físicos de algunos juguetes, algunos de ellos bien conocidos y otros no tanto pero que se encuentran todos en el mercado. Empezaremos hablando de los distintos tipos de energía que mueven a los juguetes. Luego nos detendremos en dos de ellos tratando de hacer algunos cálculos como ejemplo de aplicación en una clase de Bachillerato y pasaremos el resto del tiempo jugando con los restantes, dejándonos llevar como si fuéramos chiquillos.

LA ENERGÍA

Todos los juguetes necesitan energía para funcionar, desde el *coche* que movemos directamente a mano, bien empujándole o tirando de una cuerda, usando la energía que le proporcionan los músculos del cuerpo. No nos vamos a ocupar de definir la energía. En realidad no sabemos definirla, tan sólo medirla, pero no hay que extrañarse, tampoco sabemos definir otras magnitudes fundamentales como el espacio o el tiempo. Sin embargo, sí que es interesante describir la larga cadena de transformaciones energéticas que ha tenido lugar hasta el momento de empujar el coche. ¿De dónde sale esa energía mecánica del músculo? A grandes rasgos, de la energía química de los alimentos que tomamos. ¿Y ésta? Tanto sean de origen animal como vegetal esos alimentos, los productos químicos alimenticios se originan en la fotosíntesis de las plantas. ¿Y la energía necesaria para la función clorofílica? Del Sol. Así pues, en última instancia, es el Sol el que está moviendo el juguete! No nos puede extrañar que todas las sociedades humanas primitivas lo adoraran como Dios.

¿Es en realidad el Sol la última instancia? ¿Podemos seguir aún la cadena? ¿De dónde viene la energía del Sol? De sus reacciones nucleares, de la conservación de masa y energía. De aquí ya sólo podemos remontarnos al Big Bang, sobre el que por ahora nos está vedado pronunciarnos acerca de su origen.

Otros juguetes acumulan esa misma energía muscular (usaré las expresiones más cotidianas para nombrar los distintos tipos de energía aunque no sea correcto desde el punto de vista de la Física) de diversas formas para utilizarla después: se puede acumular en forma de *energía cinética*, que podemos llamar energía de movimiento; esta moto, por ejemplo, utiliza un volante de inercia.



Figura 1

La forma más habitual es, quizás, almacenarla como *energía elástica*: son clásicos todos los juguetes de cuerda en los que se enrolla un muelle espiral que va soltándose poco a poco como este *pollito*, aunque también se usa la energía elástica en otros casos sólo para volver cómodamente a la posición inicial y mantener así la actividad del juguete. Es el caso del conocido *matasuegras*, las *gallinas comedoras*, etc. Uno muy curioso es esta *mariposa de gomas*. Después de darle unas 40 vueltas, se introduce en un libro y, al abrirlo..., sale volando. Seguramente, lo más educativo de esta mariposa es que nunca se debe regalar sola, sino con un

libro. Otra forma de acumularla es usando la *energía gravitatoria* como en el *muñeco trapecista* o en el columpio que suele haber en todos los parques o el que nos hacíamos con cuerdas atadas a una rama escogida de un árbol.

Veamos otros tipos de energía utilizados. Como ejemplo de *energía calorífica o térmica* he traído la llamada *canoas pop-pop*. Es una verdadera máquina de vapor que aparece a finales del siglo XIX, se construye y vende hasta los años 50 y resucita hace unos diez años con el auge actual del juguete científico. Tiene una pequeña caldera con capacidad para unas cuantas gotas de agua que hay que cebar antes de comenzar. El objetivo de los dos



Figura 2

tubitos es sólo permitir el cebado. La llama de una velita caliente la caldera y las gotas de agua se vaporizan casi explosivamente como ocurre al echar una gota sobre una plancha muy caliente. El vapor empuja al agua de los tubos hacia atrás y a la barca hacia adelante. Al bajar ese vapor por los tubos que están en contacto con el agua exterior, se enfría, se condensa y la disminución de presión permite que otra gota de agua penetre en la caldera repitiéndose el ciclo.

Además, y eso no lo tenía el primer modelo, una delgada lámina metálica que cubre la caldera se mueve con los cambios de presión produciendo el ruido característico de un motor de explosión (de ahí el nombre de pop-pop). Aunque parece simple, muchos, y yo mismo, se han hecho la siguiente pregunta: si el agua sale y entra alternativamente de la barca, en la misma cantidad, ¿no hay entonces un intercambio total nulo de cantidad de movimiento con el exterior? ¿Por qué se mueve entonces? La pregunta es engañosa y creo que sólo nos la hacemos los profesores de Física deformados por hacer problemas de este tipo. Veámoslo del siguiente modo: Si estamos en una barca con un cubo de agua en la mano, podemos arrojar el agua con



Figura 3

fuerza por la popa y la barca avanzará. Después recogemos más agua del mar, la introducimos despacio a bordo para que la cantidad de movimiento (en el sentido hacia proa) sea pequeña y repetimos el lanzamiento. La barca continuará indefinidamente su avance mientras se mantenga el ciclo. Lo curioso es que el desplazamiento de la barca es independiente de la velocidad con que introduzcamos el agua. Antes de impulsarla para lanzarla estará en reposo respecto de la barca. La movamos a la velocidad que la movamos hacia proa para introducirla, después la tenemos que frenar. La contribución al cambio de cantidad de movimiento de la barca es, pues, nula en la fase de introducción del agua. Sólo la expulsión es la responsable del impulso y la barca tiene forzosamente que avanzar.

Otro juguete que funciona con energía térmica es el *radiómetro*. Es un molino de cuatro aspas sustentadas sobre la punta de una aguja, para minimizar el rozamiento, colocado en una ampolla en la que se ha hecho un vacío grande pero no total. Se lo debemos a Sir Williams Crookes en el último cuarto del siglo XIX, que lo usó en sus estudios de descargas en gases para medir la intensidad de las radiaciones utilizadas. Su característica principal es que cada aspa del molinillo tiene una cara blanca y la otra negra. Cuando incide luz sobre él, comienza a girar y lo hace tanto más rápidamente cuanto mayor sea la intensidad luminosa. Con el Sol, no llegan a verse las aspas. La primera interpretación que Crookes dio al fenómeno fue que era la presión de radiación (producida por el choque de los fotones, diríamos hoy, sobre las aspas) y así se lo comunicó a Maxwell, que estuvo encantado de que el aparato demostrase experimentalmente esa presión de radiación predicha por su teoría del electromagnetismo como consecuencia de la absorción de energía radiante por la materia. Sin embargo, ambos rectificaron inmediatamente. Si nos fijamos bien en el radiómetro observamos que siempre se mueve con la cara blanca hacia adelante, siendo la negra la que empuja, al contrario de lo que debería ocurrir si se tratara de un intercambio de cantidad de movimiento por efecto del choque.

En efecto, una pelota que choca contra una pared elástica y rebota intercambia el doble de cantidad de movimiento que si la pared es plástica y la pelota se incrusta en ella. Lo mismo ocurre con la luz. Si es absorbida por la cara negra de las aspas y reflejada por las blancas, haría doble fuerza sobre éstas últimas y el radiómetro se movería al revés de como lo hace. La presión de radiación, medida experimentalmente en 1901, es demasiado pequeña para producir el efecto que vemos y, además, si se hace un vacío mayor en el radiómetro, éste deja de funcionar lo que demuestra que el resto de aire que queda es determinante en su funcionamiento. Aunque aún no está del todo claro, la explicación simplificada es que la cara negra se calienta más que la blanca al absorber la radiación y la mayor agitación térmica de esa cara produce un mayor intercambio de cantidad de movimiento con las moléculas de aire que la rodean. Se trata, pues, de otro tipo de motor térmico.

Por supuesto, muchos juguetes utilizan *la energía eléctrica*, normalmente mediante pilas. No suelen gustarme demasiado los que funcionan a pilas pero este *reloj de agua* tiene la particularidad de mostrar qué es una pila eléctrica. Se trata de dos pares de electrodos de cobre y zinc que se sumergen en agua del grifo proporcionando el voltaje eléctrico suficiente para ponerlo en marcha. El agua del grifo es un buen electrolito y tiene la ventaja de ser transparente para que se vea bien su interior. Hay otros modelos que utilizan limones o patatas como electrolitos.

Algunos utilizan la energía luminosa del Sol o de cualquier otra fuente convirtiéndola en electricidad mediante un panel fotovoltaico para accionar un motor eléctrico. Un ejemplo muy atractivo es el *avión solar*



Figura 4

que avanza manteniendo el equilibrio sobre un soporte. Naturalmente, no puede realmente volar. Merece la pena hacer notar que los avances tecnológicos se incorporan muy rápidamente a los juguetes. Ya he encontrado, aunque aún no lo he conseguido para mí, un cochecito que funciona con una pila de combustible, la conversión directa de hidrógeno y oxígeno en electricidad, algo que está sólo en fase de experimentación por parte de los principales fabricantes de automóviles en estos momentos.

Y no podía faltar en esta muestra de energías el modesto *molinillo de papel*, al que de pequeño llamaba "volaera" como ejemplo del uso de la *energía eólica*.

Hemos visto que todos los juguetes necesitan energía para funcionar. Puede ser el momento de hablar un poco de los *móviles perpetuos*. Un deseo que la Humanidad ha perseguido inútilmente a lo largo de la historia: obtener una máquina que nos produzca trabajo sin una transferencia de energía. También los juguetes reflejan este deseo porque existen varios que buscan sorprendernos aparentando moverse continuamente sin una fuente energética y, desde el punto de vista didáctico, son un buen comienzo para introducir el tema.



Figura 5

Los más comunes tienen piezas imantadas y ocultan una pila que alimenta un ingenioso motor electromagnético, también oculto, consistente en un electroimán y un transistor que dispara el circuito sólo cuando se acerca el polo adecuado del imán.

El más interesante de los que conozco es el ya antiguo pájaro bebedor que mantiene su movimiento de vaivén mientras quede agua en la copa al alcance de su pico. A primera vista, el pajarito mantiene su movimiento sin gastar nada. Bueno, eso sí, el agua de la copa se evapora y hay que reponerla pero, al fin y al cabo, medio vaso de agua a la semana es casi gratuito! Sin embargo, el hecho de que el pájaro deje de beber cuando está seco nos da la pista clave. El segundo principio de la termodinámica nos dice

que sólo se puede obtener un trabajo si hay una diferencia de temperatura entre dos focos y el calor fluye del foco caliente al frío. ¿Por qué el pájaro tiene la cabeza recubierta con un fieltro que está siempre empapado? Para mantener la cabeza fría y los pies calientes, como debe ser.

La evaporación del agua hace que la esfera de la cabeza esté unos grados más fría que la de abajo, que se mantiene seca, debido al calor latente de evaporación. En Andalucía podemos decir que funciona por el efecto "botijo". Las dos esferas contienen un fluido volátil, normalmente éter coloreado, y están unidas por un tubito que hace de cuello y llega hasta el centro de la esfera de abajo. Al estar más calientes los pies que la cabeza, la presión de vapor en la esfera inferior es mayor y obliga al líquido a subir por el tubo. Entonces, al elevarse el centro de gravedad, al pesar más la cabeza,

el pájaro gira sobre su eje y se inclina lo que permite al éter volver a caer, igualándose la presión de los dos extremos al mismo tiempo que el pájaro bebe y mantiene la humedad. Al bajar el éter, baja entonces el centro gravedad, y el pájaro recupera la posición vertical, completándose el ciclo termodinámico que mantendrá en marcha el juguete mientras quede agua. Se trata por tanto de otro motor térmico en toda regla que se alimenta del flujo de calor que se establece entre los pies y la cabeza. Desgraciadamente, los móviles perpetuos no existen y cualquier ingenio que inventemos no podrá funcionar.

George Gamow en su *Biografía de la Física* hace el cálculo del rendimiento teórico de este ciclo termodinámico que puede llegar al 1% en días y lugares secos. Según él, podría usarse este motor, el pájaro bebedor, para elevar el agua que necesita evaporar desde una profundidad de 2.000 metros! Este cálculo, sin embargo, no tiene en cuenta otras pérdidas importantes en la subida del agua y el hecho de que en la copa se evapora mucha más agua de la que lo hace en la cabeza. Sí es interesante comprobar que funciona más rápidamente en días secos que en días húmedos, en los que la evaporación es menor y, por tanto, también es menor la diferencia de temperaturas. Propongo un par de experiencias: ¿qué pasaría si llenamos la copa de alcohol? ¿Y si mantenemos un ventilador cerca del pajarito?

JUGUETES PARA HABLAR DE PRINCIPIOS DE CONSERVACIÓN

Aunque no se ha citado expresamente, al hablar de los móviles perpetuos estábamos dando por sentado el Principio de conservación de la energía. Los Principios de conservación, el hecho de que una magnitud física permanece constante a lo largo del tiempo en un sistema aislado, dan mucho juego. Hay multitud de juguetes que se basan en la conservación de la cantidad de movimiento, de la energía o del momento angular.



Figura 6

Vamos a tratar de hacer un estudio sencillo pero cuantitativo de dos de ellos. Empezaremos con la *cuna de Newton*, cinco bolas iguales que cuelgan de un bastidor y están en contacto a la misma altura y perfectamente en línea. Esto hace que el choque entre ellas sea frontal. Además, como son de acero, podemos suponer que es también un choque elástico, sin pérdida de energía. ¿Qué pasa si separamos una de las bolas y la dejamos caer sobre las demás? ¿Se moverán todas aunque a menor velocidad? Aunque estemos familiarizados con el juguete, sigue resultándonos atractivo comprobar que cuatro de las bolas, incluida la que hemos dejado caer, quedan en reposo y la última sale a la misma velocidad que llegó la primera (en realidad a un poco menor). Si lanzamos ahora dos bolas, saldrán disparadas las dos del otro lado. Y lo mismo si dejamos caer tres o cuatro bolas.

Probemos a hacer otras combinaciones. Hacer chocar una bola de un lado y dos del otro, dos y tres, dos y dos dejando una quieta en el centro, etc.

¿Por qué ocurre exactamente esto y sólo esto? Porque han de conservarse simultáneamente la cantidad de movimiento y la energía cinética, es decir, en el caso de que caiga una sola bola tienen que cumplirse las dos ecuaciones:

$$mv = mv_1 + mv_2 + mv_3 + mv_4 + mv_5$$

$$mv^2 = mv_1^2 + mv_2^2 + mv_3^2 + mv_4^2 + mv_5^2$$

No podemos resolver el sistema de dos ecuaciones con cinco incógnitas pero muchas veces es más instructivo para los alumnos hacer un tanteo de posibles soluciones que ir directamente a una solución elegante porque ayuda a pensar en el significado físico de la ecuación matemática. Por ejemplo, la primera ecuación se cumple si las cinco bolas salen juntas con una velocidad cinco veces menor que v , la de la bola que llega:

$$mv = 5mv/5$$

pero ya no puede cumplirse la segunda, ya que:

$$mv^2 > 5mv^2/5^2 = mv^2/5$$

Podemos hacer el mismo tanteo numérico para el caso de que salieran disparadas cuatro, tres o dos bolas después de caer una y ver que tampoco en esos casos se pueden cumplir a la vez las dos ecuaciones que, en cambio, sí se cumplen cuando las aplicamos a los casos en que salen el mismo número de bolas que llegan. La solución elegante es muy fácil tomando sólo dos bolas, una en reposo y otra que cae. Se ve enseguida que la única solución es que la que llega quede parada y la otra salga a la velocidad de la primera. (Un ejercicio para los profes: planteando el problema con tres bolas se pueden encontrar soluciones reales distintas de lo que ocurre en la práctica. Podemos probar por ejemplo con la bola 1 cayendo a 2m/s. Si suponemos que la central sale a 1m/s, encontramos que la tercera sale a 1'618m/s y la primera rebota a -0'618m/s. Eso significa que, aunque las bolas se ven en contacto, los choques son sucesivos, es decir, que en cada instante sólo están involucradas dos bolas).

El segundo juguete con el que quiero hacer algunos cálculos es el *astroblaster*, que ha aparecido en el mercado hace sólo un par de años. Se trata de cuatro bolas que tienen distintas masas, ensartadas en una varilla que les obliga a un choque frontal. Si se dejan caer al suelo desde un metro de altura y se consigue, con un poco de práctica, que el conjunto se mantenga vertical hasta el momento del impacto con el suelo, la bola más pequeña saldrá despedida a una velocidad enorme y alcanzará una altura considerable. Viene con dos bolas pequeñas de repuesto porque es muy fácil perderlas.

Podemos observar que, al caer, las tres bolas mayores quedan prácticamente quietas en el suelo, así que toda la energía cinética se la lleva la pequeña. Si el choque fuera elástico -que no lo es en absoluto- podríamos calcular fácilmente la altura que alcanzaría usando la expresión de la energía potencial:

$$(m_1 + m_2 + m_3 + m_4) g h = m_4 g h'$$

Como las masas de las bolas del juguete son 70, 23, 8 y 4 gramos, resulta que h' es aproximadamente 26 veces superior a la altura inicial, claramente superior a la que alcanza en la realidad que es de entre 10 y 14 veces, dependiendo de la verticalidad de la caída. Podemos preguntar a nuestros alumnos dónde ha ido a parar el resto de la energía y tratar de que acepten que se han calentado las bolas, porque experimentalmente no podremos detectarlo. Creo que sólo los convenceremos martilleando con fuerza una moneda sobre un adoquín.

Surgen varias preguntas que podemos resolver con cálculos pero serían ya tediosos para los alumnos y, además, reiterativos. Por ejemplo: si el choque fuera elástico, ¿se alcanzaría la misma altura con sólo dos bolas, una grande con la masa de las tres primeras y una segunda con la de la más pequeña? La respuesta es No, porque en ese caso la bola grande rebota en vez de quedarse parada en el suelo, llevándose una parte de la energía cinética. Y entonces nos planteamos la siguiente: ¿qué relación de masas hace falta para que toda la energía cinética se la lleve la pequeña quedando en reposo la grande si ambas chocan a la misma velocidad pero en sentidos contrarios como ocurre en el astroblaster? La respuesta es $1/3$, que es precisamente la relación entre la primera y la segunda y entre ésta y la tercera. En fin, podemos llenar páginas de cálculos y encontrar que el juguete podría estar aún mejor diseñado si se quiere alcanzar la máxima altura pero que quizás razones de seguridad les ha llevado a dejarlo así. Seguramente por eso el coeficiente de recuperación de la bola pequeña es sólo de 0,4, la mitad del de las otras, para evitar un daño si impactara sobre un ojo. Por cierto, el nombre de astroblaster viene de que el fabricante pretende con él -y lo consigue- explicar las altísimas velocidades con que sale despedida la materia en las implosiones de las estrellas al final de su vida.



Figura 7

Y pasamos ya a los trompos, las peonzas y los giróscopos. Todos se basan en el efecto giroscópico, el hecho de que el movimiento de giro y su eje, lo que en Física se llama el momento angular y que es, para el giro, el equivalente a la cantidad de movimiento que hemos visto en las bolas de Newton, también se conserva. Podemos resumir así el efecto giroscópico: Cuando un cuerpo gira, tiende a mantener el mismo eje de giro de modo que, si una fuerza como el propio peso de la peonza, por ejemplo, quiere desviarlo, cabeceará de forma que los dos giros juntos, el que tenía pero que se ha desviado y el nuevo de cabeceo, que se llama movimiento de precesión, suman el mismo momento cinético que el que tenía al principio. No os preocupéis en absoluto si no lo habéis entendido del todo. Es una de las cuestiones más complicadas de la Mecánica y esto no es una clase. El caso es que hay montones de juguetes basados en este otro principio de conservación y el *trompo* y el *diávolo* son su paradigma aunque hay variantes muy interesantes al combinar el giro con otros fenómenos. Por ejemplo, la *peonza de tres colores* que nos permite ver cómo percibimos la suma de colores, la *peonza encantadora de serpientes* que tiene el eje ligeramente imantado o la *peonza*



Figura 8

que se da la vuelta (se la conoce con el nombre de *tippe-top*), un quebradero de cabeza para un físico y sobre la que se ha presentado en la Universidad de Augsburgo toda una tesina de 63 páginas llenas de cálculos diferenciales y gráficos. Por supuesto, el rey de las peonzas es el *giroscopio*, aunque es quizás menos atractivo para jugar.

Claro que estas magnitudes se conservan en ausencia total de rozamientos, lo que aquí, en la Tierra, es imposible pero los físicos siempre andamos idealizando las cosas, simplificando los hechos, porque la realidad es tan compleja que si no lo hiciéramos así, nunca se hubiera averiguado nada. Es decir, que como se roza

con todo, incluso con el aire, las bolas acaban parándose y los trompos también. ¿Habría algún juguete que se base en el rozamiento? Aquí lo tenemos: es el *marinero* que trepa por el hilo. Si nos fijamos bien, hace casi exactamente lo mismo que cualquiera de nosotros cuando intentamos trepar: apretamos la cuerda con las manos de modo que el rozamiento sea suficiente para sostener el peso de nuestro cuerpo y soltamos los pies. Entonces nos izamos con la fuerza de los brazos y encogemos los pies. Después apretamos los pies y aflojamos las manos. Ahora el rozamiento está en los pies, el cuerpo se sujeta por abajo y subimos usando las piernas. El marinero mantiene prácticamente el mismo rozamiento en las manos todo el tiempo pero aumenta y disminuye el de los pies al tensar y destensar el hilo.

JUGUETES PARA HABLAR DE ONDAS Y SONIDO

El más eficaz para introducir las ondas en nuestro jugar diario es el conocido como *slinky*. Es un muelle de unas 80 espiras con una constante de elasticidad muy baja que permite alargarlo más de cinco metros. Dejando fijo un extremo podemos producir pulsos en el otro y ver cómo se propagan a todo lo largo. Si atamos un lazo de color en medio observamos que el lazo sólo sube y baja, sin desplazarse lateralmente, lo que demuestra que la onda no transporta la materia de aquí para allá aunque sí transporta la energía de la vibración. Podemos lanzar a través del *slinky* pulsos longitudinales como los de las ondas en la superficie del agua o transversales, como en el sonido. Podemos ver la reflexión de las ondas en el extremo fijo, con cambio de fase o bien, uniendo ese extremo a una cuerda, reproducir la reflexión lábil, sin cambio de fase, al mismo tiempo que parte de la energía da lugar a una onda refractada en la cuerda. Por último, y eso es lo más atractivo para jugar, podemos producir ondas estacionarias, observando que sólo se producen para frecuencias determinadas, la fundamental, con media longitud de onda entre los dos extremos, el primer armónico de frecuencia doble, el segundo de frecuencia triple, etc. Se puede conseguir, al menos, hasta el cuarto armónico. Jugando de esta manera es fácil introducir los conceptos de intensidad, frecuencia, longitud de onda, nodos y vientres.

Si queremos dar un carácter cuantitativo al juego sólo nos hace falta un metro y un cronómetro. Podremos comprobar experimentalmente que la frecuencia propia de vibración del muelle, la fundamental o la de cualquiera de sus armónicos depende de la longitud total del muelle y de la tensión que le apliquemos. (Pasar de aquí a hablar de los trastes de una guitarra y las clavijas que tensan las cuerdas será sencillo si tenemos un alumno que la toque). ¿Será fácil medir la velocidad de propagación? ¿Dependerá también de la tensión del muelle?

Estamos ya preparados para jugar con un instrumento musical, la *cajita de música*. Las venden ahora sin ninguna cajita, sólo el mecanismo y, por eso, muy baratas y con múltiples melodías. Podemos ver el tornillo visinfín que hace girar el tambor con los dientes y la hoja de láminas vibrantes, cada una de una longitud distinta y que, por tanto, dará una nota distinta, tanto más aguda -mayor frecuencia- cuanto más corta sea. El problema es que es difícil que se oiga en todo el aula pero para eso pedimos ayuda a la resonancia. Basta con aplicarla a una mesa o cualquier otro mueble para que aumente espectacularmente la intensidad del sonido.

Terminaremos el capítulo de las ondas con el *tubo sonoro*. Es un tubo flexible de plástico coarrugado de 76 cm de longitud y 2'5 cm de diámetro. Si lo cogemos por un extremo y lo hacemos girar emite un sonido de aproximadamente 220 hercios. Es su tono fundamental. Si aumentamos la velocidad de giro aparece su primer armónico, un La de 440 hercios. Dándole todavía más deprisa conseguimos los siguientes múltiplos de 660, 880, 1100 y hasta el de 1320 hercios, seis notas en total.

Veamos un cálculo sencillo para el nivel de Bachillerato. En los tubos abiertos se forman vientres en ambos extremos y un nodo en el centro en el caso de la vibración fundamental, es decir, que dentro del tubo cabe media longitud de onda. Los vientres sobresalen ligeramente de los bordes por lo que se acepta que media longitud de onda corresponde a la longitud del tubo más la mitad del diámetro del mismo. En este caso, $1/2 \lambda = (76 + 1'25) \text{ cm} = 77'25 \text{ cm}$. Por tanto, $\lambda = 145'5 \text{ cm}$.

Como la frecuencia (ν) es igual a la velocidad de propagación dividida por la longitud de onda (λ) y el sonido se propaga en el aire a 340m/s, tenemos que el tono fundamental de este tubo es:

$$\nu = 340\text{m/s} : 1'545\text{m} = 220 \text{ hercios.}$$

En realidad el tubo se alarga ligeramente al girarlo rápidamente y la afinación no es perfecta. ¿Por qué no jugamos con los compañeros de música? Podemos naturalmente acortar los tubos para conseguir otros conjuntos de notas.

Queda algo por explicar. ¿Por qué suenan los tubos? En los instrumentos de viento hay que insuflar aire mediante los pulmones o un fuelle y este aire hace vibrar



Figura 9

una lengüeta. En éstos, la vibración se consigue por el coarrugado del tubo pero, ¿quién empuja al aire a fluir por el tubo? Es el efecto Venturi, de nuevo la Física. La diferencia de velocidad entre un extremo casi fijo, el que sujetamos con la mano, y el otro que está girando produce una diferencia de presión que empuja al aire. Cuando aumentamos la velocidad, aumenta esa diferencia de presión, el flujo es más intenso y el tubo pasa a vibrar con el siguiente armónico.

Por supuesto que el efecto Venturi, el que hace volar a los aviones, introduce la gasolina en el carburador del coche, mejora el tiro de las chimeneas y eleva el perfume de los antiguos pulverizadores, tiene su juguete correspondiente, *los ojos de cocodrilo*: al soplar por un tubito conectado a las cuencas de los dos ojos de una cabeza de cocodrilo se levantan éstos, que son dos bolitas muy ligeras, y se mantienen dentro del chorro de aire. Si nos movemos despacio sin dejar de soplar, los ojos, elevados sobre sus órbitas, nos irán acompañando.

JUGUETES PARA HABLAR DE ÓPTICA

Seguramente el juguete más simple puede ser un trozo de espejo plano. Con él hemos experimentado de niños con la reflexión de la luz, enviando mensajes a algún amigo. Si unimos dos o tres tiras de espejos colocados a 60° obtenemos el popular *caleidoscopio* que utiliza la reflexión múltiple.

La lupa siempre es fascinante, ya sea para concentrar los rayos del Sol (y quemar un papel) poniendo de manifiesto lo que es el foco de una lente o para dar imágenes aumentadas. Para jugar con lentes lo mejor es el *optic wonder* que tiene dos lentes convergentes y dos divergentes que podemos disponer en forma de anteojos de Galileo e incorpora además un espejo plano, al que podemos superponer una de las lentes convergentes y convertirlo en espejo de aumento, y una brújula. La versión *super optic wonder* añade un reloj de sol ecuatorial muy correcto, un clinómetro, un silbato y una linterna de señales con el alfabeto Morse. ¡Todo esto con el tamaño de un puño! No es *nanotecnología* pero sí un aprovechamiento al máximo del espacio.

Otro objeto que ya aparece como juguete es el *prisma* con el que podemos, entre otras cosas, descomponer la luz blanca en los colores del arco iris, un experimento que realizó Newton. Ya hemos hecho antes lo contrario: combinar colores y obtener toda la gama, incluido el blanco, a partir de los fundamentales con la *Peonza de colores*.

Hay un par de juguetes muy baratos (menos de dos euros) que funcionan con pilas: el *miniprojector*, un pequeño proyector de diapositivas (minúsculas) que incluye carrusel de 6 imágenes y ajuste de foco y la *fibra óptica* para explicar la conducción de la luz por reflexión total.

La joya de los juguetes de óptica, por la sorpresa que produce, es el *Mirage 3D*. Se trata de dos espejos parabólicos, uno con la parte reflectante hacia arriba y el otro, que tiene un agujero en su parte central, colocado hacia abajo sobre el primero, como si fuera una tapadera. En el fondo del primero, que resulta ser el foco del segundo, se coloca un objeto pequeño que queda oculto a la vista. Cada rayo de luz que sale del



Figura 10

objeto real se refleja en el espejo superior y baja verticalmente, paralelo al eje óptico, propiedad clave de los espejos parabólicos: todo rayo que pasa por el foco se refleja paralelamente al eje óptico y viceversa. Una vez que el rayo llega al espejo inferior, se refleja en él y sale pasando por su foco, que está exactamente en el agujero del de arriba, como se ve en el esquema. En ese foco se cruzan todos los rayos de luz procedentes del objeto.

El resultado es que el ojo humano sitúa el objeto en el punto del que parten los rayos que le llegan, situado encima del conjunto, fuera de ambos espejos, que es el foco del espejo de abajo. Ahí se forma una *imagen real* y el cerebro interpreta que ahí está el objeto. Sin embargo, si intentamos cogerlo sólo encontraremos aire entre los dedos.

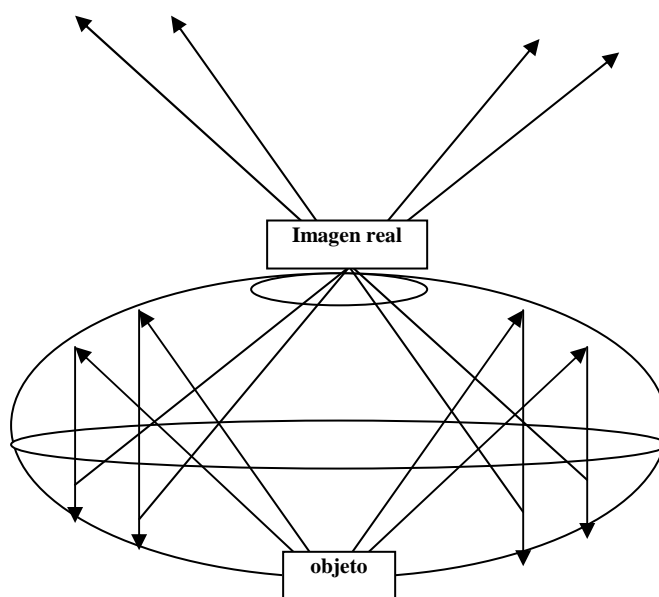


Figura 11

JUGUETES PARA HABLAR DE MAGNETISMO

¿Quién no se ha sentido atraído por los imanes? Primero por la brújula, esa aguja mágica que nos señala al Norte. Luego por las atracciones y repulsiones y, de niños, aprendimos enseguida que los polos de signo contrario se atraen y viceversa.

Hay multitud de juguetes que usan el magnetismo. Ya hemos visto la peonza encantadora de serpientes y los supuestos móviles perpetuos. El *delfin roller* es una especie de yoyo magnético y también podemos encontrar los *bailarines magnéticos*,

dos muñequitos, un chico que toca el acordeón y una chica que se pone a bailar cuando se le acerca el músico.



Figura 12

Para jugar exclusivamente con imanes se vende la *torre de imanes*, un conjunto de cinco imanes en forma de anillo ensartados en un lápiz. Con ellos podemos hacer que queden separados unos de otros si enfrentamos los polos del mismo signo, como si estuvieran levitando y parece inevitable que intentemos conseguir lo mismo sin la ayuda del lápiz que está haciendo de eje. Desgraciadamente, no podemos. No encontramos nunca el punto de equilibrio y uno de los imanes se desplaza o se da la vuelta para cambiar el polo y pegarse al otro.

Resulta que el teorema de Earnshaw, de 1839, demuestra que es imposible mantener en equilibrio estático un imán colocado sobre otro con los polos iguales enfrentados. Es como intentar dejar un lápiz en posición vertical sobre su punta. El equilibrio es tan inestable que la mínima perturbación, incluso el choque de una molécula de aire, lo tumba.

Sin embargo, Roy Harrigan, que sin duda al principio de su intento no conocía el teorema, se empeñó en conseguirlo. Si el problema es que el imán se gira y, según hemos visto, una peonza en movimiento tiende a mantener el eje de giro, ¿no se podría conseguir mantener la peonza en el aire levitando sobre un imán si ella es a su vez otro imán? Dicho y hecho. El juguete se llama *Levitron*, se patentó en 1983 y se va haciendo cada vez más popular. Cuando empieza a desequilibrarse comienza el movimiento de precesión y la peonza se mantiene girando en el aire durante un par de minutos, hasta que la velocidad de giro disminuye por el rozamiento con el aire hasta un límite mínimo. El equilibrio no es fácil de conseguir sin una buena práctica pero el resultado merece el esfuerzo del entrenamiento. Por supuesto que el Levitrón no desmiente el teorema de Earnshaw, éste es sólo válido para imanes en reposo.

OTROS JUGUETES

Creo que ya no quedan más juguetes sobre la mesa pero existen naturalmente muchos más que juegan con palancas, la fuerza centrípeta, la persistencia de la visión, incluso con la difracción de la luz, etc. y estoy seguro de que cualquier fenómeno físico es susceptible de convertirse en un juguete. Por ejemplo, las cámaras de burbujas que detectan el paso de partículas subatómicas cargadas eléctricamente, los electrones, piones o muones son aparatos carísimos que se utilizan en los grandes Centros de investigación de altas energías como el CERN de Ginebra formado por un consorcio en el que participan todos los países europeos. Sin embargo, ya se han abaratado lo suficiente para estar al alcance de un Museo de Ciencia. Pues bien, si

algún día se llegan a fabricar por poco dinero, tendremos juguetes con partículas subatómicas.

Pero no hace falta irse a lo más difícil. Vamos a acabar buscando un juguete que funcione con algo sutil y aparentemente imposible: la viscosidad del aire, ese rozamiento de los fluidos con sus propias moléculas y con las paredes que los rodean. ¿Se podrá hacer un juguete con la viscosidad del aire? Aquí lo tenemos: al soplar por el tubo, el hilo fluye de la botella arrastrado por la viscosidad del aire permitiendo describir vistosos bucles.

Espero que hayáis disfrutado jugando conmigo. Muchas gracias.