



Néstor Espinoza
Claudia Araya
Tatiana Tapia
Ignacio Becker
Jorge Anais
Jacqueline Rubio
Gonzalo Díaz

FÍSICA ITINERANTE: EL LIBRO

NÉSTOR ESPINOZA, CLAUDIA ARAYA, TATIANA TAPIA, IGNACIO
BECKER, JORGE ANAÍS, JACQUELINE RUBIO Y GONZALO DÍAZ

PRIMERA EDICIÓN, AÑO 2011

Impreso en Santiago de Chile de manera independiente.

Física Itinerante © 2011

PUBLICACIÓN INDEPENDIENTE

La distribución parcial o total de este libro está permitida sólo para fines no-comerciales. El grupo Física Itinerante se reserva el derecho a imprimir copias de este libro.

Copias de este libro en formato digital pueden ser obtenidos de manera gratuita desde el sitio web de Física Itinerante:

FÍSICA ITINERANTE

<http://www.fisicaitinerante.cl>

AUTORES

Espinoza, N., Araya, C., Tapia, T., Becker, I.,
Anais, J, Rubio, J. y Díaz, G.

EDICIÓN GENERAL

Néstor Espinoza & Claudia Araya

DISEÑO DEL LIBRO E ILUSTRACIONES

Néstor Espinoza

FOTOGRAFÍA E IMÁGENES

Gustavo Aguilar & Néstor Espinoza

CORRECCIÓN DE ESTILO

Nicolás González & Néstor Espinoza

ISBN: 978-956-345-826-8

CONTENIDOS

Prefacio	7
Agradecimientos	9
Alineamientos curriculares de los experimentos	11
1. Mecánica Clásica	13
Lanzamiento de proyectiles: el Cohete de Agua	14
Resultados contraintuitivos: las maravillas del Moméntum Angular	20
Resultados contraintuitivos pt. 2: el Imán Levitador	28
2. Termodinámica y Teoría Cinética	35
Latas que implotan	36
Expansión térmica	42
Vórtices	46
3. Electricidad y Magnetismo	53
El Electroscopio	54
El Electroimán y el Electromotor	58
4. Ondas	65
Oscilaciones y resonancia	66
Ley de Difracción	70

PREFACIO

Física Itinerante nace en el año 2005 con motivo del Año Internacional de la Física. A través de los años, nuestro principal objetivo ha sido llevar la ciencia tangible a los colegios de Chile, mostrando de las maneras que sean posibles que la Física está en todo: desde el primer respiro de nuestro día hasta la caída del Sol por las noches. El objetivo principal de Física Itinerante es, entonces, encantar con la ciencia pues ella es parte de nuestro diario vivir: Sólo tenemos que ponernos a mirar a nuestro alrededor para darnos cuenta que el verdadero laboratorio de ciencias se encuentra inmerso en nuestras vidas.

Nosotros creemos firmemente que la curiosidad es parte fundamental para apasionarse por las ciencias. Y la curiosidad viene dada principalmente al observar fenómenos que salgan “fuera de lo común” (aunque a veces hay fenómenos físicos que pueden estar más cerca de lo que aparentan). Cada experimento expuesto en este libro esta pensado justamente para eso: como una forma de motivar a los estudiantes a hacer ciencia, como una forma de mostrar la Física como algo lúdico, por que eso es. Cada Físico tiene un niño dentro que lo hace explorar, que lo hace preguntarse y cuestionar tanto como le sea posible para poder encontrar respuestas que, muchas veces, no muestran luces en los libros sino que en los mismos experimentos, en el hecho de sentir la necesidad de explicar lo que se está observando.

Este libro nace, entonces, ante la necesidad de querer expandir los conocimientos que hemos adquirido con el tiempo en torno a una serie de experimentos. Dichos conocimientos, claramente, no han salido únicamente de nosotros, sino que también de interesantes discusiones con profesores y estudiantes, tanto de la Facultad como de distintos colegios, así como también de nuestros intentos por explicar los fenómenos a nuestros seres queridos y cercanos. Han sido, de hecho, dichas discusiones las que nos han motivado a escribir este libro. Este es, entonces, una forma de sintetizar, si se quiere, todo lo aprendido por el grupo gracias al apoyo y aporte de distintas personas. En ese sentido, este es un libro “de todos , para todos”.

El libro se divide de acuerdo a las principales materias que sabemos los profesores deben cubrir en Física. El Capítulo 1 se dedica al área de la Mecánica Clásica, en donde se detallan experimentos como el Cohete de Agua, en donde hay aplicaciones a los conceptos de Moméntum e Impulso, el experimento del Momento Angular, en donde una rueda puede ser usada para explicar distintos efectos físicos relacionados con la conservación del moméntum angular y el Imán Levitador, el cual es una aplicación de los conceptos de variación y conservación del Momento Angular. El Capítulo 2 se dedica a explicar los conceptos de la Termodinámica y Teoría Cinética, en donde de una vez por todas se explica el concepto del Efecto Bernoulli y sus (mal)usos. En el Capítulo 3 se explican los conceptos relacionados con Electricidad y Magnetismo, en donde destacan experimentos realizados con imanes y la posibilidad de “crear” imanes de manera natural con la única ayuda de una pila. Finalmente, en el Capítulo 4 de este libro, presentamos experimentos relacionados con el área de Ondas, en donde tocamos distintos fenómenos que servirán para explicar la gran cantidad de fenómenos posibles de observar, desde las ondas de sonido hasta los fenómenos de las ondas electromagnéticas. Sin duda este último capítulo usa los conceptos introducidos y ocupados en los capítulos anteriores, por lo que recomendamos, en una primera lectura de este libro, leer todos los capítulos en el orden en el cual los hemos puesto: ¡no es coincidencia que las áreas tengan dicho orden!

Esperamos que los artículos para cada experimento, que hemos redactado con mucha dedicación, sean usados como referencia y no como una pauta a seguir: la diversidad en el estudiantado es tan inmensa que creemos imposible tener dos clases iguales, pero también creemos que aquello no un signo negativo del proceso educativo sino que todo lo contrario; es una oportunidad más para aprender nuevas formas de pensar y aprender (tanto por parte del profesor como del estudiante).

Finalmente, esperamos que el presente documento sea de utilidad y rogamos que, ante cualquier duda y/o crítica, se comuniquen con nosotros: la idea es no perder nunca el contacto con los colegios, pues son justamente ellos los verdaderos gestores de cambios en el tiempo: ¡les deseamos mucho éxito en este viaje científico!

Equipo de Física Itinerante, 2011

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría agradecer primero que todo a todas nuestras familias y amigos por la paciencia y apoyo que nos han brindado. Sin duda han sido parte fundamental de este trabajo ya que, sin ellos, éste no hubiese sido posible. Nos gustaría agradecer también a los encargados del Laboratorio Docente de la Facultad de Física de la PUC, por su siempre buena disposición y apoyo a nuestros proyectos: En particular nos gustaría agradecer al Sr. Arnaldo Vargas y a la Sra. Rosa Bahamondes que siempre nos han brindado todo el apoyo posible, tanto moral como material para nuestros proyectos. Nos gustaría agradecer también a Carlos Oliva, ex-periodista del Departamento de Astronomía y Astrofísica (DAA) y a Solange García, periodista de la PUC, por estar siempre al tanto de nosotros, apoyándonos con contactos y motivación: ¡muchas gracias por creer en nosotros!

No queremos perder la oportunidad de agradecer a los profesores que nos han brindado apoyo en la Facultad de Física: quisieramos agradecer al profesor Ulrich Volkmann por su excelente disposición para con el grupo tanto en ideas como en apoyo, sobretodo con la creación de los primeros maletines científicos, que fueron donados en el año 2008 a 25 colegios de Chile. También, queremos agradecer al profesor Andreas Reisenegger del Departamento de Astronomía y Astrofísica (DAA), que siempre nos ha brindado todo su apoyo y disposición para poder expandir nuestros proyectos, de manera que podamos llegar a más y más colegios con nuevas ideas, invitaciones y mucho entusiasmo. Por último, y no por ello menos importante, queremos agradecer al profesor Nelson Padilla del DAA por su siempre excelente disposición y entusiasmo a apoyarnos en lo que fuese posible, ayudándonos a gestionar proyectos incluso desde el extranjero.

También queremos agradecer a Rodrigo Herrera, Tomás Corrales y Felipe Navarrete, todos hoy estudiantes de doctorado, quienes a nuestros ojos mantuvieron vivo el proyecto y quienes nos lo dejaron a cargo. Muchas gracias por dejarnos esta maravillosa oportunidad de poder expandir la ciencia, de poder crear e innovar con proyectos que hoy vemos forman parte de la enseñanza de Física en el país.

Agradecer a un montón de personas: a Juan Andrés Saavedra (Juanpillán para los amigos), quien nos prestó ayuda totalmente desinteresada para armar el diseño del libro, a los chicos del grupo Física Itinerante que si bien no formaron parte del equipo que trabajó directamente en el libro, hicieron posible que este se hiciera realidad. En especial, a Fabiola Salinas y José Miguel Fernández, quienes fueron parte fundamental en esta parte final del trabajo en el equipo de Física Itinerante, a Isabel que nos presentó el experimento de la resonancia, a Gabriela que nos presentó experimentos varios...ja todos, gracias!

No podemos olvidar a las grandes instituciones que nos han apoyado y brindado apoyo, tanto en financiamiento como en orientación. Agradecer a la Dirección de Asuntos Estudiantiles de la PUC y a toda la gente que trabaja allí (jen especial la Sra. Ana María!) y, como no, al Ministerio de Educación por apoyar y financiar nuestros proyectos gracias a los Fondos de Desarrollo Institucional que nos otorgaron.

Finalmente, no queremos perder la oportunidad de agradecer a todos, absolutamente todos los que nos han ayudado a mejorar, a crecer y a nunca dejar de creer en este sueño: a los profesores de los colegios de Chile que siempre nos ayudaron a mantener vivo el proyecto con su entusiasmo y ganas de aprender y enseñar y a los estudiantes de los colegios que también nos han impulsado a continuar. A todos ellos: ¡muchas gracias!

ALINEAMIENTO CURRICULAR POR EXPERIMENTO

ENSEÑANZA BÁSICA

EXPERIMENTO	CURSO	UNIDAD EN BÁSICA
Cohete de Agua	5to Básico	<ul style="list-style-type: none">Unidad 2. Fuerza y movimiento: movimiento rectilíneo.
Momentum Angular	7mo y 8vo básico	<p>7mo básico</p> <ul style="list-style-type: none">Unidad 2. Fuerza y Movimiento: las fuerzas de la Tierra y el espacio. <p>8vo básico</p> <ul style="list-style-type: none">Unidad 3. Tierra y Universo: dinamismo de la Tierra.
Latas que implotan	8vo básico	<ul style="list-style-type: none">Unidad 1. Materia y sus transformaciones: modelos atómicos y gases ideales.
Expansión térmica	8vo básico	<ul style="list-style-type: none">Unidad 1. Materia y sus transformaciones: modelos atómicos y gases ideales.
Electroscopio	6to básico	<ul style="list-style-type: none">Unidad 2. Fuerza y movimiento: energía eléctrica.
Electroimán y electromotor	6to y 8vo básico	<p>6to básico</p> <ul style="list-style-type: none">Unidad 2. Fuerza y movimiento: energía eléctrica. <p>8vo básico</p> <ul style="list-style-type: none">Fuerza y movimiento: fenómenos eléctricos.

• ENSEÑANZA MEDIA

EXPERIMENTO	CURSO	UNIDAD EN MEDIA
Cohete de Agua	2do medio	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerza y movimiento: Newton, aceleración y moméntum.
Momentum Angular	2do y 3ero medio	<p style="text-align: center;">2do medio</p> <ul style="list-style-type: none"> • La Tierra y el Universo: Kepler <p style="text-align: center;">3ero medio</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fuerza y movimiento: momento angular.
El imán levitador	3ero y 4to medio	<p style="text-align: center;">3ero medio</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fuerza y movimiento: momento angular. <p style="text-align: center;">4to medio</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fuerza y movimiento: magnetismo.
Latas que implotan	2do y 3ero medio	<p style="text-align: center;">2do medio</p> <ul style="list-style-type: none"> • La materia y sus transformaciones: teoría cinética. <p style="text-align: center;">3ero medio</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fuerza y movimiento: hidrostática.
Expansión térmica	2do medio	<ul style="list-style-type: none"> • La materia y sus transformaciones: teoría cinética, propagación del calor.
Electroscopio	4to medio	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerza y movimiento: electricidad.
Electroimán y electromotor	4to medio	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerza y movimiento: electromagnetismo
Ley de Difracción	1ro medio	<ul style="list-style-type: none"> • La materia y sus transformaciones

CAPÍTULO 1: MECÁNICA CLÁSICA

Lanzamiento de proyectiles: el cohete de agua

Ignacio Becker

LICENCIADO EN ASTRONOMÍA | PUC

ignacio.becker@fisicaitinerante.cl

Néstor Espinoza

ESTUDIANTE DE LIC. EN ASTRONOMÍA | PUC

nestor.espinoza@fisicaitinerante.cl

Resumen

El siguiente experimento, en el que se construye un cohete de agua con una botella de plástico, busca desglosar los conceptos de **moméntum lineal, su conservación, impulso y presión**. Se presenta un sistema de lanzamiento en base a tubos de PVC y un bombín, el que será de utilidad para darle flexibilidad al experimento y extenderlo a otras áreas, tales como la dinámica de lanzamiento parabólicos o fluidos, entre otros.

Introducción

Los cohetes han sido por años una fuente de inspiración científica. En el presente experimento se pretende realizar uno de simple construcción y ejecución. Preguntas como ¿qué es el moméntum?, ¿cómo se puede experimentar?, ¿qué es el impulso?, ¿qué es la presión, y dónde está presente? son comunes y este experimento pretende, justamente, explicitar dicha cotidianeidad: en la vida diaria estos fenómenos **están presentes** pero, al parecer, pasan casi desapercibidos ante nuestros ojos.

Las propiedades claves a observar en el experimento son:

1. **Conservación de moméntum.** El moméntum (\vec{P}) es una magnitud vectorial que se conserva en cualquier sistema no disipativo,

es decir, sin fuerzas externas. No tiene unidades especiales, se mide en $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}$ (kilogramos-metro partido por segundo) en unidades del Sistema Internacional (SI).

2. **Presión.** Magnitud vectorial que mide la fuerza que existe sobre unidad de superficie. En unidades del SI, se mide en pascles (Pa), en donde un pascal es igual a un N/m^2 (newton por metro cuadrado). 1 Pa es pequeño en la vida diaria. Los pies de una persona soportan alrededor de 10^3 Pa y la presión atmosférica es del orden de 10^4 Pa.
3. **Impulso.** El impulso es una magnitud vectorial que imprime una variación de moméntum en los objetos. Tiene las mismas unidades que el moméntum y es proporcional a la fuerza aplicada y al tiempo en el que se aplica esta fuerza.

MATERIAL	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	PRECIO TOTAL	REFERENCIA
Tubo PVC (50 mm, 3m)	\$1.730	3	\$5.169	Homecenter Sodimac.
Conector de 90 grados PVC (con rosca)	\$590	1	\$590	Homecenter Sodimac.
Bombín	\$7.990	1	\$7.990	Homecenter Sodimac
Válvula de inyección (cámara)	\$1.790	1	\$1.790	Homecenter Sodimac
Tapa gorro PVC	\$774	1	\$774	Homecenter Sodimac
Amarras plásticas (pack de 10)	\$2.990	1	\$2.990	Homecenter Sodimac
Abrasadera	\$1.890	1	\$1890	Homecenter Sodimac
Pegamento PVC	\$1.910	1	\$1.910	Homecenter Sodimac
Seguro PVC	\$1.240	1	\$1.240	Easy
Huincha aisladora	\$690	1	\$690	Homecenter Sodimac
Goma Eva	\$950	1	\$950	Librería Nacional

Tabla 1.1. Tabla con materiales para la construcción del Cohete de Agua. El precio total del experimento es de \$25.983.

Procedimiento de armado del Cohete de Agua.

Para el procedimiento de armado del Cohete de Agua necesitaremos las siguientes herramientas:

- Taladro.
- Tijeras.
- Pegamento adherente para PVC.
- Sierra.

Construcción

El procedimiento de construcción del Cohete de Agua es el siguiente:

1. Cortar dos segmentos de PVC de, aproximadamente, 1 metro de largo.
2. Pegarlos muy bien al conector de 90 grados.
3. Con el taladro, hacer un orificio en el centro de la tapa de PVC para que la válvula pueda pasar.
4. Cortar alrededor de la válvula en forma circular, con igual diámetro que la tapa de PVC,

para que se pueda pegar la mayor cantidad de superficie y evitar fugas.

5. Pegar la válvula en la parte interior del conector, de forma que la parte principal pase por el agujero sin problemas.
6. Pegar la tapa modificada a uno de los tubos, sellando bien cualquier posible fuga de aire.
7. Enrollar huincha aisladora a 30 cm aprox del tubo con el extremo libre, y así formar un tapón para la boca de la botella. Usando una pequeña tira de goma eva, de no más de medio milímetro de ancho, rodear el tubo en el lugar donde vaya a ir la boca de la botella y cubrirlo con huincha aisladora.
8. Poner 8 amarras plásticas verticales alrededor del tubo, haciendo que que el seguro de la amarra quede mirando hacia la botella. Con la abrazadera, fijar las amarras plásticas fuertemente.

Como tip de construcción, la sierra se puede reemplazar con un cortacartón. Costará cortar un poco los tubos, pero es mucho más fácil de conseguir. Si se hace así, hay que limar un poco los extremos ya que quedarán muy dispares. Para

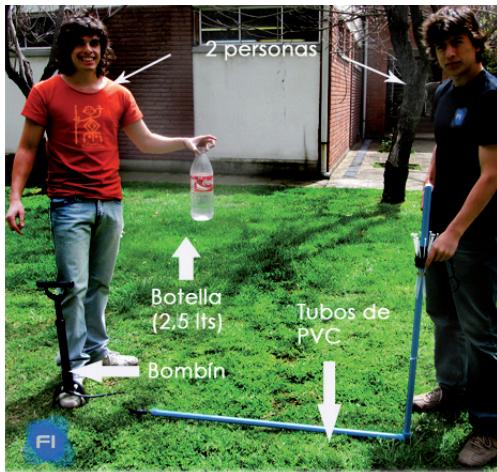


Figura 1.1. Resultado final del armado del Cohete de Agua. En la Figura, se muestran también los implementos necesarios para el lanzamiento: dos personas, un bombín y una botella de plástico.

ello, basta con raspar el extremo del tubo contra el cemento.

Por otro lado, el taladro se puede reemplazar por un clavo caliente. Tarda más que con el taladro, pero el objetivo final es hacer un orificio suficientemente ancho para que entre la válvula. Un punzón también podrá hacer el trabajo, pero se tendrá que usar un poco de fuerza. Para que el pegamento de PVC actúe de la mejor forma, se recomienda aplicarlo y esperar aproximadamente 30 segundos. El pegamento derretirá el PVC haciendo mucho más fácil introducir los tubos: ¡recuerde ventilar muy bien!

Hay que asegurarse de que todo quede muy bien pegado, ya que cualquier fuga puede estropear el experimento. En especial, tener cuidado al cortar y pegar la válvula, que es ahí donde es crítico que el aire no se fugue.

El resultado final del armado del cohete se puede observar en la Figura 1.1.

Lanzamiento del Cohete

Para lanzar el cohete de agua, basta con seguir los siguientes pasos (se requieren dos personas para hacerlo):



Figura 1.2. (Izquierda) Muestra de la cantidad de agua a poner en la botella. (Derecha) Ejecución del bombeo de aire.



Figura 1.3. Posicionamiento de las amarras plásticas en la botella

1. Conectar el bombín a la válvula y ubicarlo en posición vertical.
2. Llenar la botella hasta el área marcada en la Figura 1.2. Si se llena más, entrará demasiada agua al interior del tubo. Afirmar bien el bombín con el pie para evitar que se caiga el cohete.
3. Al poner el cohete en el tubo, aprete suavemente el seguro sobre las amarras, como se muestra en la Figura 1.3. Si escucha un clic, es tiempo de dejar de apretar. Si aprieta demasiado, el seguro no bajará con sólo tirarlo y habrá que volver a realizar el lanzamiento.

- Afirmar bien la botella al tubo, mientras se bombea lo más vertical posible, para evitar mover la botella y evitar que el lanzamiento sea en un ángulo no controlado, que podría resultar en un accidente.

Preguntas con respuestas

Se recomienda variar la cantidad de agua y la cantidad de bombeos, así como también el ángulo del cohete. De preferencia, tratar de medir el alcance en pasos, o alguna unidad simple.

Pregunta 1. ¿Por qué es importante el agua en el experimento?

El agua es lo que le dará moméntum inicial al cohete lo que, por tanto, le da su velocidad inicial. Como veremos más adelante, sin el agua, el cohete no tendría suficiente moméntum para salir volando lejos.

Pregunta 2. ¿Cuál es la distancia máxima que puede alcanzar el cohete?

La altura máxima depende de la cantidad de agua y de la cantidad de bombeos realizados, como veremos más adelante. El cohete puede salir varios pisos vertical, pero no se recomienda lanzarlo horizontalmente, ya que dada la velocidad de la botella, podría resultar muy peligroso.

Pregunta 3. ¿Cuántas veces tengo que bombear?

Para lograr resultados aceptables, conviene bombear entre 10 y 15 veces para que el cohete alcance una altura aceptable, aunque si se bombea mucho no importa tanto, ya que cuando la botella esta en el aire, no se distingue exactamente la altura en la que está.

Ecuaciones relevantes para los experimentos

En la presente sección se indaga sobre la teoría de los proyectiles para poder experimentar con mayor detalle. Lo que aquí se propone es opcional, pero se recomienda estudiarlo en detalle, para tener una idea general y muy útil del fenómeno.

Lo fundamental en el movimiento de un proyectil es la conservación de moméntum. El moméntum

es una cantidad vectorial, es decir, tiene magnitud, dirección y sentido, por lo que hay que especificar estas 3 cantidades. Este relaciona la masa de un cuerpo con su velocidad de la siguiente forma:

$$\vec{P} = m\vec{v}$$

Un punto importante es que, como toda cantidad vectorial, el moméntum puede ser descompuesto por dimensiones. De esa manera, para efectos del movimiento en una sola dirección, podemos preocuparnos solamente de cantidades escalares.

Teniendo lo anterior en consideración, ¿cómo es que el cohete sale disparado hacia arriba? En primer lugar, debemos intentar comprender que pasa al bombear aire dentro de la botella. Al bombear aire, lo que estamos haciendo es aumentar el número de partículas presente dentro de la botella. La Ley de los Gases ideales:

$$PV = Nk_bT$$

Donde P es la presión, V el volumen, N el número de partículas, k_b la constante de Boltzman (igual a $1,38 \cdot 10^{-23}$ Joules por Kelvin) y T es la temperatura, justamente predice un aumento de presión si el número de partículas aumenta, si la temperatura y el volumen se mantienen constantes en la botella (lo que sabemos se cumple). Obsérvese que esto tiene bastante sentido: mientras mayor sea el número de partículas, más "apretadas" estarán estas dentro de la botella.

Recordemos que la presión se define como fuerza por unidad de área. Por tanto, al estar aumentando la presión, estamos aumentando dicha fuerza por unidad de área en la boquilla de la botella. Al liberar la boquilla entonces para que el agua pueda salir, este fuerza es aplicada sobre el agua, generando un impulso inicial que genera, justamente, la velocidad inicial del agua (que sale disparada hacia el suelo). Lógicamente, esto es porque el impulso le transfiere moméntum a dichas partículas de agua. Recordemos que el impulso se define como:

$$\vec{I} = \vec{F}\Delta t$$

Y, por tanto, mientras mayor sea la fuerza inicial, lo que equivale a decir que mientras mayor sea la presión inicial de la botella, mayor moméntum

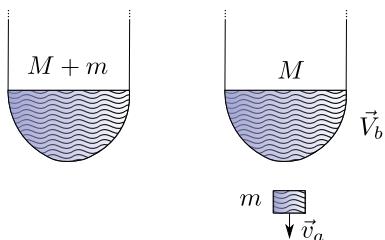


Figura 1.4. Modelo Físico de los instantes “iniciales y finales” de la botella usada en el Cohete de Agua cuando este expulsa un chorro de agua.

inicial generaremos (i.e. la botella saldrá disparada más rápidamente). Ahora podemos entonces, teniendo en consideración este moméntum inicial del agua, que sale disparada hacia el suelo, calcular cual será la velocidad de la botella (y en que dirección saldrá).

En el diagrama de la Figura 1.4 se observan los instantes inicial (antes de que el agua pueda salir libremente de la botella) y final, que corresponde al instante cuando dicho chorro de agua escapa de la botella. La masa m representa la masa de dicho chorro de agua, mientras que la masa M representa la masa del agua que queda en la botella. Por otro lado, v_a representa la velocidad del agua al salir eyectada, mientras que V_b representa la velocidad de la botella (que es lo que queremos encontrar). Con esto en mente, podemos escribir los moméntums iniciales y finales como:

$$\vec{P}_i = 0$$

$$\vec{P}_f = -m\vec{v}_a + M\vec{V}_b$$

(Nótese el signo negativo de la velocidad del agua, pues esta sale disparada hacia abajo). Ahora bien, debido a que el moméntum se conserva, podemos igualar ámbas ecuaciones con lo que despejando la velocidad de la botella obtenemos:

$$\vec{V}_b = \frac{m\vec{v}_a}{M}$$

¡La que efectivamente es una velocidad hacia ar-

riba (por el signo positivo)! Este resultado nos permite ver dos cosas muy interesantes. Primero, la velocidad de la botella aumenta de manera proporcional a la masa que esta dentro del cohete de agua: jesta es la razón por la cual se le pone agua al cohete! Si sólo tuviése aire en su interior, el moméntum no sería suficiente como para lanzarla tan alto como observamos si sucede con el agua (además de que sería bastante más inestable pues la botella poseería menos moméntum). Por otro lado, mientras mayor es la velocidad del agua, mayor es la velocidad inicial del cohete también: ¡mientras más bombeamos aire, entonces, mayor velocidad inicial tendrá nuestro cohete de agua!

Nótese, aún así, que la anterior explicación es sólo una aproximación al inicio del problema. A medida que el cohete de agua sigue subiendo el problema se torna más complejo: tenemos gravedad, roce, el agua se va acabando, etc. Aún así, la descripción anteriormente mostrada sirve como un referente para entender los distintos fenómenos que estan siendo parte del movimiento del cohete de agua.

Extensiones del experimento

El experimento presentado puede ejemplificar muy bien conceptos como moméntum y presión y, en un análisis más detallado, estudiar el movimiento parabólico y los parámetros relevantes, como velocidad inicial, ángulo de lanzamiento, distancia máxima y altura máxima.

Otra extensión natural del experimento es intentar darle distintas formas a la botella lanzada: ¿afectará el hecho de que posea un diseño más aerodinámico? Una buena idea sería, entonces, agregarle alas a la botella y ver si el movimiento de la misma en el aire es más estable.

Proposición de actividades

Para un análisis más exhaustivo del movimiento del Cohete de Agua, se recomienda el siguiente experimento. Ha de realizarse en un lugar abierto, ya que se necesita mucho espacio para realizarlo:

1. Cargar el cohete con una cantidad fija de agua. Se recomienda marcar una línea en la botella para evitar errores al cargarlo.

2. Bombar una cantidad fija de veces el bombrín. Realizar bombeos completos, para que así se tenga presión constante a lo largo de las repeticiones.
3. Lanzar el cohete en distintos ángulos, partiendo de 90° e ir anotando la distancia que recorre la botella, en pasos o metros (o cualquier otra unidad).
4. Encontrar el ángulo en que la distancia horizontal es máxima.
5. ¿Era esperable el resultado? Considere modificaciones que podrían hacerse para obtener alcances mayores. Por ejemplo: ¿existirá una cantidad de agua óptima para la cual se maximice el alcance?, ¿existirá una cantidad de bombeos fija?

Referencias

1. Ishii, N. (2008), *Cohetes de Agua: manual del Educador*. Organismo de exploración aeroespacial del Japón.
2. Kagan, D. (1995), *Soda Bottle Water Rockets*, Phys. Teach. 33, pp. 150.
3. Gommes, C. (2009) *A more thorough analysis of water rockets: Moist adiabats, transient flows and inertial forces in a soda bottle*, Am. J. Phys. 78, pp 236.
4. Barrio-Perotti et. al (2010), *Theoretical and experimental analysis of the physics of water rockets*, Eur. J. Phys. 31, pp. 1131.

Resultados constraintuitivos: las maravillas del Moméntum Angular

Néstor Espinoza

ESTUDIANTE DE LIC.EN ASTRONOMÍA | PUC

nestor.espinoza@fisicaitinerante.cl

Resumen

La siguiente serie de experimentos, que ocupan desde una simple rueda de bicicleta hasta una silla giratoria, pretenden desglosar las maravillas del entendimiento del **moméntum angular, momento de inercia y torque** gracias a resultados experimentales altamente constraintuitivos. Estos conceptos, que usualmente son introducidos en el área de dinámica rotacional y sólidos rígidos, mostrarán ser una de las grandes aplicaciones de la primera ley de Newton y una natural extensión de los conceptos de moméntum lineal y, en general, de la segunda ley de Newton a movimientos con rotación.

Introducción

El rango de fenómenos que pueden ser detallados con el análisis de la mecánica rotacional es altísimo. A toda escala (incluso a nivel atómico) conceptos como el momento de inercia o el moméntum angular son fundamentales para comprender la Física que gobiernan los distintos sistemas. Aún así, es común encontrarse con muchas preguntas con respecto a dichos conceptos y, en especial con respecto al moméntum angular, ¿qué es?, ¿cómo lo podemos experimentar?, ¿qué tan útil es? Como veremos, este concepto puede ser la mejor carta si lo que se quiere es asombrar con la Física.

Las propiedades claves a observar en los experimentos a presentar son:

1. **Moméntum Angular.** El moméntum angu-

lar (\vec{I}) es una magnitud vectorial que viene a formular el análogo del moméntum lineal en movimientos que incluyen rotación. No tiene unidades especiales asociadas, siendo medido en $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ (kilogramos-metro cuadrado por segundo) en el Sistema Internacional. Análogamente al moméntum lineal, éste se conserva siempre y cuando no exista un torque neto sobre el sistema.

2. **Torque.** El torque ($\vec{\tau}$) también podría formularse como el análogo de lo que entendíamos por fuerzas cuando se incluye rotación en el sistema. Este tampoco posee unidades especiales asociadas, pero se mide en $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$ (kilogramos-metro cuadrado por segundo cuadrado) en el Sistema Internacional.
3. **Momento de Inercia.** El momento de inercia de un sistema intenta representar "cuánta

“inercia” posee un cuerpo, lo que lógicamente dependerá de la distribución geométrica de la masa de un sistema. En palabras más simples, es la “resistencia” que ejerce un cuerpo a rotar. Tampoco tiene unidades de medida especiales asociadas, y es medido en $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ (kilogramos-metro cuadrado) en el Sistema Internacional.

El experimento de la rueda colgante

En el presente artículo, nos enfocaremos en el estudio de dos de los más comunes experimentos de la mecánica rotacional: el experimento de la rueda de bicicleta y el experimento de la silla giratoria.

El primero consiste en una rueda de bicicleta a la que se le agrega un eje de metal u otro material, de manera que la misma pueda rotar mientras uno la sostiene. Uno de los experimentos más simples de hacer con esta rueda consiste en primero intentar cambiar la dirección en la que apunta el eje con los brazos estirados hacia adelante sosteniendo la rueda por el eje con ambas manos (una a cada lado). Luego, la idea es intentar el mismo experimento pero ahora con la rueda en movimiento. La diferencia en esfuerzo para cambiar la dirección a la que apunta el eje de la rueda será notable. Aún así, el experimento que nos interesa en el presente artículo es mucho más atractivo y se hace de la siguiente manera:

1. Consiga una cuerda gruesa (necesitamos colgar la rueda, por lo que debe al menos resistir el peso que provocará la rueda) y haga un nudo uniendo sus extremos, de tal manera de formar un lazo.
2. En un lugar abierto, cuelgue el lazo que acaba de armar.
3. Posicione uno de los ejes de la rueda en la parte del lazo que ha quedado colgando, mientras la sostiene con una mano desde el eje que queda libre (en realidad, acá nos percatamos que la cuerda no es del todo necesaria. Podríamos usar un dedo de nuestra mano para poder usar de sostenedor, que es el rol que ocupa la cuerda).
4. Haga girar la rueda lo más rápido posible y suéltela. El sistema armado (y girando) se



Figura 2.1. Diagrama del sistema para el experimento de la rueda.

indica en la Figura 2.1., donde ω_0 denota la velocidad angular¹ agregada por nosotros a la rueda.

Hay dos cosas interesantes de notar y que serán detalladas en las siguientes secciones. En primer lugar, al hacer girar la rueda **esta no cae el suelo** como uno podría esperar, sino que queda “suspendida” en la cuerda, afirmada por un solo eje. En segundo lugar, la rueda no se mantiene en esa única posición, sino que además gira alrededor de la cuerda con una cierta velocidad angular (que en la Figura 2.1 hemos denotado por ω).

El experimento de la silla giratoria

El siguiente experimento que cubriremos será el de la silla giratoria. Este experimento es bastante simple y tiene muchísimas variantes, las que enumeramos a continuación:

1. **El experimento clásico.** Siéntese en la silla giratoria e impúlsese (o pídale a alguien que le aplique un impulso) de manera de girar en la silla. Extienda sus brazos y ponga atención a la velocidad angular con la que está girando. Luego, junte sus brazos y note la diferencia en dicha velocidad. Si puede conseguir mancuernas, repita el experimento sosteniéndolas con sus manos: el efecto será más notorio aún.

¹ La velocidad angular, usualmente denotada por la letra griega ω (omega), representa la cantidad de ángulo girado por unidad de tiempo. Esta cantidad es medida en radianes por segundo (rad/s) en el S.I.



Figura 2.2. Diagrama del giro de la rueda. La flecha que apunta hacia arriba representa la normal desde el suelo.

2. **Girando con la rueda.** Siéntese en la silla giratoria con la rueda de bicicleta en sus manos, sosteniéndola de tal modo que el eje de giro de la rueda forme un ángulo de 90 grados con la normal desde el suelo. Pídale a alguien que haga girar la rueda. Luego, gire lentamente la rueda, como si estuviese intentando alinear el eje de la rueda con la normal, tal como se muestra en la Figura 2.2...¡note que el que gira ahora es usted!
3. **Haciendo girar la rueda...¿sin impulso?** Siéntese en la silla giratoria con la rueda en sus manos, pero esta vez mantenga el eje de la rueda en la misma dirección que la normal desde el suelo. Impúlsese (o pida que lo impulsen) para poder girar con la silla: ¡nota que la rueda empieza a girar...en dirección contraria a la que ud. está girando?

Desglosando el Moméntum Angular

Los fenómenos observados en los experimentos anteriormente expuestos sin duda dejan más preguntas que respuestas sobre los fenómenos que nos propusimos desglosar inicialmente. Sin duda muchos de los resultados observados en estos son contraintuitivos...¿cómo puede esto ayudar a desenvolver la física detrás de los sistemas expuestos? Eso es justamente lo que intentaremos explicar a continuación.

En primer lugar, queremos hacer notar que todos los experimentos anteriormente expuestos podrían explicarse, a grandes rasgos, en función del ya

mentionado **moméntum (o momento) angular**, también llamado “moméntum rotacional”. Este moméntum es análogo al moméntum lineal visto en movimientos rectilíneos pero aplicado ahora a movimientos en torno a ejes y no es más que una aplicación de la primera ley de Newton, que asegura que los cuerpos continuarán con la cantidad de movimiento (moméntum) con la que fueron dejados inicialmente a no ser que una fuerza externa los obligue a cambiar dicha cantidad. La diferencia es que, en este caso este moméntum depende no sólo de la velocidad de giro del cuerpo en torno al eje sino que además de la distribución de la masa del cuerpo, comúnmente denotada como la **inercia rotacional del cuerpo** (o **momento de inercia**). Esta inercia juega el papel análogo a la masa en el caso del moméntum lineal. Mientras más lejos estén las masas de un eje, mayor inercia rotacional poseerá el cuerpo y, por tanto, más costará hacerlo girar (o hacerlo cambiar su moméntum angular)². En ese sentido, la inercia rotacional o momento de inercia de un cuerpo es algo así como la “resistencia” que tiene el cuerpo a modificar su rotación.

Tal como en el caso del moméntum lineal, el moméntum angular también se puede transmitir entre cuerpos y, más aún, es también una cantidad vectorial. Así, el experimento de la rueda que queda “colgando” en la cuerda podría explicarse argumentando que, como las partículas de la rueda están obligadas a siempre mantenerse girando en círculos, es decir, poseen un cierto moméntum angular, la rueda se mantiene estable en la posición en la cual la dejamos. De este modo, lo único que tiende a caer inicialmente debido a la gravedad es el centro de masas del sistema, el cual es sostenido por la cuerda.

Los experimentos de la silla giratoria pueden explicarse de manera similar. En el primer caso, si nos impulsamos teniendo inicialmente los brazos abiertos, adquiriremos un cierto moméntum angular. Al juntar los brazos hacia el eje de giro, la masa estará distribuida más cerca de dicho eje, lo que implica que tendremos menos inercia rotacional (menos “resistencia a movernos”), por lo

2 ¿Ha notado, por ejemplo, que en las películas de vaqueros, cuando estos lanzan sus sogas para atrapar animales (o bandidos), parten girándola desde un radio muy pequeño? ¡Justamente es más fácil darles moméntum de esa manera!

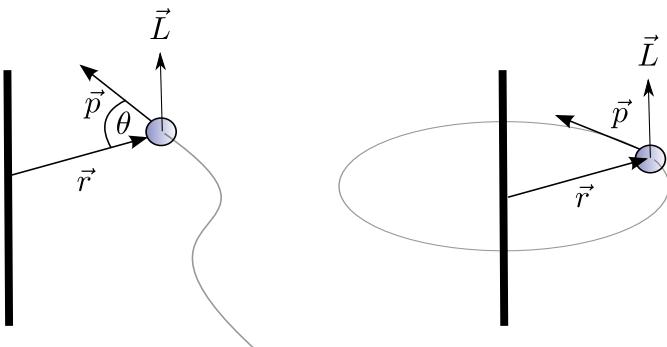


Figura 2.3. (Izquierda) Diagrama de una partícula moviéndose con moméntum lineal \vec{p} , a una distancia r del eje de giro. (Derecha) Diagrama de una partícula moviéndose en un círculo alrededor del eje de giro (nótese que en este caso el ángulo entre \vec{p} y \vec{r} es de 90 grados).

que la velocidad de giro aumenta. Para el caso de los dos experimentos restantes con la silla giratoria ("Girando con la rueda" y "Haciendo girar la rueda...¿sin impulso?"), lo que sucede es algo magnífico con lo que respecta al moméntum angular: este es transferible. En el primero de estos experimentos, el sistema compuesto por nosotros y la rueda no tenía momento angular con respecto al eje de la normal desde el suelo (no había nada girando en esa dirección). Al ir doblando lentamente la rueda como en la Figura 2.2, esta genera moméntum angular con respecto a dicho eje en una determinada dirección por lo que, para mantener el moméntum angular tal y como estaba en un principio, nosotros giraremos en la dirección contraria a la de la rueda (ipues el moméntum angular inicial del sistema en el eje de la normal era cero!). La misma explicación es aplicable al segundo caso, en el que los que agregan moméntum angular al sistema en el eje de la normal somos ahora nosotros.

Probablemente las explicaciones anteriores suenan convincentes, pero hay muchos detalles sin resolver aún. Por ejemplo, tal como se muestra en la Figura 2.1, en el experimento de la rueda "colgante" esta gira (precesa) en torno a la cuerda con una velocidad angular determinada: ¿por qué? Este y otros detalles más serán explicados en la siguiente sección, en donde será necesario ir un poco más en detalle en las ecuaciones que gobernan la dinámica rotacional.

Ecuaciones Relevantes en dinámica rotacional

En esta sección se re-introducen definiciones y demostraciones clásicas de dinámica de rotaciones. Esta y la próxima son opcionales, pero es recomendada su lectura si se pretende aplicar los experimentos con estudiantes de Enseñanza Media.

Iniciamos la discusión con la definición del momento angular \vec{L} de una partícula. Supondremos que la partícula se mueve a una distancia r dada de un eje de giro, donde denotaremos el vector que va desde el eje a la partícula por \vec{r} . Dicha partícula también tiene un moméntum lineal que denotaremos por \vec{p} (como se muestra en la Figura 2.3, a la izquierda). De esta manera, el moméntum angular se define como:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} \quad (2.1)$$

Esta definición incluye un tipo de producto que no es el producto escalar típico, sino que es llamado un producto vectorial: el producto cruz. Se le llama producto vectorial pues es el producto de dos vectores (el vector que va desde el eje de giro hacia la partícula y el vector que va en la dirección del moméntum lineal), el que tiene como resultado un nuevo vector (el del momento angular) perpendicular a los anteriores. Encontrar la dirección del vector resultante es usualmente tedioso, por lo que usualmente se usa una regla para encontrar dicha dirección: la regla de la mano derecha. La regla permite encontrar la dirección

del vector resultante como sigue: con nuestros dedos de la mano derecha, apuntamos al primer vector que aparece en el producto (\vec{r}). Luego, giramos nuestra mano hacia el siguiente vector (\vec{p}). La dirección de nuestro vector resultante, \vec{L} , vendrá dada por el dedo pulgar. La magnitud de este vector resultante, por otro lado, viene dada por:

$$L = rpsen(\theta)$$

Donde las letras sin la flecha encima denotan las magnitudes de los vectores y θ es el ángulo formado entre el vector \vec{r} y el vector \vec{p} (véase la Figura 2.3). En el caso en el que la partícula esté girando en un círculo, el momento angular vendrá dado por:

$$L = rp = rmv$$

Lo que también puede escribirse en términos de la velocidad angular de dicha partícula³:

$$L = rmv = r^2m\omega$$

Nótese que para el caso de una partícula girando en una circunferencia, el seno del ángulo entre los vectores involucrados es 1 (seno de 90 grados), por lo que en este caso especial la magnitud del vector momento angular es justamente igual al producto de las magnitudes de dichos vectores.

En general, tal como habíamos anticipado, el momento angular efectivamente es mayor si la velocidad de giro es mayor (término que está incluido en el momento de la partícula, lo que a su vez está incluido en la velocidad angular de la misma) y, como también habíamos predicho, el momento angular es mayor si la masa está más lejos del eje.

Podemos generalizar la teoría anterior para el caso de sólidos que giran alrededor de un eje, en donde ahora tomaremos la suma de los momentos angulares de cada una de las partículas que forman el sólido. Nótese que, en este caso, todas las partículas girarán en círculos alrededor del eje a la misma velocidad angular. Así, la magnitud del momento angular total vendrá dado por:

$$L = \sum r_i^2 m_i \omega = I\omega$$

³ Recordemos que la magnitud de la velocidad tangencial, que viene implícita en el moméntum lineal de la partícula, es igual a la velocidad angular por el radio, i.e. $v = \omega r$.

Aquí, hemos definido $I = \sum r_i^2 m_i$, lo que es el llamado **momento de inercia**. Nótese que el momento de inercia no solo depende de la masa, sino que, como ya habíamos presentado, depende también de la distribución de la masa en torno al eje. Lo maravilloso de la última ecuación que derivamos para el momento angular, es que esta es **muy** parecida a la del moméntum lineal, con la salvedad de que el momento de inercia ahora juega el rol de la masa y de que la velocidad en este caso es la velocidad angular (ahora el nombre "momento angular" tiene mucho más sentido).

Antes de discutir los experimentos presentados, será necesario definir una última cantidad: el torque. La definición clásica es la siguiente: dado un vector \vec{r} que apunta desde el eje de giro hacia una fuerza \vec{F} aplicada sobre el sistema, el torque viene dado por:

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$$

(Note que nuevamente tenemos un producto vectorial). Así como está, la ecuación no parecería tener mucha relación con el momento angular, pero toda la conexión está escondida en el término de la fuerza. En términos de variaciones, la fuerza la podemos expresar como:

$$\vec{F} = m\vec{a} = \frac{m\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Con esto, podemos reescribir el torque como sigue:

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (\vec{r} \times \Delta\vec{p})$$

Pero podemos identificar el último término (el producto cruz del vector \vec{r} con la variación de moméntum lineal) como la variación de momento angular (véase la ecuación 2.1). Así:

$$\vec{\tau} = \frac{\Delta\vec{L}}{\Delta t} \quad (2.3)$$

Y he aquí, ante nuestros ojos, la conexión: **¡el torque es justamente la variación de momento angular!** Note la similitud entre la relación de la fuerza con el moméntum lineal (ecuación 2.2) y el torque con el momento angular (ecuación 2.3). ¡Esto justamente nos permite ver que el torque es el análogo a la fuerza en movimientos rotacionales y el momento angular efectivamente es el análogo del moméntum lineal!



Figura 2.4. Diagrama de la rueda colgante en donde se indica la aplicación de la fuerza de gravedad a un radio r y el torque que esta genera.

Discusión de los experimentos

Luego de la re-introducción de los conceptos del momento angular, momento de inercia y torque en la sección anterior, al fin tenemos las herramientas necesarias para desglosar los experimentos ya presentados.

La precesión de la rueda colgante

Iniciamos la discusión con una explicación sobre la precesión de la rueda colgante. Lo primero que debemos tener en mente es que si hay un movimiento del eje de giro de la rueda (la precesión), entonces estamos ante una variación del momento angular. Pero, ¿de dónde viene esta variación? La culpable es la gravedad.

En la Figura 2.4 tenemos indicada la fuerza de gravedad, \vec{F}_g , la que actúa en el centro de masas, a una distancia r la que, para efectos prácticos, está prácticamente en el centro de la rueda. Nótese que esto genera un torque que apunta en la misma dirección de giro que la precesión de la rueda, lo que no es coincidencia.

Como mencionamos antes, el torque provocará una variación de momento angular en una dirección perpendicular a la dirección donde actualmente apuntaba el momento angular dado por el giro de la rueda (en la dirección del eje de giro de la rueda). Esta suma provocará entonces que, necesariamente, el momento angular se tenga que desplazar en la dirección en contra de las manecil-

las del reloj alrededor de la cuerda, lo que justamente provoca la precesión observada. Nótese que mientras menor sea la distancia entre el centro de masas del sistema (prácticamente en el centro de la rueda) y el punto desde donde cuelga la rueda, menor será la magnitud del torque y por tanto menor será la variación de momento angular. Esto implica que la precesión será más lenta. Por otro lado, si aumentamos dicha distancia, el torque aumenta y la precesión será más rápida!

Se puede demostrar (Kleppner & Kolenkow, 1973) que la velocidad angular de precesión de la rueda viene dada por:

$$\omega = \frac{rmg}{I\omega_0}$$

Donde r es el radio medido desde la cuerda a la rueda, m es la masa de la rueda, g es la aceleración de gravedad, I es el momento de inercia de la rueda con respecto a su eje (que para el caso de una rueda es $I = mR^2/2$, donde R es el radio de la rueda) y ω_0 es la velocidad angular con que gira la rueda. Lo anterior justamente expresa matemáticamente nuestras conclusiones anteriores.

El experimento de la silla giratoria

Ya dedujimos, de una manera más heurística, por qué era que al juntar los brazos girábamos más rápido que cuando los abríamos mientras girábamos en la silla giratoria: lo que hacíamos era reducir la inercia del sistema, i.e., su “resistencia” al movimiento, lo que generaba un aumento en la velocidad angular. Ahora podremos resolver este problema desde una perspectiva matemática.

Primero que todo, obsérvese que efectivamente el moméntum se conserva pues no hay torques externos que provoquen cambios en el momento angular presente en nuestro eje de giro (obsérvese que hay un torque presente en nuestros brazos producido por la gravedad pero, como vimos en el experimento de la rueda, éstos provocan un cambio en el momento angular con respecto al eje que forman nuestros brazos, no con respecto al eje de giro de la silla). Esto implica que el momento angular es una constante del movimiento.

Podemos entonces expresar el momento angular inicial, con los brazos abiertos, como:

$$L_i = I_i\omega_i$$

Donde el subíndice “i” representa el momento angular, momento de inercia de nuestro cuerpo con los brazos extendidos y velocidad angular inicial. Por otro lado, al juntar los brazos, adquirimos un nuevo momento de inercia y una nueva velocidad angular, quedando el momento angular expresado de la siguiente manera:

$$L_f = I_f \omega_f$$

Ahora entra el argumento de que los momentos angulares iniciales y finales son iguales (¡pues es una constante del movimiento, como ya vimos!) Por tanto:

$$L_f = L_i \Rightarrow I_i \omega_i = I_f \omega_f$$

Así, despejando la velocidad angular final, obtenemos:

$$\omega_f = \frac{I_i \omega_i}{I_f}$$

¡Y, efectivamente, como el momento de inercia final es menor que el momento de inercia inicial, la velocidad angular final es mayor!

Por último, tocaremos brevemente lo que sucede cuando tomamos la rueda en movimiento en la silla giratoria y la giramos, como se mostró en la Figura 2.2. Obsérvese que lo que se hizo fue nada más ni nada menos que agregar momento angular al eje de giro de la silla...pero, ¿cómo? Pues, obsérvese que la rueda no se giró sola: nosotros la giramos, lo que cambió la dirección del momento angular, agregando un poco de este moméntum angular en la dirección del eje de giro de la silla giratoria. Aún así, nuestro sistema inicialmente no tenía momento angular en el eje de giro de la silla giratoria, y tampoco hay algún torque aplicado a dicho eje, por lo que el momento angular debe mantenerse constante e igual a 0. Así, el único momento angular que puede lograr equiparar el momento angular agregado por la rueda es el nuestro: ¡nosotros giramos para cancelar el momento angular agregado por la rueda! Este caso es análogo a cuando un cuerpo choca con otro en reposo: para poder conservar el momento lineal del sistema, el cuerpo que inicialmente estaba en reposo se moverá al transferírse moméntum del cuerpo en movimiento.

Conclusiones

Si bien los resultados de los experimentos expuestos en este artículo en un inicio pueden parecer (y, si aún no se han introducido los conceptos de dinámica de rotaciones, definitivamente son) altamente contraintuitivos, sin duda ayudan a motivar un estudio detallado de los sistemas propuestos.

Para realizar dicho estudio, conceptos como el del momento angular, de inercia y torque son fundamentales de entender no sólo a nivel matemático sino que también a nivel conceptual. La ligazón de conceptos más intuitivos como la ley de Inercia y las leyes de conservación del moméntum lineal son claves para poder crear puentes entre la dinámica rotacional y la dinámica lineal, los que sin duda ayudan a entender la física involucrada.

Debido a que los experimentos generan inicialmente una alta sorpresa por sus resultados, estos sin duda pueden ser una gran herramienta de apoyo en el aula tanto en la introducción de conceptos, motivando una evaluación diagnóstica, como en evaluaciones formativas.

Referencias

1. Kleppner, D. & Kolenkow, R. (1973). *An Introduction to Mechanics*, McGraw Hill.

Resultados constraintuitivos pt. 2: el Imán Levitador

Claudia Araya

ESTUDIANTE DE LIC. EN FÍSICA | PUC

claudia.araya@fisicaitinerante.cl

Néstor Espinoza

ESTUDIANTE DE LIC. EN ASTRONOMÍA | PUC

nestor.espinoza@fisicaitinerante.cl

Resumen

En el experimento a continuación se muestra un trompo magnético que logra levitar sobre una superficie imantada cuadrada. Conceptos como **campo magnético**, **momento angular** y **las leyes de Newton** formarán el pilar fundamental para comprender los fenómenos a presentar. La gracia de este experimento es que tanto la masa del trompo como la inclinación de la superficie cuadrada son variables, pudiéndose encontrar así una relación experimental entre estas variables y los conceptos antes mencionados.

Introducción

En el presente experimento, se persigue entender las leyes básicas del magnetismo y las fuerzas mecánicas. Cuando éramos pequeños, muchos de nosotros jugamos con los imanes en el refrigerador: los unímos, separamos y algunos de ellos ya se “echaban a perder”. ¿Por qué algunos se separaban y se unían con otros?, ¿por qué algunos se “desimantaban”? ¿cómo se expresan realmente los campos magnéticos?. Si recordamos además la tradición chilena del trompo: ¿qué propiedad tiene éste para mantenerse estático espacialmente y girando en torno a un punto?, ¿qué relación tiene esto con el Sistema Solar o una patinadora profesional girando sobre el hielo?, en definitiva: ¿cómo unimos estos dos interesantes fenómenos?

Para los imanes existen incontables aplicaciones, no sólo por su fuerza magnética que deriva en desplazamientos mecánicos, sino también para generar electricidad y movimientos al mismo tiempo. Asimismo, la capacidad de un objeto de mantenerse estático pero rotando en una posición sin soportes constantes, es un fenómeno más bien contemplativo y estético que práctico, pero las aplicaciones del trasfondo pueden aclarar como funciona el universo. Las propiedades esenciales mostradas en el experimento son:

- **Leyes de Newton.** Newton enunció 3 leyes que relacionaban la fuerza aplicada sobre un objeto, cómo ésta dependía de la masa y aceleración y el efecto provocado por ella.

Los dos conceptos importantes que ocuparemos son Peso y Fuerza neta nula. El primero, vincula como la fuerza ejercida por un cuerpo hacia el piso depende de su masa y del planeta en que se encuentre. El segundo, habla sobre elementos que reciben fuerzas sobre su superficie que son nulas, o de igual magnitud y dirección tal que se contrarrestan, lo que se traduce en velocidad nula o velocidad constante del cuerpo.

- **Momento Angular.** El momento angular relaciona cómo se distribuye la masa en un cuerpo, su radio y como esto influye en la velocidad que pueda tomar. Es la extensión natural del concepto de moméntum lineal en dinámica lineal a la dinámica de rotaciones.
- **Campo magnético.** Este fenómeno es un poco más abstracto que los temas anteriores. Tal como la Tierra posee un campo gravitatorio que mantiene a la Luna girando alrededor, y a nosotros con los pies sobre la superficie de ella, los imanes también poseen un campo alrededor de ellos. Este campo, posee comienzo y fin en el mismo objeto y es unidireccional, presentando un comportamiento bipolar (esto quiere decir que tiene dos polos, tal como conocemos en los imanes, al menos, a la fecha). Se cumple el mismo comportamiento que en las partículas cargadas, con la diferencia que en los campos magnéticos hablamos de polos en vez de cargas, existiendo dos tipos de polo, el Norte y el Sur: si dos imanes se apuntan con el mismo polo, se repelen; si se apuntan con polos diferentes, se atraen.

Procedimiento de armado del experimento

El imán levitador¹, está compuesto por las siguientes piezas, que se disponen en la Figura 3.1:

- Masas.
- Trompo.

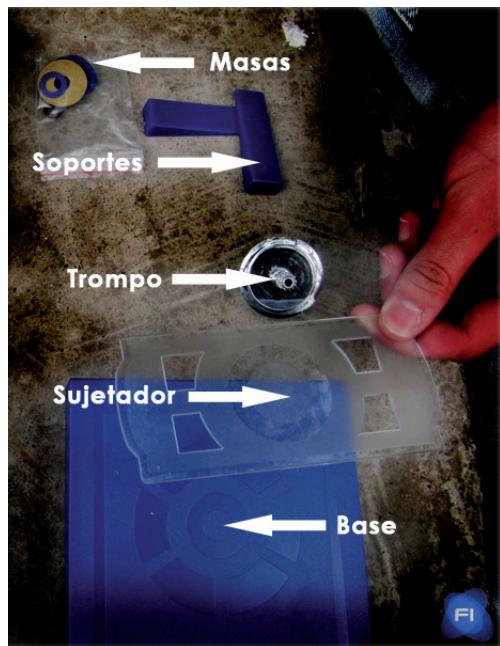


Figura 3.1. Piezas que componen el set del imán levitador.

- Soportes.
- Sujetador.
- Base.

Para realizar el experimento, seguiremos las indicaciones a continuación:

1. Sitúe la base sobre una superficie estable, segura y limpia.
2. Nivele la base colocando los soportes por debajo de ella, tal como se muestra en la Figura 3.2.
3. Alternativamente pose sobre el trompo la cantidad de masas que estime conveniente (véase Figura 3.2).
4. Deje el sujetador de acrílico sobre la base.
5. Pose el trompo en el sujetador, y comience a rotarlo con los dedos tal como se indica en la Figura 3.3.
6. Luego, suba lentamente el sujetador con el

¹ En este experimento se usó el Magic UFO, imán levitador que puede comprarse por \$5.990. Para más información sobre la venta de este imán levitador, comunicarse al e-mail ventas@emeyemetoys.com.



Figura 3.2. (Izquierda) Nivelación de la base. (Derecha) Montura de las masas en el trompo.



Figura 3.3. Set-up del lanzamiento del trompo. Giro sobre el acrílico.



Figura 3.4. Set-up del lanzamiento del trompo. Levantamiento de la base de acrílico.



Figura 3.5. Set-up del lanzamiento del trompo. Levitación del imán.

trompo girando encima. La idea es llegar a un punto en que el trompo se estabilice. Ver Figura 3.4.

7. Cuando alcance el punto de estabilización, el trompo levitará solo (si usted tiene que “empujarlo hacia arriba” y/o forzarlo, probablemente debe cambiar la configuración de masas), tal como se ve en la Figura 3.5. Cuando esto suceda, retire suavemente el sujetador... ¡y tenemos un imán que flota!

Lograr girar el trompo sobre el acrílico y base, no es fácil. Menos lo es lograr el punto de equilibrio para retirar el soporte. Por ello, se recomienda que el profesor se vuelva el maestro en dominar el arte del imán. Los alumnos, sólo al querer realizar el experimento una vez, se darán cuenta de lo variable que es un punto de otro y como cuesta encontrar el punto de equilibrio magnetostático. ¡A practicar, a practicar!

Nótese además, que la pericia para realizar el experimento no es el único factor. Los soportes dispuestos bajo la base, son de mucha utilidad para lograr el equilibrio horizontal del trompo. Si éste al rotar cae hacia un lado, es precisamente ése el lugar más bajo de la base.

La cantidad de masas que se posen sobre el trompo, logrará variar el punto de equilibrio verticalmente. La idea es que los niños/as o jóvenes, puedan notar claramente la relación entre fuerza y masa.

Por último, lamentablemente si se daña alguna pieza fundamental, como la base o el trompo mismo, es preciso comprar un imán nuevo. En los imanes, aunque sean unidos y pegados tras romper-

erlos, el campo magnético varía caóticamente volviéndose inútil para el efecto deseado (como será explicado más adelante, es de hecho la especial deformidad del campo magnético de la base lo que permite la estabilidad del trompo).

Preguntas con respuestas

Se recomienda jugar con todos los elementos del trompo levitador: variar la cantidad de masa dispuesta sobre el trompo, la posición de los soportes, la velocidad de rotación del trompo y ver cómo estos factores se van relacionando. Se incentiva ocupar el uso de regla, para ver aproximadamente el desplazamiento vertical del trompo al cambiar su masa, y anotar las coordenadas de los soportes en la base.

Pregunta 1. ¿Qué fluye desde ambos imanes?

Desde los imanes se expulsa un campo magnético. Desde la base, el campo es más amplio ya que posee más área, y su dirección en el centro es casi vertical (recordemos que las líneas comienzan y terminan en el mismo cuerpo). Desde el trompo, también fluye un campo magnético pero hacia abajo, es decir, estamos juntando dos polos magnéticos iguales.

Pregunta 2. ¿Por qué se mantiene flotando?

En principio este efecto podría parecer desafiar uno de los grandes teoremas de la física. El teorema de Earnshaw (Earnshaw, 1842), predice que es imposible tener equilibrio en un sistema sólo con dipolos magnéticos (imanes) y/o cargas. El tema es que este teorema predice que eso se cumple siempre y cuando el sistema sea estático, y en este caso no lo es.

Al mantenerse flotando, nos fijamos que el trompo se queda rotando en un punto y mantiene pequeñas precesiones con respecto a la normal desde el suelo, manteniéndose dicho movimiento en equilibrio. En otras palabras, posee equilibrio vertical y horizontal. En el primero, tenemos las fuerzas magnéticas repulsivas ya nombradas por parte de los imanes y, por otro lado, tendremos el peso del trompo-imán que provocará una fuerza hacia abajo, la que lógicamente dependerá de su masa intrínseca y las masas que dispongamos.

¿Por qué el imán no se cae hacia los lados? Porque el imán rota, lo que obliga a las partículas del trompo a permanecer más o menos estable, logrando que este movimiento contrarreste todas las pequeñas fuerzas horizontales y se mantenga en equilibrio. Es interesante notar, aún así, que el funcionamiento de este trompo levitador necesita que el momento angular no se conserve: las pequeñas precesiones en torno a la normal son necesarias para lograr el equilibrio observado (Berry, 1996).

Pregunta 3. ¿Puedo ocupar un imán cualquiera para lograr este efecto?

En principio, sí. Aunque debemos recordar que cumplen los principios de ser dos objetos enfrentados con el mismo polo magnético, uno de mayor tamaño que el otro, y que el más pequeño pueda rotar sobre un punto de apoyo.

Ecuaciones relevantes para el experimento

En esta sección se indaga la teoría general de magnetismo y fuerzas. Lo que aquí se propone es opcional, si se quiere realizar estudios científicos con alumnos de enseñanza media, es altamente recomendable leerlo con detención.

Supongamos que queremos mover un cuerpo que está en reposo. Si este cuerpo es grande, y denso, costará más moverlo que un objeto liviano. En definitiva, ¿en qué se traduce que cueste mover un objeto? que la velocidad que tomará será pequeña contrastada con la de un cuerpo poco denso. Recapitulando, si se quiere mover un cuerpo con cierta masa m , hasta que obtenga una cierta aceleración, la fuerza que se debe aplicar es:

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

Luego, si aplicamos este mismo pensamiento para estudiar la fuerza ejercida por un objeto sobre el planeta Tierra, esta vez la fuerza que nos mantiene en pie (y no flotando en el aire) es la fuerza de gravedad, que como ya se explicó anteriormente, posee una aceleración intrínseca y particular a cada lugar del universo. La aceleración de gravedad en nuestro planeta es:

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

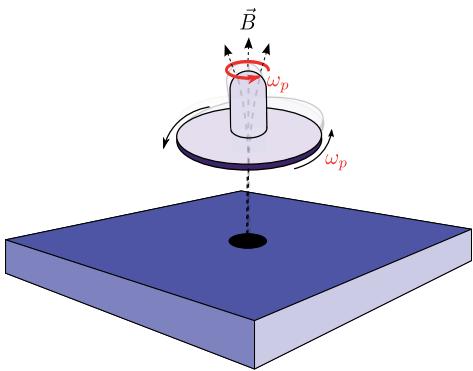


Figura 3.6. Descripción de la dinámica rotacional del trompo levitador. El subíndice p en la velocidad angular denota la precesión, mientras que el subíndice 0 denota la velocidad angular inicial del trompo. El campo magnético de la base es B .

Usando lo anterior, podemos obtener una expresión para la fuerza peso, definida como:

$$P = mg$$

Quizá la relación más importante e interesante para el funcionamiento del experimento del imán levitador es lo que sucede con la dinámica rotacional del trompo. En primer lugar, al aplicarle el giro inicial al trompo con nuestros dedos (Figura 3.3) lo que estamos haciendo es agregarle momento angular al mismo, lo que lo mantiene más o menos estable mientras levita. Aún así, es interesante notar que el trompo no está del todo quieto y precesa en torno a la normal. Esta precesión es producida por el torque efectuado por la fuerza de atracción que siente el polo superior del trompo con el imán de la base al desviarse este levemente de la vertical. De esta manera, al precesar, el imán “escapa” de caer, no dejando que este torque lo de vuelta (véase la Figura 3.6). Es justamente este mecanismo el que mantiene al trompo en una región de equilibrio estable: es justamente el hecho de que el campo magnético de la base no es perfectamente vertical el que permite que el equilibrio del trompo sea estable.

Dado lo anterior, el análisis del campo magnético producido por la base y sus efectos en el trompo son bastante complejos. El trabajo de Berry

(1996) detalla este mecanismo. Lo interesante de notar es que el trompo se mantiene estable en un rango de alturas (no en una altura determinada), lo que justamente saca a relucir el hecho que no es simplemente el equilibrio de fuerzas el encargado de mantener en equilibrio el trompo, sino que también influyen los factores mencionados aquí.

Otro detalle importante en el experimento del imán levitador es el hecho de que si después de un tiempo, o en lugares con distintas temperaturas queremos volver a ocupar la misma configuración de masas que habíamos ocupado un tiempo atrás o en otro lugar con una temperatura muy distinta, el trompo probablemente no alcance dicho rango de equilibrio y no levite con la configuración de masas que este tenía antes. Esto se produce pues la propiedad de “estar imantado”, tanto por parte de la base como por el trompo se pierde con el tiempo y la temperatura. Podemos pensar los grandes imanes como si estuviesen compuestos por otros pequeños imanes, los que con cambios de temperatura o con el tiempo se desordenan.

Extensiones del experimento

El experimento presentado tiene versiones ya explicadas implícitamente con anterioridad: variación de masa con las golillas sobre el trompo, variación de inclinación de base, variación de la velocidad impresa inicialmente, etc.

Otras variaciones serían, por ejemplo, considerar realizar el experimento en lugares con distintas temperaturas: ¿esperaría que el trompo tuviese que ser más o menos masivo si realiza el experimento en lugares con alta temperatura?

Proposición de actividades

En el caso del uso del siguiente experimento, se propone la siguiente actividad:

1. Intenta equilibrar el trompo. Es importante que, en el momento del éxito, escriba las condiciones que usó para hacerlo. Estos datos pueden servirle para evitar pérdidas de tiempo y ganar experiencia en posteriores intentos.
2. Una vez el trompo este en equilibrio, y sin masas externas sobre él, mida la altura al-

canzada por el imán con la ayuda de una regla.

Repita la experiencia anotando en una tabla las alturas con las masas correspondientes. ¿Cómo es la relación entre la altura y la masa? ¿Qué se puede concluir de esto?

Referencias

1. Berry, M. V., (1996), *The LevitronTM: an adiabatic trap for spins*, Proc. R. Soc. Lond. A 452, pp. 1207.
2. Earnshaw, S., (1842), *On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether*, Trans. Camb. Phil. Soc. 7, pp. 97-112.

CAPÍTULO 2: TERMODINÁMICA Y TEORÍA CINÉTICA

Latas que implotan

Claudia Araya

ESTUDIANTE DE LIC. EN FÍSICA | PUC

claudia.araya@fisicaitinerante.cl

Resumen

El experimento a continuación pretende introducir conceptos termodinámicos a través de un experimento accesible y económico. Se interiorizarán conceptos como **presión, volumen, condensación y presión atmosférica**, enmarcados en la Teoría cinética de los gases, temática abordada en los subsectores de química y física. Para ello, se precisa de una lata vacía de bebedible de 300 cc, calentador (mechero, cocinilla, etc), guantes aislantes y agua. La sinergia entre lo simple de lo empírico y lo rápido de su realización, lo convierten en el experimento perfecto para chicos intrépidos.

Introducción

En la experimentación que sigue, se pretende interiorizar conceptos básicos de termodinámica. Somos testigos constantes de cómo el océano de aire en el que vivimos se manifiesta en el clima. Por ejemplo, cuando vemos El Tiempo observamos los lugares afectados por “altas presiones” con buen clima, en contraste con los que sufren de “bajas presiones” tienen mal clima. O cuando viajamos a las montañas en auto, tenemos que desinflar las ruedas antes de ascender para evitar la rotura de la cámara y quedar en panne en mitad de camino... ¿Qué ejerce este efecto? ¿Cómo nuestro cuerpo actúa ante estos fenómenos?

Recapitulando, el comportamiento de los gases y su efecto en nuestra vida diaria es innegable y vital. El efecto más básico, como lo es el de la presión atmosférica, lo estudiaremos mediante una lata parcialmente llena de agua y su implosión al variar abruptamente su temperatura, experiencia que, complementada a la teoría previamente

enseñada en clases y ejemplos con datos duros, se engancha de manera automática en la mente de los espectadores. Las propiedades claves a observar en el experimento son:

- **Estados de la materia.** Los estados de la materia corresponde a cómo se presenta un elemento de manera constante según las condiciones externas (presión, temperatura, etc.) e internas (enlaces químicos, estructura molecular, etc.). Los estados más conocidos son: sólido, líquido, plasma y gas.
- **Cambios físicos de la materia.** Describe la transición entre un estado a otro de un elemento. El ejemplo más popular es el paso de líquido a vapor del agua, que vemos diariamente en nuestra cocina al hervirla. Estos cambios radican en la variación de al menos uno de estos factores: presión, volumen, temperatura. Los cambios estudiados en esta oportunidad serán: evaporación (líquido a gas) y condensación (gas a líquido).

MATERIAL	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	PRECIO TOTAL	REFERENCIA
Cocinilla sobremesa Pragma	\$15.990	1	\$15.990	Doite
Gas para cocinilla 227 gr.	\$980	1	\$980	Doite
Lata de bebida	\$264	1	\$264	Líder
Guantes aislantes	\$2490	1	\$2490	Easy
Compotera pequeña	\$369	1	\$369	Easy

Tabla 1.1. Tabla con los materiales para la construcción del experimento. El precio total del experimento puede variar desde \$0 hasta \$21.408, dependiendo si se realiza en un laboratorio, cocina o en la sala de clases.

- **Presión.** La presión es básicamente la fuerza ejercida sobre un área determinada. Por ejemplo, estudiemos el caso de una mujer; ella pesa 60 kg. Todas las mañanas sale a correr, utilizando zapatillas deportivas. En ellas, puede distribuir todo su peso en las plantas de los pies. Después va al trabajo, y debe cambiarse los zapatos por unos con taco. Los cambios están a la vista: sus pies duelen considerablemente más y puede romper objetos con más facilidad al pisarlos. La pregunta que nace acá es: ¿por qué posee más "poder" si ella sigue manteniendo el mismo peso, es decir, la misma fuerza sobre el piso?. Es simplemente debido al área donde se apoya esta fuerza: a menor área, mayor presión (tacos); a mayor área, menor presión (zapatillas).
- **Presión atmosférica.** Nosotros estamos inmersos en un fluido, que llamamos aire. Éste, aunque no lo notemos, ejerce una fuerza constante sobre nosotros, en todos los lados de nuestro cuerpo. Pensar que encima cargamos con 12 kilómetros de partículas que permanentemente nos aplastan, resulta agobiante. Pero, todos los seres vivos y objetos que apreciamos a nuestro alrededor han creado uno u otro mecanismo para poder soportar esta gran fuerza "imperceptible". El punto es que, a medida que subimos a la montaña esa columna de aire va disminuyendo, por lo tanto, ejerce menor presión sobre nosotros: es por eso que las cosas tienden a expandirse o a explotar (como el ejemplo que mencionábamos de las ruedas de un auto). Es así que podemos relacionar presión atmosférica, con la altura relativa.
- **Temperatura.** Este concepto en física es puede ser complejo de definir en un inicio, pero podemos relacionarlo intuitivamente con otras ideas. Una idea de la temperatura, es la medición de la actividad molecular en los objetos o sustancias. Por ejemplo, moléculas con bastante movimiento (o energía cinética) dentro de una sustancia tiende a mostrar más temperatura en tal sustancia que aquellas sustancias en que sus moléculas permanecen inactivas: no tienen energía interna para moverse.
- **Ley de los gases ideales.** Esta ley relaciona las variables presión, volumen, temperatura y número de partículas.

Procedimiento de armado del experimento

Para realizar el experimento, se necesitarán los siguientes elementos mostrados además en la Figura 1.1:

- Calentador: mechero, cocinilla o similar.
- Gas respectivo para el calentador.
- Fósforos.
- Lata de bebible vacía.
- Guantes aislantes.
- Compotera chica.

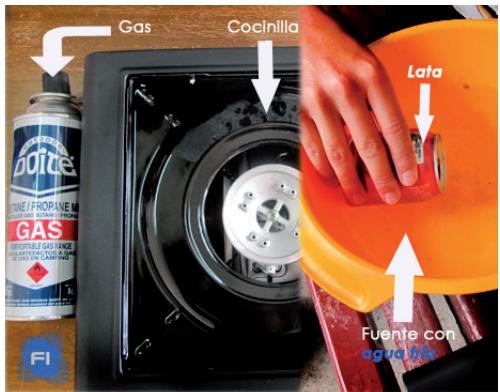


Figura 1.1. Implementos necesarios para la realización del experimento.



Figura 1.2. Muestra de la posición de la cocinilla. Fíjese que sea posible posar la lata sobre la misma.

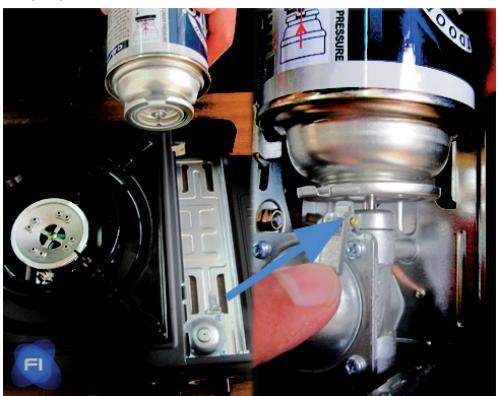


Figura 1.3. Muestra de la posición de la lata de gas en la cocinilla. Asegúrese que el seguro este bien posicionado.



Figura 1.4. (Izquierda) El seguro se baja para poder liberar el gas de la cocinilla. (Derecha) Se gira la perilla para poder provocar la chispa y controlar la cantidad de gas expulsado en la cocinilla.



Figura 1.5. Pose la lata con mucho cuidado, ¡no olvide ocupar guantes!

- Agua fría (500 cc).

Para realizar el experimento, seguiremos las indicaciones a continuación:

1. Sitúe los instrumentos antes mencionados, sobre una superficie estable, segura y limpia.
2. Dé vuelta la tapa de la cocinilla, tal como se muestra en la Figura 1.2.
3. Una vez instalado el gas en la cocinilla (como se indica en la Figura 1.3), o verificando que el sistema efectivamente funcione, proceda a encenderla (guíese por la Figura 1.4).
4. Paralelamente, vierta agua en la compotera



Figura 1.6. Pasos para hacer implotar la lata. (1) Con los guantes puestos tome la lata, (2) luego sobre la compotera con agua gírela en 180° y luego (3) inserte la lata “boca abajo” en el agua fría.

y llene parcialmente la lata con el mismo líquido.

5. ¡Manos a la obra! Con los guantes aislantes puestos, ubique la lata sobre el quemador hasta que vea salir una cantidad considerable de vapor de agua. La idea es colmar la lata de vapor de agua. Observe la Figura 1.5.
6. Posteriormente, voltee la lata y pósela rápidamente sobre el agua fría, tal como se ve en la Figura 1.6... ¡Voilá!: ante sus ojos, una implosión.

Como tip para el experimento, observe que la idea es que los niños experimenten y vean que no es trivial implotar la lata: factores como la inclinación de la lata con respecto al agua, o el grosor de la lata usada son determinantes para su efectividad.

Nótese además, que este experimento puede reproducirse en la cocina del hogar de cualquier espectador. Es por esto importante avisar previamente a apoderados sobre la realización de este experimento, para llamar a su colaboración en la realización en casa y así evitar posibles accidentes.

Por último, si no se posee una lata vacía cercana, se puede utilizar también una caja de jugo individual de cartón. No use recipientes de plástico o de materiales más rígidos: prevenga situaciones riesgosas.

Preguntas con respuestas

Pregunta 1. ¿Por qué la lata implota?

La lata al comienzo está llena de aire por dentro y por fuera. Uno al evaporar agua dentro de ella, expulsa el aire y deja partículas de vapor de agua. Al acercarla al agua fría, ese vapor se condensa, sin existir partículas de vapor de agua que ejerzan presión hacia afuera, siendo aplastada finalmente por la presión atmosférica.

Pregunta 2. ¿Cuál es la diferencia entre el aire y el vapor de agua?

El aire es un gas invisible que rodea el planeta Tierra y está compuesto principalmente por nitrógeno y oxígeno. En cambio, el vapor de agua es visible y se produce por la evaporación del agua (compuesto por hidrógeno y oxígeno). En invierno, tenemos ambos presentes en el aire, y es por esto que al exalar aire (a temperatura mayor del ambiente), el vapor de agua se condensa, creando una nube de vapor visible. Otro ejemplo, es ver la presencia del vapor en la tetera hirviendo entre el aire.

Pregunta 3. ¿Por qué nosotros no implotamos?

El cuerpo del ser humano, mediante la presión sanguínea y su composición (tensión de los capilares, densidad, etc), permiten que la presión dentro del cuerpo sea igual a la presión atmosférica.

Pregunta 4. ¿Tiene que ver este fenómeno también con la altura?

Efectivamente. Quienes han viajado a las alturas en auto, se han fijado que deben desinflar las ruedas antes de emprender viaje. O cuando llevamos cremas u otras cosas en el mismo viaje, al abrirlos en ese lugar notamos que las botellas se “inflan”, desparramándose el contenido. Esto es porque, la relación entre la presión atmosférica y la altura es inversamente proporcional, es decir, a mayor altura, menor presión se siente. Por lo tanto, las ruedas o los recipientes, al recibir menos fuerza desde afuera y la misma desde adentro, tienden a distenderse.

Ecuaciones termodinámicas relevantes

A continuación, indagaremos la teoría detrás: abarcaremos tópicos impartidos básicamente en enseñanza básica, y con más profundidad matemática en enseñanza media, recomendando altamente en el último caso construir el puente efectivo de comprobación entre las ecuaciones y la experiencia.

Si tenemos un gas ideal, aquél que se posee partículas que no se rechazan ni atraen y además chocan elásticamente, cumple con la siguiente relación:

$$PV = nRT$$

Siendo P la presión, V el volumen, T la temperatura, R la constante universal de los gases ideales (aprox. 8,31 J/mol·K) y n el número de moles. Una manera alternativa de escribirlo es:

$$PV = Nk_bT$$

Siendo las variantes M, correspondiente al número de partículas y k_b la constante de Boltzmann, equivalente a $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K. Esta expresión es la que usaremos para analizar el fenómeno en detalle.

Nuestras condiciones son:

- **Temperatura.** El agua al estar hirviendo, o en vapor de gas, su temperatura es del orden de 100 °C ó 373 °K.
- **Volumen.** Una lata de bebida de 300 cc posee aproximadamente un largo h de 10 cm y un radio r de 1.5cm. Al introducir estos valores en la expresión del volumen de un cilindro, nos da:

$$V = h \cdot \pi r^2 = 7 \cdot 10^{-5} m^3$$

- **Número de partículas.** Esto lo calculamos sabiendo que se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$N = \frac{M}{m_a}$$

Siendo M la masa total, y m_a la masa de cada molécula. La masa total la calculamos ocupando el concepto de den-

sidad. ¿Cómo? con la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Con el dato de la densidad del vapor de agua, correspondiente a 0.6 kg/m^3 , y con el volumen antes calculado, obtenemos la masa total $M = 42 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$.

- Por otro lado, la masa molecular es 18,01 g/uma, o $m_a = 29,89 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Finalmente, obtenemos el número de partículas:

$$N = \frac{M}{m_a} = \frac{M}{29,89 \cdot 10^{-27}} = 1.41 \cdot 10^{15}$$

Si consideramos que dentro de la lata, se condensa aproximadamente la mitad o más del agua, tenemos que N es $7 \cdot 10^{14}$.

- **Presión.** Dentro de la lata, tenemos que las partículas anteriormente calculadas ejercen una presión sobre las paredes de ésta. Acudiendo a la Ley de los gases ideales, obtenemos que la presión es $P = 0,006 \text{ Pa}$. Comparado con el exterior, donde hay presión atmosférica de 101325 Pa , es evidente que la lata recibe un golpe gigantesco desde el exterior, explicando así su implosión.

Llevemos estos números a ejemplos cotidianos, para ello evaluemos la fuerza total ejercida sobre la lata. Sabemos que la relación entre la fuerza F sobre un área A ejerce una presión P, de la siguiente manera:

$$P = \frac{F}{A}$$

Por lo tanto, la fuerza ejercida será la multiplicación del área afectada, por la presión hecha. Así obtenemos:

$$A = 2\pi r h = 0.094 m^2$$

Por lo tanto:

$$F = P \cdot A = 954,96 \text{ N}$$

Si pensamos en nuestro peso, suponiendo que tenemos una masa de 70 kg y que la aceleración de gravedad es 10 m/s, obtenemos alrededor de 700 N. Es decir, ni siquiera esta persona ejerce la fuerza que ejerce la presión atmosférica sobre

la lata: ¡la presión atmosférica es muy poderosa!

Resumen de ecuaciones importantes

En resumen, tenemos 3 ecuaciones para estudiar este fenómeno termodinámico. Primero, la definición de **presión** en función de la fuerza aplicada F sobre un área A:

$$P = \frac{F}{A}$$

También, la expresión de la Ley de Gases Ideales, que relaciona la presión P, ejercido sobre un número de partículas N que ocupa un volumen V a temperatura T:

$$PV = Nk_bT$$

Donde k es la Constante de Boltzmann. El número de partículas N lo podemos desprender de la masa total M y la masa atómica del elemento:

$$N = \frac{M}{m_a}$$

Así como la densidad relaciona la masa M y el volumen V:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Extensiones del experimento

Este experimento, tiene algunas variantes interesantes de experimentar. Por ejemplo, se podría determinar la dureza de una lata u otro según la resistencia que oponga ante la presión atmosférica.

Además, se podría cambiar el líquido con otro, para estudiar su reacción y así determinar propiedades químicas de los líquidos puestos.

Finalmente, un punto interesante de observar es la relación entre el grado de inclinación de la lata, y su efectividad al comprimirse: claramente al tener un ángulo no perpendicular al agua, el aire alcanza a meterse en la lata llena de vapor de agua, no permitiendo su total compresión.

Expansión térmica

Claudia Araya

ESTUDIANTE DE LIC. EN FÍSICA | PUC

claudia.araya@fisicaitinerante.cl

Resumen

A través del siguiente experimento, se introducirán conceptos de **temperatura, energía, volumen y presión**, enmarcándose en los gases ideales como introducción a la termodinámica. Para ello, se utilizará un montaje que consta de una unión entre una ampolleta con agua y un globo, los que al realizar contacto con la llama de una vela, se observa como el vapor de agua va ocupando lugar dentro del globo. Es decir, se logra inflar un globo sin necesidad de soplarlo directamente, ni bombearlo con un movimiento mecánico.

Introducción

Los conceptos de termodinámica son comunes al diario vivir del ser humano ya que, las 24 horas del día está inmerso en un fluido: el aire. De este, se predice claramente su temperatura, o se habla de su relación con la presión cuando Chile va a jugar un partido en Bolivia pero, ¿qué es la temperatura?, ¿qué tiene que ver con la energía, la presión, el volumen?

Para simplificar el análisis del comportamiento de los gases, Joule y Krönig en forma independiente propusieron el siguiente modelo: confinar en un volumen V una cantidad de átomos o moléculas, como pequeñas esferas iguales que interactúan entre ellas y con las paredes mediante choques elásticos aleatorios (sin pérdida de energía ni moméntum). Si el tamaño de cada una es pequeña comparada con la distancia que las separa, entonces se habla del modelo de Gas ideal. (Demtröder, 2006), cuya relación se describe como:

$$PV = Nk_bT$$

Donde P es la presión, V el volumen, N el número de partículas, k la constante de Boltzmann y T la temperatura.

Al desglosar su movimiento desde el moméntum que posee una partícula, al realizar un choque elástico con la pared con velocidad promedio v , se puede inferir la fuerza total F que realizan N partículas sobre la pared, y con ello, la presión (Serway, 1999):

$$PV = \frac{2}{3}N \left(\frac{1}{2}mv^2 \right) = \frac{2}{3}NE_c$$

Donde E_c es la energía cinética traslacional promedio de la molécula. Al unir ambas expresiones, se puede inferir la siguiente relación entre energía cinética y temperatura:

$$\frac{3}{2}k_bT = E_c$$

Con estas relaciones aclaradas, es posible definir cada variable y las implicancias que tiene la variación de una en otra.

MATERIAL	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	PRECIO TOTAL	REFERENCIA
Ampolleta Clara	\$390	1	\$390	Lider
Portalámpara con rosca	\$790	1	\$790	Easy
Globo (pack de 10)	\$580	1	\$580	Líder
Madera min 0.5 m ²	\$1.000	1	\$1.000	Homecenter Sodimac
Adhesivo maderas “No más clavos!”	\$1690	1	\$1690	Easy

Tabla 2.1. Tabla con los materiales para la construcción del experimento. El precio total del experimento es de \$4.450.

- **Energía cinética translacional.** Es la energía asociada al movimiento que tiene el objeto para moverse de un lado hacia otro, es decir, depende de la rapidez que porte. Por lo tanto, ésta es nula si un objeto está en reposo. Se mide en Joules (J).
 - **Volumen.** Espacio de tres dimensiones que ocupa un gas. Se mide en metros cúbicos (m^3).
 - **Presión.** Es la fuerza neta ejercida sobre un área determinada. En este caso, es la fuerza que ejercen las partículas sobre las paredes del cuerpo de volumen V que las encierra. De la ecuación 2, se infiere que si éstas se mueven muy rápido debido a su alta energía, la presión que realizarán será alta también. Se mide en Pascal (Pa).
 - **Temperatura.** Magnitud asociada al calor (o energía cinética translacional) que, comúnmente se usa para determinar si algo está frío o caliente, según un observador con temperatura intrínseca. Es decir, se utiliza para comparar el calor que poseen dos o más cuerpos. Se mide en Kelvin (K).
- 1 Portalámpara.
 - 1 Vela.
 - 1 Abrasadora de plástico (cuálquiera que pueda “abrazar” el soquete de la ampolleta).
 - 1 Cortacartón.
 - 1 Trozo de madera (20 x 15 cm).
 - 1 Serrucho o sierra.
 - 1 Adhesivo en cinta.
 - 1 Adhesivo de madera.
 - Agua.

Para construir la base:

1. Cortar con el serrucho o sierra, 3 trozos de madera de las siguientes dimensiones: uno de 15x10 (base), y dos de 15x5.
2. Fijar las maderas como en la posición de la Figura 2.1, con el adhesivo para maderas favorito, y ayuda de cinta adhesiva en el periodo de secado.

Ampolleta:

1. Se retira con ayuda del cortacartón la parte trasera de la ampolleta, con cuidado, siguiendo la línea de separación entre el vidrio y la parte metálica.
2. Limpie los residuos.

Procedimiento del armado del experimento

Para armar este experimento, se necesitarán los siguientes implementos.

- 1 Ampolleta clara (es indiferente la marca y potencia que posea).
- 1 Globo.

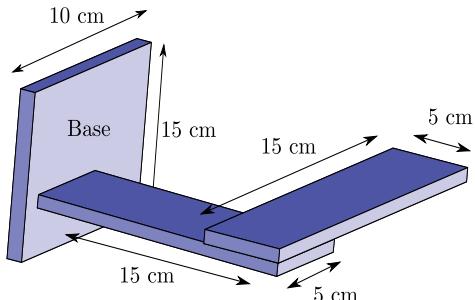


Figura 2.1. Diagrama del soporte del experimento de expansión térmica..

Ensamble de ampolla y globo:

1. Se utiliza la parte tubular del portalámparas, desprendiéndola de cualquier parte externa.
2. Se enrosca la ampolla, y luego, se le agrega agua en su interior (hasta la mitad aproximadamente).
3. Por el otro lado, se fija el globo.

Montaje final:

1. Finalmente, se fija el ensamblaje de ampolla y globo a la estructura de madera, con una abrasadera.
2. Bajo ella, se coloca un trozo de vela, de forma tal que la llama pueda calentar el agua que se encuentra al interior de la ampolla.

La base anteriormente propuesta es sugerida, cualquier tipo de base que afirme de forma segura la ampolla es posible de usar.

Tenga en consideración que a pesar de que ponemos agua en la ampolla, esta puede sufrir quemaduras debido a la exposición del fuego. Por esto, es recomendable tener una ampolla de repuesto, o limpiar oportunamente la superficie de vidrio.

Preguntas con respuestas

Pregunta 1. ¿Por qué el globo se infla?

Tal como se explicó anteriormente, el globo se va llenando porque el vapor de agua va ocupando

lugar dentro de él, que realiza la misma presión en todas las direcciones, logrando una forma esférica.

Pregunta 2. ¿El agua desaparece?

El agua no desaparece, sólo transforma su estado desde líquido a vapor. Tal como dicta la Ley de conservación de la materia: "La materia no se crea ni se destruye, sólo se transforma".

Pregunta 3. Cuando el agua líquida se convierte en vapor de agua, ¿es por fuerzas repulsivas entre las partículas?

Cuando una materia cambia de estado, en este caso de líquido a vapor, no es porque exista una fuerza repulsiva entre las partículas que se desencadene en el alejamiento de ellas y que eso se traduzca en el cambio de estado. Para entender lo que ocurre, vamos al caso más extremo: un sólido. En él, la distribución de partículas se puede modelar como un tejido, donde las partículas tienen lugares fijos e interactúan con las otras. Cuando se aplica calor a este sistema, las partículas comienzan a vibrar en su posición, hasta que llega el punto que se libera de ese punto fijo. En cambio, al pasar a un estado gaseoso, la distancia entre partículas es mayor, permitiendo más libertad de movimiento, llenando el volumen completo del recipiente que lo contiene. En conclusión: las partículas siguen unidas por la fuerza de atracción entre ellas, sólo que ahora pueden moverse uno con respecto a los otros.

Pregunta 4. Cuando un gas se enfriá, ¿las partículas se acercan entre ellas por fuerzas atractivas?

Las partículas, tal como se vio en las fórmulas más arriba, se muestra que la temperatura está muy relacionada con la velocidad que ellas portan. Por lo tanto, al disminuir la temperatura de, por ejemplo, el vapor de agua que se encuentra en un punto inicial a 100°C, las partículas van dejando de moverse tan rápido produciendo que disminuya la presión que ellas realicen hacia las paredes del recipiente. Esto ocasiona que el volumen disminuya. Es decir: a menor temperatura del gas, menor presión de las partículas hacia las

paredes del contenedor, lo que no se traduce en mayor fuerza atractiva entre ellas.

Pregunta 5. ¿Las moléculas de gas se expanden cuando se calientan?

Las partículas, ya sean átomos o moléculas, al calentarse no es que su cuerpo se vea afectado en el aumento de tamaño sino que las partículas entre sí, se van alejando.

Extensiones del experimento

Para una explicación interactiva sobre el comportamiento de los gases ideales, se recomienda visitar la emulación NetLogo Ideal Gas en la web.¹

Referencias

1. Demtröder, W. (2006) "Atoms, molecules and photons" pp.17. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Alemania.
2. Serway, R. (1999) "Física Tomo I" pp.589. McGraw Hill Interamericana Editores, México.
3. Wilensky, U. (2005). "NetLogo Connected Chemistry 7 Ideal Gas Law model" <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/ConnectedChemistry7IdealGasLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
4. Wilensky, U. (1999). "NetLogo", <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
5. Horton, C (2004) "Student Misconceptions and Preconceptions in Chemistry", Arizona State University, Estados Unidos.

¹ La emulación se encuentra en el siguiente link: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/run.cgi?ConnectedChemistry7IdealGasLaw.691.530>

Vórtices

Néstor Espinoza

ESTUDIANTE DE LIC. EN ASTR. | PUC

nestor.espinoza@fisicaitinerante.cl

Gonzalo Díaz

LICENCIADO EN FÍSICA | PUC

gonzalo.diaz@fisicaitinerante.cl

Claudia Araya

ESTUDIANTE DE LIC. EN FÍSICA | PUC

claudia.araya@fisicaitinerante.cl

Resumen

En el siguiente experimento se hará una demostración de un efecto que desafía la intuición. Con un soplador apuntando hacia el suelo se logra suspender un disco de cartón en el aire. Pese a que el viento corre hacia el suelo y que la fuerza de gravedad ejerce una fuerza sobre el disco hacia abajo, la fuerza neta que siente el disco es hacia arriba. La explicación de este fenómeno aún es investigado y se esconde en el campo de la dinámica de los fluidos. Los conceptos de presión y vórtices son claves para comprender las variables que entran en juego.

Introducción

La dinámica de los fluidos es un área de la física que aún se estudia. Si bien hay muchos aspectos de éstos que se entienden bien, cuando los fluidos comienzan a viajar rápido surgen efectos de turbulencia que son muy difíciles de modelar matemáticamente. Este hecho hace que los experimentos con fluidos turbulentos sean una perfecta oportunidad para que los jóvenes observen fenómenos que ni siquiera los científicos podrían explicar completamente.

El experimento consiste en sostener el soplador tal que el viento salga hacia abajo. Mientras está soplando, se sostiene el disco por debajo de la salida del soplador, posicionándolo para que quede suspendido en el aire. La propiedad clave a observar en este experimento es la presión y las diferentes formas en las que podemos hacerla variar. Además, en la discusión de este experimento nos detendremos a exponer algunas ideas sobre ciertas (mal) concepciones en torno a la dinámica de

fluidos. En especial, dedicaremos una buena parte de las secciones posteriores a una discusión crítica de la ley de Bernoulli.

Procedimiento de armado del experimento

Para el procedimiento de armado del experimento de vórtices, necesitaremos las siguientes herramientas:

- Soplador.
- Cartón (preferentemente cartón piedra).
- Embudo de plástico.

El procedimiento de construcción del experimento de vórtices es el siguiente:

1. Cortar el cartón en forma de disco, tal que el diámetro del disco sea similar al diámetro mayor del embudo.

MATERIAL	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	PRECIO TOTAL	REFERENCIA
Soplador	\$10.000	1	\$10.000	Casa Royal
Cartón Piedra 55x70 cm ²	\$1.300	1	\$1.300	Casa Royal
Embudo de plástico 22 cm	\$990	1	\$990	Casa Royal

Tabla 3.1. Tabla con los materiales para la construcción del experimento. El precio total del experimento es de \$12.290.



Figura 3.1. Componentes del experimento de Vórtices. Obsérvese como queda finalmente el embudo, pues es de importancia para el buen funcionamiento del experimento.



Figura 3.3. ¡No pierda la paciencia si no resulta el experimento con el soplador inmediatamente!



Figura 3.2. Preocúpese de que puede mover el soplador/aspirador sin problemas.

2. Colocar la salida pequeña del embudo sobre la salida del soplador y adherir con pegamento. El resultado de cada una de las partes del experimento se puede apreciar en la Figura 3.1.
3. Adhiera el embudo que está pegado so-

bre la salida plástica del soplador/aspirador y posicionelo sobre la salida que deseé ocupar: la de aspiradora o la de soplador, tal como indica la Figura 3.2

4. Para usar el experimento, coloque el aspirador/soplador boca abajo y, en el embudo, con su mano sostenga el trozo de cartón (véase la Figura 3.3). Aspirelo/sópelo y observe como el cartón siempre se mantiene en el aire, incluso cuando ocupa el modo soplador: ¡increíble!

Preguntas con respuestas

Pregunta 1. El experimento es muy simple: es el efecto Bernoulli pues, a mayor velocidad, menor presión sobre el pedazo de cartón, ¿cierto?

Podría ocuparse el argumento de que, al observar la llamada “ecuación de Bernoulli” (o “ecuacion del efecto Bernoulli”, etc.), podríamos explicar el fenómeno presentado. La famosa ecuación rela-

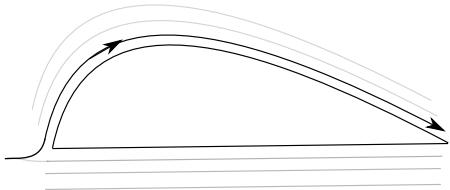


Figura 3.4. Líneas de flujo de un fluido alrededor de una superficie.

ciona la presión, la velocidad y la densidad del fluido de la siguiente manera:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + P + \Omega = C \quad (3.1)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, v es la velocidad del fluido, P es la presión, Ω representa cualquier potencial que podría existir en el sistema (en ausencia de gravedad este término es cero pero, por ejemplo, en presencia de esta, este término es, $\Omega = mgz$, donde z es la altura) y C es una constante. Básicamente, lo que la ecuación (3.1) nos dice es que el término que está a la izquierda es una constante del movimiento. Eso quiere decir que si una cantidad crece en algún punto, las demás deben disminuir (para mantener la suma de términos constante).

Por lo anterior, podría argumentarse que, como el aire que cae del soplador tiene una alta velocidad, y la ecuación de Bernoulli se debe cumplir, entonces el término de la presión en la ecuación (3.1) debe disminuir, creando entonces una menor presión por arriba del disco, mientras la presión atmosférica por abajo del disco se mantiene estable. Así, debido a la diferencia de presión, siendo la presión abajo del disco más grande (más fuerza por unidad de área), el disco se mantiene suspendido en el aire.

La explicación anterior está mal (exceptuando por la deducción de que una diferencia de presión es la que debe producir el levantamiento del disco). **La respuesta es NO: no es el efecto Bernoulli.**

Este es un serio problema en el currículum nacional, en donde hay muchas mal concepciones de lo que la ecuación de Bernoulli realmente dice. Lo que esta ley dice, en mecánica de fluidos, es

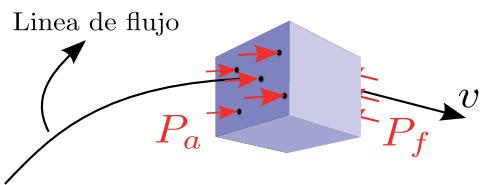


Figura 3.5. Diagrama de presión y velocidad para una línea de flujo.

que esta ecuación se cumple **en una línea de flujo**. En la Figura 3.4 se muestran distintas líneas de flujo que se forman al pasar alrededor de una superficie. En linea sólida indicamos una de estas líneas, la que será nuestro objeto de estudio. En esta línea se cumple, efectivamente la ecuación de Bernoulli, ecuación 3.1. Pero... ¿qué presión es la que aparece en dicha ecuación? En la ecuación de Bernoulli, la presión que aparece es la que actúa paralelamente a nuestra línea de flujo. Entendiendo la presión como fuerza por unidad de área, dicha presión es justamente la fuerza por unidad de área que "siente" una masa de fluido inmediatamente delante o detrás en esa línea de flujo, tal como se muestra en el diagrama de la Figura 3.5, en donde se muestra un volumen de fluido¹ con velocidad v que va en nuestra línea de flujo. Aquí, P_f denota la presión frontal, i.e., la presión que siente este volumen "por delante", mientras que P_a denota la presión que siente dicho volumen por atrás. De esta manera, la presión neta que aparece en la ecuación (3.1), puede ser expresada como:

$$P = P_f - P_a$$

Nótese que, expuesta de esta manera, la ecuación (3.1) no dice nada sobre las líneas de flujo aledañas (es decir, no dice nada sobre la presión encima o debajo de nuestro volumen de fluido), sólo habla de la presión ejercida **en la dirección paralela a la línea de flujo, en la línea de flujo**; es decir, la presión que siente "inmediatamente adelante e inmediatamente atrás" una partícula. Si se piensa de esta manera, la ley de Bernoulli tiene mucho sentido: si la partícula siente menos presión (i.e. la presión frontal disminuye y/o la presión trasera

¹ Constantemente usaremos el término "partícula" para referirnos a este volumen de fluido.

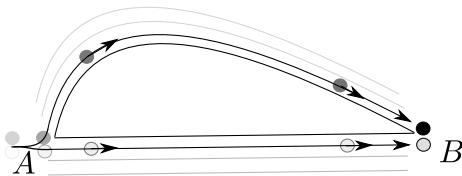


Figura 3.6. Diagrama de la “explicación” típica de por que los aviones vuelan por Bernoulli.

aumenta), entonces esta es “más libre de moverse” pues hay poca fuerza por unidad de área impidiendo su movimiento (o, incluso, si la presión trasera es suficientemente grande, puede darse que la partícula se sienta “empujada” y por tanto aumente su velocidad). Por otro lado, si la presión aumenta (es decir, la diferencia entre P_f y P_a aumenta, ya sea por que la presión frontal aumenta o por que la presión trasera disminuye), la velocidad disminuye, lo que también tiene mucho sentido. Insistimos: lo anterior no dice nada sobre la presión entre las líneas.

Una típica mal concepción de la ley de Bernoulli es la “explicación” de que los aviones vuelan por este efecto, lo cual veremos no tiene mucho sentido. En la Figura 3.6 se encuentra el diagrama típico que se presenta para “explicar” este fenómeno. Lo que usualmente se argumenta es que (no sabemos por qué) las partículas de aire que se separan en A deben volver a reunirse en B. El argumento dice entonces que, como la partícula que pasa por la parte superior debe recorrer una mayor distancia que la de abajo en el mismo tiempo (deben reunirse en B), entonces la partícula de arriba tiene mayor velocidad. Como tiene mayor velocidad, “por efecto Bernoulli” la presión disminuye y eso produce que la presión abajo sea mayor, levantando el ala del avión.

Hay tres serios problemas con esta “explicación”. El primero es... ¿por qué tienen que reunirse en B?, ¿es algún tipo de atracción o conservación? El segundo problema es que existen simulaciones con humo, en donde se puede observar este fenómeno con detalle, en el que se prueba justamente lo contrario a lo que dice este argumento: ¡las partículas que pasan por abajo llegan más rápido a B que las que pasan por arriba! Finalmente, el

tercer problema es el más grave: el mal uso del efecto Bernoulli. Insistimos en el punto: la variación de presión se refiere a la presión que siente la partícula adelante y atrás en su trayectoria, en su línea de flujo (que en el caso de la Figura 3.4, una línea de flujo sería la línea por la cual se mueve la partícula negra que pasa por arriba y otra línea de flujo sería la que pasa por abajo, por la cual se mueve la partícula ploma). No dice nada sobre lo que sucede inmediatamente abajo de la línea de flujo o inmediatamente arriba.

De todos modos, es interesante notar que hay muchos efectos por los cuales se dice los aviones vuelan (o, lo que es una pregunta menos ambiciosa, para explicar cómo las alas pueden sostenerse en el aire). Uno de estos usa el efecto Coända, la tendencia de los fluidos a seguir la forma por la cual estos fluyen, sumado al hecho de que, como las alas también son curvas por abajo, las partículas en las líneas de flujo generan “fuerzas centrífugas” sobre las alas, lo que genera una mayor presión hacia arriba (Babinsky, 2003). Otras explicaciones tentativas apuntan a que las alas en realidad están ladeadas “hacia arriba”, lo que provoca que la velocidad relativa de las partículas sea grande y “choquen” por debajo, también produciendo una mayor presión.

El debate por el vuelo de los aviones sigue activo en la literatura, por lo que incitamos a investigar este tema con detalle y cuidado: ¡puede ser una buena oportunidad para generar ciencia! Lo que sí es seguro, es que el efecto Bernoulli, al menos en este caso, no aplica.

Pregunta 2. Entonces, ¿por qué levita el disco si el viento sopla hacia abajo?

De acuerdo a un reciente trabajo de Li et. al (2008), la razón por la cual el disco levita es por un efecto llamado “levitación por vórtices”. En palabras simples, lo que uno “crea” dentro del embudo es un pequeño tornado, obligando a las partículas dentro del embudo a girar en círculos, disminuyendo así la presión sobre el disco. Este efecto es análogo a cuando revolvemos un bowl o una taza con algún líquido muy rápido: al aumentar la velocidad con la que se mueven las partículas en el fluido, las obligamos a moverse en círculos lo que finalmente forma una suerte de paraboloides, si la velocidad con la que revolvemos es lo

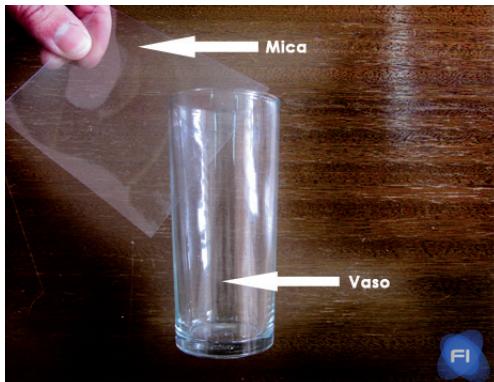


Figura 3.7. Elementos a utilizar en el experimento del vaso y la mica.

suficientemente grande. Para el caso de nuestro experimento, lo que estamos haciendo entonces es “revolver” el aire que está adentro, obligando al fluido (el aire) a moverse en círculos, dejando una baja presión en el centro, la que aumenta hacia las orillas del disco.

Extensiones del Experimento

Para seguir ilustrando la importancia de los efectos de presión, se puede hacer lo siguiente: se colocan dos latas de bebida vacías de lado sobre una mesa lisa, separadas por aproximadamente 1 cm de distancia. Con una bombilla, se sopla entre las dos latas y se observa que las latas se juntan (para dar más suspense, antes de soplar las latas ¡que los alumnos adivinen qué sucederá al soplar!). Claramente esto es por una diferencia de presión (menor presión en medio de las latas, mayor afuera) pues, así, la fuerza que sienten las latas es hacia el centro del sistema, y por ende se juntan. Como ya vimos, esto no tiene nada que ver con Bernoulli: ¿podría ud. explicar que sucede? (intente hacer el mismo experimento con las latas curvadas hacia el centro: ¿qué pasa?).

Otro experimento interesante de realizar es uno que puede hacerse con un simple vaso de agua y mica, los que se muestran en la Figura 3.7. La idea es llenar el vaso con un poco de agua, cubrirlo con el trozo de mica y dar vuelta el vaso sosteniendo suavemente la mica. La mica junto a nuestra mano evitan que el agua caiga, pero como vimos, la presión atmosférica es lo suficiente-



Figura 3.8. La mica se “sostiene sola” evitando que el agua caiga. La presión atmosférica hace su trabajo.

mente grande como para solucionar el problema por si misma. Si sacamos nuestra mano, como se muestra en la Figura 3.8, observaremos que la mica se “mantiene sola” evitando que el agua caiga: ¡todo es, justamente, acción de la presión atmosférica!

Si quiere, en este último experimento del vaso y la mica, también puede hacer un agujero en el centro de la mica, del tamaño de un mondadientes. Observará que el agua no caerá (la tensión superficial del agua hace su trabajo también!). De hecho, por el agujero puede meter un mondadientes y ver como este sube por el agua hasta que se encuentra con el aire: ¿puede explicar ud. este fenómeno?

Proposición de Actividades

Para seguir investigando el comportamiento del disco y el fluido, se propone la siguiente actividad:

1. Intente con discos de distinto material, con tal de cambiar su masa. ¿Cuál es la masa máxima que puede levantar el soplador?
2. Ahora cambie el tamaño del disco (usando siempre el mismo material) y estudie cuán pequeño y cuán grande puede ser.
3. ¿Se pueden levantar objetos que no sean discos? Intente con una pelota de tenis de mesa y cualquier otro objeto que quiera. Intente sacar conclusiones acerca de las propiedades

que debe tener el objeto para poder levitar con este soplador.

Referencias

1. Babinsky, H. (2003) *How do wings work?*, Phys. Educ. 38, pp. 497.
2. Li, X., Kawashima K. & Kagawa, T. (2008), *Analysis of vortex levitation*, Experimental Thermal and Fluid Science 32, pp. 1448-1454.

CAPÍTULO 3: ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

El Electroscopio

Jorge Anais

ESTUDIANTE DE LIC. EN ASTRONOMÍA | PUC

jorge.anais@fisicaitinerante.cl

Jacqueline Rubio

ESTUDIANTE DE LIC. EN ASTRONOMÍA | PUC

jacqueline.rubio@fisicaitinerante.cl

Resumen

A través del siguiente experimento, se introducirán los conceptos de **carga eléctrica y fuerzas eléctricas** enmarcándose en un experimento de fácil armado, realización y explicación: el electroscopio. Este consiste en un frasco de vidrio el cual posee una configuración tal que puede ser cargado. Al hacerlo, dentro del frasco se observa una repulsión de dos objetos debido a la carga de igual signo. Extensiones del experimento son propuestas, junto con explicaciones de los fenómenos involucrados.

Introducción

Muchas veces nos ha pasado que al quitarnos la ropa escuchamos unos chasquidos, que al bajarnos de un vehículo sentimos una descarga o que al tocar a un amigo sentimos que nos ha dado la corriente. Y tal vez, si somos lo suficientemente curiosos nos preguntemos ¿qué está pasando?

Como nosotros, los griegos hace 2500 años notaron que al frotar el ámbar, éste atraía pequeños objetos como plumas y pequeñas pajas. Esto dio origen al fenómeno que hoy entendemos como electricidad, que viene de la palabra griega ἥλεκτρον (élektron) y que quiere decir ámbar.

Para explicar este fenómeno, Benjamín Franklin propuso que todo objeto posee una cantidad normal de electricidad y cuando dos objetos se frotan entre sí, parte de la electricidad se transfiere de un cuerpo a otro, así uno queda con exceso de carga y otro con una deficiencia de carga de valor igual. Estas cargas las llamó con los signos más

y menos.

Al tipo de carga adquirida por una barra de vidrio frotada con un paño de seda la llamó positiva, lo cual significa que el paño de seda adquiría una carga negativa de igual magnitud.

Dos objetos que portan un mismo tipo de carga se repelen entre sí, mientras que si portan cargas opuestas se atraen entre sí.

La materia está formada, en general, por átomos eléctricamente neutros. Cada átomo está compuesto por un pequeño y masivo núcleo que contiene protones y neutrones. Los protones son partículas con carga eléctrica positiva, mientras que los neutrones no poseen carga. Rodeando al núcleo se encuentran los electrones: partículas con carga eléctrica negativa.

La carga del protón es $e = 1,602177 \times 10^{-19}$ C, mientras que la del electrón es $-e = -1,602177 \times 10^{-19}$ C. Todas las cargas en la naturaleza se presentan en cantidades enteras de la carga fun-

MATERIAL	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	PRECIO TOTAL	REFERENCIA
Frasco de vidrio (conservero) con tapa plástica (500 cc)	\$650	1	\$650	Easy
Alambre de cobre (1 metro)	\$1.000	1	\$1.000	Easy
Lámina de cobre (20 x 30 cm)	\$1.403	1	\$1.403	Librería Nacional
Huincha aisladora	\$690	1	\$690	Homecenter Sodimac
Papel Bond de 150 g	\$ 190	1	\$190	Librería Nacional

Tabla 1.1. Tabla con los materiales para la construcción del experimento. El precio total del experimento es de \$3.933.

damental e.

Cuando dos objetos se frotan entre sí, uno de ellos queda con un exceso de electrones, por lo que queda cargado negativamente, mientras que otro con un déficit de electrones, por lo que queda cargado positivamente. La carga total, o sea, la suma de la de ambos objetos, no cambia. Es decir, la carga se conserva. Esta es una ley fundamental de la naturaleza.

En esta experiencia construiremos un Electroscopio. Éste es un instrumento que nos permitirá observar si un objeto está cargado. El Electroscopio consiste en un sistema de dos hojuelas móviles aisladas eléctricamente del exterior, excepto por un extremo donde se ubica el captador de carga. Al estar en contacto con un objeto, las hojuelas del Electroscopio se separan entre sí, producto de que ambas han adquirido una carga de igual signo, indicando que el objeto está cargado.

Procedimiento de armado del experimento

Para construir el electroscopio necesitaremos los siguientes materiales:

- 1 frasco de vidrio con tapa plástica.
- 15 cm de alambre de cobre.
- 2 láminas de cobre de $11 \times 2 \text{ cm}^2$ y $6 \times 6 \text{ cm}^2$.
- Hoja de papel bond (150 gr) de $8 \times 10 \text{ cm}^2$.
- Cinta aislante.
- Una pajita.

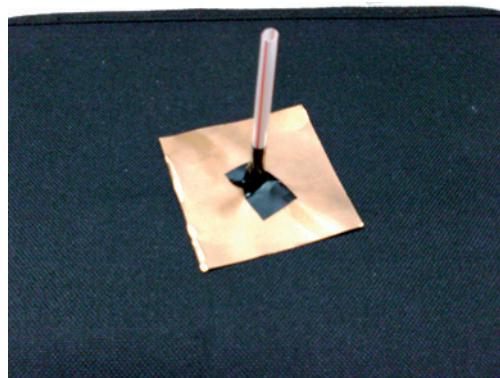


Figura 1.1. Trozo de cobre cortado con una pajita adherida.

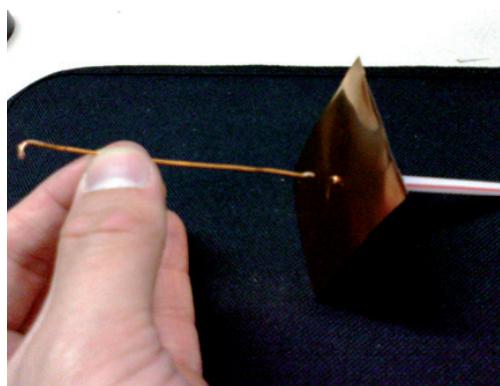


Figura 1.2. Paso del alambre por la lámina y la pajita de la Figura 1.1.

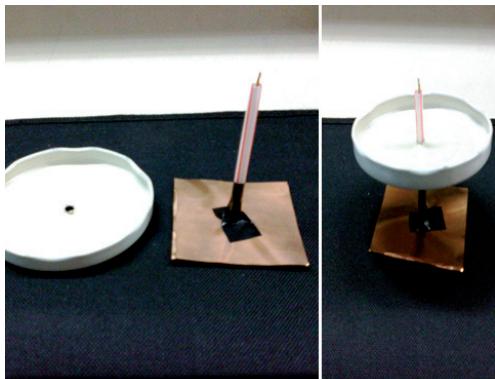


Figura 1.3. Tapa del frasco conservero con el agujero hecho y sistema de la Figura 1.2 pasandoatravés de este.

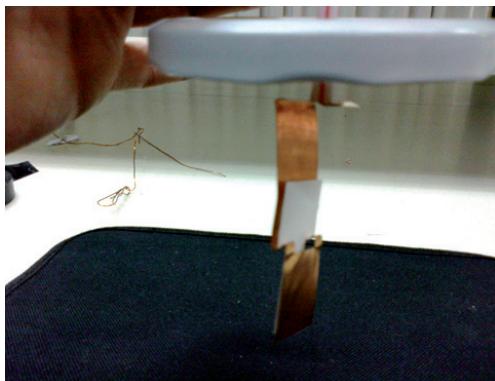


Figura 1.4. Sistema de hojuelas a armar.



Figura 1.5. Electroscopio armado.

Además, también necesitaremos las siguientes herramientas:

- Corta cartón.
- Alicate.
- Lápiz.
- Regla.

Para armar el electroscopio, seguiremos los siguientes pasos:

1. Corte una lámina de cobre, hágale un agujero en el centro y adhiérale una pajita, tal como se indica en la Figura 1.1.
2. Haga pasar un trozo de alambre por el agujero hecho anteriormente y por la pajita, tal como se muestra en la Figura 1.2.
3. Haga un agujero en la tapa del frasco conservero y haga pasar el sistema armado en el paso anterior por dicho agujero, como se muestra en la Figura 1.3.
4. Cree el sistema que se muestra en la Figura 1.4, compuesto de nuestro sistema anteriormente mencionado, del que cuelga ahora una hojuela de cobre, de la que a su vez cuelga una hojuela de papel bond.
5. Coloque la hojuela de papel en la abertura de la hojuela de cobre, tal como se muestra en la Figura 1.4, de manera que ésta pueda girar. Debe conseguir que la hojuela de papel quede en posición vertical cuando esta está descargada.
6. Colocar la tapa con el sistema en el frasco (Figura 1.5).

Es muy importante lograr que el sistema de hojuelas quede bien aislado, podemos asegurarnos que está bien cuando, al cargar el Electroscopio, las hojuelas permanecen algunos segundos separadas después de retirar el objeto cargado. Para lograr que vuelvan a su posición normal, toca el receptor de cargas con tu dedo.

Preguntas con Respuestas

Pregunta 1. ¿Por qué las hojuelas se separan al estar en contacto con un cuerpo cargado?

Cuando se toca el captador de cargas con una barra de plástico cargada, se transfieren algunas cargas negativas de la barra al captador, y de éste son conducidas a las hojuelas, las cuales se separan entre ellas debido a la repulsión de sus respectivas cargas negativas. Si se toca con una barra de vidrio cargada positivamente, las hojas también se separan. En este caso, la barra de vidrio cargada positivamente atrae a los electrones del captador de carga dejándolo cargado positivamente, al igual que a las hojuelas.

Por otro lado, si simplemente se acerca un objeto cargado (sin tocar el receptor de cargas), esto también logrará el efecto.

Proposición de Actividades

Es interesante realizar la siguiente experiencia:

Cargamos el Electroscopio, de manera que las hojuelas estén separadas, luego acercamos fuego y observamos. Trata de dar una explicación a este suceso.

Referencias

Modelo de Electroscopio extraído de <http://www.tecnoedu.com/F1000/> y el video <http://www.youtube.com/watch?v=AGsi4EzdW9k>.

El Electroimán y el Electromotor

Tatiana Tapia

ESTUDIANTE DE LIC. EN ASTRONOMÍA | PUC

tatiana.tapia@fisicaitinerante.cl

Resumen

El siguiente experimento busca introducir a los estudiantes en la teoría del electromagnetismo, de modo que con un experimento simple sean capaces de reconocer la relación entre campos eléctricos y campos magnéticos. Serán capaces de manejar conceptos como: campo eléctrico, imán y momento magnético. El experimento del electroimán consiste en un cable que ha sido enrollado a lo largo de un clavo, con la ayuda de una batería se hace circular la corriente a través del cable. Por otro lado, el electromotor consiste en una batería a la que se le adhiere un imán y un cable conecta una terminal de imán con una terminal de la batería. Todos los materiales son de fácil acceso y relativamente económicos.

Introducción

En el mundo actual el uso de los imanes, o bien campos magnéticos, es bastante extenso pero puede pasar inadvertido para los estudiantes. Todos hemos tenido la oportunidad de jugar con los típicos imanes decorativos que se utilizan en los refrigeradores, pero nos hemos preguntado ¿de qué material están hechos?, ¿los puedo encontrar de otros materiales?, ¿qué propiedad los puede hacer más o menos ``potentes``?, ¿de qué manera interactúan con los objetos?. Es importante que los alumnos logren comprender en una primera instancia de manera cualitativa lo que significa hablar de imanes y campos magnéticos; y cómo éstos se pueden relacionar con campos eléctricos. Lograr manejar conceptos como: corriente eléctrica, portadores de carga, aislantes, momento magnético, inducción magnética, permeabilidad magnética, materiales ferromagnéticos e histéresis.

En resumen la teoría electromagnética representa una gran base a lo que constituye la tecnología de

hoy en día, por lo que es necesario partir de las bases comprendiendo estos conceptos y las utilidades que tienen. Para poder lograr apreciar estos fenómenos de la naturaleza basta tener ciertos elementos muy asequibles que de manera muy clara podrán ilustrar estos conceptos.

- **Carga.** La carga es una propiedad fundamental de la materia, que está ligada a las fuerzas eléctricas y magnéticas, y es medida en coulombs (C). Todo, en el fondo, posee carga, pero los portadores de carga más relevantes para nuestro trabajo serán los electrones: Ellos poseen esta propiedad que justamente los hace moverse a través de los cables. Pero... ¿cómo? Gracias a la diferencia de potencial.
- **Diferencia de potencial (eléctrico).** Tal como un objeto con masa (otra propiedad fundamental de la materia) tiende a caer desde lugares más altos (que son llamados lugares con mayor potencial gravitatorio) hasta

MATERIAL	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	PRECIO TOTAL	REFERENCIA
Batería AA	\$530	1	\$530	Casa Royal
Metro de Cable	\$100	1	\$100	Homecenter Sodimac
Caja de clips redondos	\$240	1	\$240	Libreria Nacional
Huincha aisladora	\$690	1	\$690	Homecenter Sodimac
Clavos (pack de clavos)	\$1.390	1	\$1.390	Homecenter Sodimac

Tabla 2.1. Tabla con los materiales para la construcción del experimento del electroimán. El precio total del experimento es de \$2.910.

MATERIAL	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	PRECIO TOTAL	REFERENCIA
Imán de Neodimio (12mm diámetro y 3 mm de espesor)	\$2.290	1	\$2.290	La casa del imán
Pila AA	\$550	1	\$550	Casa Royal
Alambre de Cobre	\$1.000	1	\$1.000	Easy

Tabla 2.2. Tabla con los materiales para la construcción del electromotor. El precio total del experimento es de \$3.840.

lugares más bajos (que son llamados lugares con menor potencial gravitatorio) debido a la gravedad (que formalmente se dice que es por causa de la diferencia de energía potencial gravitatoria), un objeto con carga tiende a caer desde lugares de ``mayor potencial eléctrico'' hacia lugares de ``menor potencial eléctrico'': Por lo tanto, si hay una diferencia de potencial, entonces existirá movimiento. ¿Qué entrega diferencias de potencial? ¡Las baterías! La unidad de medida de la diferencia de potencial es el volt (V): a mayor diferencia de potencial, mayor movimiento.

- **Corriente.** La corriente eléctrica es un medidor de cuánta carga está fluyendo a través de cierto material por unidad de tiempo. Ésta se mide en ampere (A), que es igual a cuántos coulombs por segundo (C/s) fluyen en nuestro material.
- **Resistencia.** La resistencia es una medida de ``cuánto le cuesta a una carga pasar a través de un material''. La unidad de medida es el ohm. A mayor resistencia, más le costará a las cargas pasar a través del material pues varias chocarán en contra del mismo

y sólo algunas cargas podrán pasar a través de él. Esto produce un efecto importante, puesto que si chocan contra el material... ¡debiése aparecer energía de alguna manera en el mismo!

- **Aislante eléctrico.** Corresponde a un material que tiene la propiedad de evitar el paso de la corriente. A diferencia de un material conductor, el aislante tiene una gran resistencia, por lo que los portadores de carga no se pueden mover a través de él y producir una corriente eléctrica.
- **Permeabilidad magnética.** En el caso de campos magnéticos, no tenemos un aislante. Esto es porque hasta el día de hoy no se conocen ``portadores'' de campo magnético. Ahora bien distintos materiales pueden disminuir o aumentar en cierta medida la intensidad de un campo magnético, esta propiedad que determina cómo variará el campo magnético se llama permeabilidad del medio y es una propiedad del material. Esta es una propiedad macroscópica que se puede relacionar con cantidades microscópicas, como veremos en el momento magnético.

- **Momento magnético.** Es una propiedad que poseen los materiales a nivel microscópico, es decir, al nivel de las moléculas que lo componen. El momento magnético lo podemos pensar como una dirección, o bien una flecha. Esta flecha apuntará en cierto sentido, que será la orientación del momento magnético. Por convención llamaremos Norte a la punta de la flecha y Sur a la base de la flecha. Esta característica es intrínseca a cada partícula componente (electrones, protones, neutrones) y por ende a las moléculas que formen el material.
- **Imán.** Un imán corresponde a un material capaz de atraer a otros metales y su nombre viene del francés aimnat, que significa amante. Como ya vimos que microscópicamente cada molécula posee un momento magnético (el que nos indica una dirección y una magnitud del campo magnético) en un imán encontraremos que todos los momentos magnéticos se encuentran apuntando en la misma dirección. Estamos diciendo que los momentos magnéticos se encuentran alineados. Cuando sucede esto observaremos cómo toda la fuerza se ejerce en un mismo sentido y se potencia. Todos los ``nortes'' están hacia un lado y todos los ``sur'' están hacia el otro, por este motivo es que encontramos dos polos en un imán. Sabemos que si tenemos dos imanes, los polos opuestos se atraerán y los polos iguales se repelerán. Ahora podemos darnos cuenta que sí podemos tener variedad de imanes, ya sea cuan potentes sean (que tan intenso sea el campo magnético que generen) o el material del que estén hechos.
- **Inducción electromagnética.** Como podrás ver en este experimento, la electricidad y el magnetismo se encuentran estrechamente relacionados. Sigue que por un lado los imanes, que poseen un campo magnético son capaces de ejercer una fuerza sobre los portadores de carga y lograr que se muevan. Como ya sabemos que cuando existe movimiento de portadores de carga estamos en presencia de una corriente eléctrica, es así como podemos generar una corriente con inducción magnética. De un modo similar, podemos lograr un campo magnético a partir de una corriente (portadores de carga en movimiento), esta corriente inducirá un campo magnético en el espacio.
- **Tipos de materiales.** Como ya hemos visto los materiales son capaces de afectar un campo magnético de acuerdo a propiedades intrínsecas que éstos posean. Actualmente se conoce que existen tres tipos de materiales: ferromagnéticos, diamagnéticos y paramagnéticos.
- **Materiales Ferromagnéticos.** Este tipo de materiales posee un ordenamiento importante de los momentos magnéticos de sus moléculas, es por este motivo que la mayoría de los imanes que conocemos están hechos de materiales ferromagnéticos. Ejemplos de materiales ferromagnéticos son: fierro, cobalto y níquel, por nombrar algunos. La gran gracia que tienen los materiales ferromagnéticos es que el ordenamiento de sus dípolos magnéticos se mantienen por períodos prolongados de tiempo, o podemos decirlo coloquialmente que los materiales ferromagnéticos son capaces de ``acordarse'' de que son imanes.
- **Histéresis.** Se refiere a la capacidad de mantener una propiedad sin estímulo externo. Es por esto que los materiales ferromagnéticos poseen histéresis, ya que son capaces de mantener ordenados los momentos magnéticos.
- **Materiales Paramagnéticos.** Corresponde a materiales que, en presencia de un campo magnético externo, son capaces de ordenar los momentos magnéticos. A diferencia de los materiales ferromagnéticos, una vez alejados del campo magnético externo, vuelven a desordenarse los momentos magnéticos.
- **Materiales Diamagnéticos.** Otra clasificación, que se refiere a materiales que son repelidos por los imanes (por ambos polos). Estos materiales son capaces de ordenar sus momentos magnéticos a modo de ``espejo'' con el imán con que se estén enfrentando. Es por esto que siempre se repelerán, ya que este material creará un polo igual y logrará la repulsión. A modo de ejemplo materiales

diamagnéticos son: grafito, silicio y germanio por nombrar algunos..

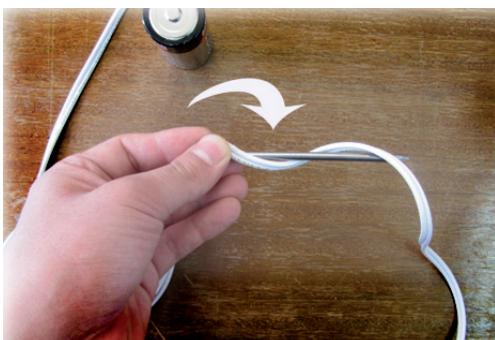


Figura 2.1. Cable enrollándose alrededor del clavo.

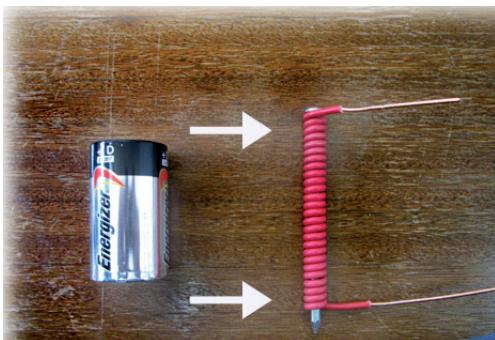


Figura 2.2. Electroimán terminado con extremos libres para poner en la pila

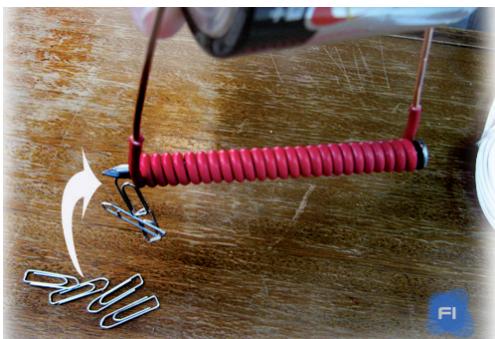


Figura 2.3. Electroimán en acción.

Procedimiento de armado del experimento

Para el procedimiento de armado del electroimán necesitaremos de un alicate. El procedimiento de construcción del Electroimán es el siguiente:

1. Enrollar el cable alrededor del clavo, de modo que queden dos extremos libres, tal como se muestra en las Figuras 2.1 y 2.2. Cuidar que quede aproximadamente 1 cm de clavo sin cubrir.
2. Dejar ambos extremos del cable apuntando en la misma dirección y pelar sus extremos, tal como se indica en la Figura 2.2.
3. Conectar la batería a los extremos del cable y asegurarlos con huincha aisladora o con los dedos, tal como se muestra en la Figura 2.3.
4. Acerque el electroimán a los clips: ¡usted ha creado un imán!

Para poder experimentar, la idea es fabricar varios electroimanes, con distintos números de vueltas del cable. Otro factor que se puede alterar para estudiar el funcionamiento del electroimán es utilizar baterías con distintas potencias. También podemos trabajar con clavos de distintos materiales.

Otra opción de armado puede significar incluir un porta batería y un interruptor para hacer más cómodo el uso del electroimán.

Para armar el electromotor necesitas los materiales listados en la Tabla 2.2 y mostrados en la Figura 2.4. Además, necesitarás una herramienta para cortar (corta cartón o tijeras).

1. Unir el imán con la pila, colocar el imán en un terminal de la pila.
2. Moldear el cable a una forma de helicóide, como se muestra en la Figura 2.5, asegurándose que las puntas del cable puedan hacer contacto con el imán y el terminal libre de la

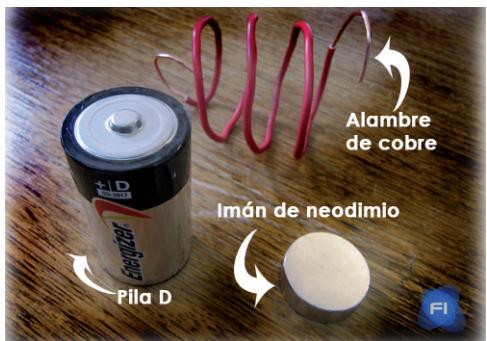


Figura 2.4. Elementos a usar en la construcción del electromotor.

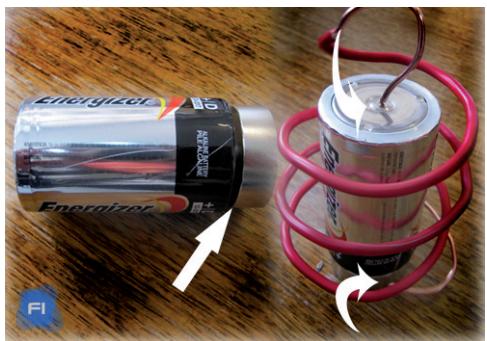


Figura 2.5. (Izquierda) Unión de la pila con el imán. (Derecha) Forma helocoidal del cable.

pila. También es importante que el cable pueda rotar fácilmente, es decir, que tenga una forma uniforme y no roce con la pila al girar.

Dependiendo del tipo de cable o alambre que se haya utilizado para la fabricación de este experimento, hay que recordar que los extremos deben estar libres. Si se utilizó un alambre esmaltado hay que lijarlos o si se utiliza un cable, hay que pelar los extremos.

Preguntas con respuestas

Pregunta 1. ¿Por qué no se remueve el aislante a todo el cable conductor?

Porque queremos mostrar que la corriente induce un campo magnético en el clavo, es decir, que no es necesario que fluya corriente a través del clavo. Es más, si removiéramos todo el aislante, sentiríamos la corriente en la superficie de nuestras manos al manipular el electroimán, lo que es po-

tencialmente desagradable y/o peligroso.

Pregunta 2. ¿Por qué cuando quito la pila, no se caen todos los clips?

Dependiendo del tipo de clavo que estemos utilizando, los clips podrán permanecer atraídos hacia el clavo (electroimán) por cierto período de tiempo. Esto estará directamente relacionado con una propiedad del material. Si es de un material ferromagnético, los clips u otros elementos podrán permanecer por más tiempo debido a la histéresis de los materiales ferromagnéticos. Importante recalcar que al quitar la pila, la corriente deja de circular instantáneamente por el cable.

Pregunta 3. ¿Si no pongo el clavo en el centro, el experimento funcionaría igual?

En teoría, si se saca el clavo debería formarse un "imán casero" también, aunque mucho menos potente (en el común de los casos, decenas de veces menos potente). Sucede que, como veremos, los campos magnéticos son formados por campos eléctricos en movimiento. En nuestro caso, las cargas que se mueven en el cable generan justamente este campo eléctrico en movimiento, lo que crea justamente un campo magnético. Aún así, dentro del clavo hay muchos átomos y moléculas en las que también existen cargas en movimiento.

Al sentir estas cargas en movimiento el campo magnético externo, estas se alinean con el mismo. Esto provoca que, justamente, nuestro imán sea más potente aún: todo gracias al material del clavo.

Ecuaciones relevantes para los experimentos

Lo más importante es comprender cualitativamente el electroimán, ecuaciones relevantes para los estudiantes de enseñanza media son:

El campo magnético al interior de un solenoide está dado por :

$$B = \mu n I$$

Donde μ es la permeabilidad del material ocupado, n el número de vueltas por unidad de longitud (propiedad que pueden calcular experimentalmente los alumnos) e I corresponde a la intensidad

de corriente que circula por el conductor.

La dirección de este campo magnético se puede encontrar según la regla de la mano derecha: con nuestros dedos de la mano derecha apuntamos en la dirección de la corriente y nuestro dedo pulgar nos dirá hacia dónde va el campo magnético.

Para el caso del electromotor, es importante obtener la fuerza ejercida sobre una partícula de carga q que se encuentra en un campo magnético B , pues justamente lo que le sucede a las cargas que fluyen en el cable del electromotor es ser perturbadas por dicho campo magnético. Esta fuerza se define como:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Donde v es la velocidad, B el campo magnético y q la carga de la partícula. Para encontrar la dirección de dicha fuerza, usamos la regla de la mano derecha: apuntamos con los dedos de la mano derecha hacia el primer vector (de la velocidad), luego giramos la mano hacia el vector del campo magnético y el dedo pulgar nos indicará la fuerza que siente dicha partícula. Nótese que si la carga es negativa, entonces la dirección será la contraria al dedo pulgar.

Para simplificar los cálculos, se puede determinar el módulo (magnitud) de la fuerza como:

$$F = qvB \sin(\theta)$$

Donde el ángulo theta es el ángulo entre la velocidad y el campo magnético.

Extensiones del experimento

Para el experimento del electroimán, como ya hemos mencionado, los parámetros del experimento que podemos variar son los siguientes: el número de vueltas del conductor alrededor del clavo, de esta manera podemos estudiar cualitativamente, y cuantitativamente si se quiere, el campo magnético de un solenoide. También se puede variar la batería, de este modo podemos generar corrientes de distintas intensidades a través del conductor y ver cómo afecta en el campo magnético inducido.

Por otro lado se puede trabajar con clavos de distintos materiales para estudiar las diferencias

entre ellos.

Por último se puede trabajar con otros cables conductores (distintas resistencias) que implicarán distintas corrientes.

También puede armarse una pequeña bobina para ver el efecto que tiene el clavo en la formación del campo magnético. Lo que se hace es enrollar alambre alrededor de un tubo de algún material (PVC, preferentemente), en donde además se le agrega un alfiler que pueda colgar con un hilo por dentro, que este imantado (se puede imantar un alfiler con el electroimán, por ejemplo). Al conectar una pila a los terminales de esta bobina, se podrá ver que el alfiler se orienta justamente con el campo magnético, probando entonces que la dirección del campo magnético sigue la regla de la mano derecha.

Para el experimento del electromotor, las variables del experimento que se pueden variar son: la pila que se utiliza, de modo de crear distintas intensidades de corriente y observar como puede modificar el movimiento del cable.

También se puede modificar el tipo de imán que se utiliza, a modo de variar el campo magnético al que son sometidos los electrones.

Por otro lado también se pueden variar las formas en las que se coloca el cable, para notar que la forma del cable no determina si se mueve o no, sin embargo algunas formas permiten mayor movilidad que otras.

CAPÍTULO 4: ONDAS

Oscilaciones y Resonancia

Claudia Araya

ESTUDIANTE DE LIC. EN FÍSICA | PUC

claudia.araya@fisicaitinerante.cl

Resumen

El próximo experimento, presentará conceptos de resonancia, fuerza y ondas, utilizando un montaje de trozos de madera colgados a distintas alturas. Éstas son 6, las que forman 3 pares que se encuentran a la misma altura, pero no en forma contigua. Al oscilar una, de forma tal que no realice contacto con las otras, las maderas comienzan a oscilar. Lo llamativo, es que la madera par a la inicial se mueve a la misma frecuencia..

Introducción

Las ondas como fenómeno está presente en varios fenómenos de la naturaleza, pasando desde el sonido, la luz (en su fenómeno dual) hasta las ondas mecánicas de las olas en el mar. El tema a estudiar, es el último con énfasis en la propagación de ondas en una cuerda y el análisis de un péndulo. Para esto, se definirán dos conceptos involucrados: Frecuencia de un péndulo y Resonancia.

- Frecuencia de un péndulo.** El péndulo se puede estudiar idealizadamente, definiendo sus propiedades más relevantes como la masa M que suspende y el largo L de la cuerda, y su variable, el ángulo que forma el hilo con la normal que irá cambiando a medida que la masa oscila. Al hacer un diagrama de fuerzas, se observan dos: la del peso de la masa M que apunta hacia abajo, y la tensión T que realiza la cuerda hacia arriba. Al descomponer el peso, según dos

ejes, con el eje y en dirección de la cuerda, se obtienen las siguientes expresiones:

$$Ma_T = -Mg \sin(\theta)$$

$$T = Mg \cos(\theta)$$

La primera ecuación se obtiene de la dirección transversal del movimiento, mientras que la segunda se obtiene de la dirección radial del péndulo. Aquí, a_T es la aceleración que toma M al oscilar como péndulo, es decir, la aceleración tangencial. Si esta aceleración tangencial, la relacionamos con el ángulo de movimiento y el largo de la cuerda, se obtiene:

$$a_T = \alpha L \Rightarrow -Mg \sin(\theta) = M\alpha L$$

Con α la aceleración angular del ángulo θ . Al simplificar M en ambos lados, hacer una aproximación para ángulo pequeño, y resolver la ecuación de movimiento angular resulta la ecuación de movimiento para θ , el ángulo de oscilación. Aún así, la relación más importante de esta solución es la frecuencia de

MATERIAL	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	PRECIO TOTAL	REFERENCIA
Madera de cholguán (40x20x0.2 cm)	\$8.300	1	\$8.300	Homecenter Sodimac
Hilo encerado o pita	\$1.000	1	\$1.000	Homecenter Sodimac
Tarugos	\$2.490	1	\$2.490	Homecenter Sodimac

Tabla 1.1. Tabla con los materiales para la construcción del experimento. El precio total del experimento es de \$11.790.

oscilación (i.e., cuántas oscilaciones realiza el péndulo por unidad de tiempo, medido en oscilaciones por segundo que en el S.I. se le denominan por Hertz), la que viene dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}}$$

Esta es llamada la “frecuencia natural” del sistema. Es algo así como la “frecuencia a la cual al sistema le gusta oscilar”. Lo magnífico de este resultado es que dicha frecuencia depende directamente del largo de la cuerda y de nada más: ¡no depende de la masa que pongamos! Por ejemplo, un péndulo de 15 centímetros de largo tendría una frecuencia de, aproximadamente, 1.3 oscilaciones por segundo, es decir, 1.3 Hertz.

Resonancia. La resonancia es el fenómeno en que la amplitud de vibración es máxima en el sistema. A la frecuencia que provoca este movimiento máximo, se le denomina frecuencia resonante, punto donde la transferencia de energía al sistema ocurre abajo las condiciones más favorables. Básicamente, si una fuente mueve una cuerda en forma constante, la resonancia ocurre cuando la fuerza aplicada está en fase con la velocidad y la potencia transferida al oscilador es un máximo. En palabras más simples, si hacemos oscilar un cuerpo con una fuerza que tenga la misma frecuencia que su frecuencia natural, lograremos un máximo de amplitud.

En el experimento a presentar, al empujar una masa M , su frecuencia dependerá del largo de la cuerda. Además, el movimiento se transferirá mediante la cuerda que une a todos los péndulos, vibrando cada masa según su largo. Por lo tanto, las que tengan longitud

cercana oscilarán casi a la misma frecuencia.

Procedimiento del armado del experimento

Para armar el experimento se necesitarán los siguientes materiales:

- Tarugo
- Madera
- Hilo
- Mecha
- Sierra

Y se armará según los siguientes pasos:

1. Cortar la madera con la sierra formando dos superficies de 40 x 20 centímetros. Estos formarán la base y el techo de nuestro experimento.
2. Cortar dos tarugos de una longitud de 30 centímetros.
3. Cortar un tarugo en 6 trozos de 5 centímetros cada uno.
4. Realizar dos extracción circulares en la madera base 2, de manera tal que los tarugos del paso 1 quepan allí.
5. Armar adheriendo los tarugos del paso 1 a la base, formando dos pilares. Por encima, adherir el techo cortado en el paso 1.
6. Perforar los 6 tarugos cortados en el paso 3, y luego amarrar un hilo a través de estos, procurando dejar 3 pares de igual longitud.

7. Luego, atar estos 6 hilos a un hilo mayor que cuelgue justo bajo el techo de la plataforma armada, amarrada firmemente entre los dos pilares. Esta cuerda debe estar lo más tensa posible.

Nótese que el sistema aquí propuesto es tentativo. El sistema puede armarse de muchas maneras distintas.

Preguntas con respuestas

Pregunta 1. ¿Por qué el movimiento se transfiere de una masa en movimiento a otras?

Porque el movimiento de una masa, se transfiere a través de la cuerda que soporta a todas, la que afectará a las demás según el largo que tenga cada masa. Es decir, en este sistema de péndulos, los movimientos no son independientes.

La gracia es que en el experimento la cuerda que sostiene todos los péndulos actúa como una fuerza oscilatoria, la que nos permite analizar el sistema.

Pregunta 2. El movimiento del péndulo, ¿se hará más lento si coloco una madera más masiva?

Tal como se analizó al comienzo, la frecuencia sólo dependerá del largo y no de la masa del péndulo en cuestión. En teoría, también podría depender del momento de inercia del objeto normalizado por la masa, por lo que si bien la distribución de la masa en sí podría importar, la masa misma del cuerpo no.

Pregunta 3. La tensión en la cuerda del péndulo ¿es siempre la misma?

No, esta va cambiando según el ángulo de inclinación con respecto a la vertical, y es máxima en el punto más bajo del péndulo.

Extensiones del experimento

Una modificación interesante es la que presenta el péndulo de Barton, que dispone de un péndulo principal y de una hilera de péndulos de diferentes alturas en forma decreciente y contigua. Además, se puede explorar este fenómeno en ondas sonoras, como los modos normales de una copa de

crystal. Al pasar un dedo limpio y mojado por la parte superior del cáliz (dando vueltas circulares alrededor de la copa), presionando levemente, se puede obtener un sonido muy agudo. Este sonido se provoca debido a la oscilación del sólido, que responde a una frecuencia determinada (ja pesar de que al rozarlo con nuestro dedo le impregnamos muchas frecuencias distintas!). Esta oscilación puede ser observada en más detalle al colocarla frente a un parlante y poner un papel sobre ella. Si se provoca por los parlantes un tono con exactamente la frecuencia que escuchamos anteriormente, la vibración de las partículas de la copa es máxima, provocando que el papel se mueva. Más aún, si subimos lo suficiente el volumen de los parlantes...¡la copa se romperá!

Referencias

1. Kleppner, Daniel; Robert J. Kolenkow (1973). *An Introduction to Mechanics*. New York: McGraw-Hill.
2. Serway, R. (1999) "Física Tomo I" pp.589. McGraw Hill Interamericana Editores, México.
3. Harvard Natural Science Lecture Demonstrations (2011), *Coupled Oscillations and Resonance*. <http://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/icb/icb.do?keyword=k16940&pageid=icb.page80864>
4. *Misconceptions in Oscillations*, <http://misconceptions.alfaphysics.co.in/oscillations.htm>

Ley de Difracción

Néstor Espinoza

ESTUDIANTE DE LIC. EN ASTRONOMÍA | PUC

nestor.espinoza@fisicaitinerante.cl

Nicolás Gonzalez

ESTUDIANTE DE LIC. EN FÍSICA | PUC

nicolás.gonzalez@fisicaitinerante.cl

Resumen

El próximo experimento intentará replicar, con unos pocos materiales, el experimento de difracción realizado por Young en 1801 con la ayuda de un láser y un CD. Conceptos como el comportamiento ondulatorio de la luz son mostrados junto con sus respectivas explicaciones y extensiones.

Introducción

Durante mucho tiempo, el debate estuvo abierto entre si la luz era una onda o una partícula. En 1801, Young demostró que la luz era una onda.

En este experimento se pretende mostrar claramente el fenómeno de la difracción, y también mostrar el comportamiento ondulatorio de la luz. Preguntas como ¿de qué nos sirve conocer la luz y sus propiedades?, ¿qué es la difracción? serán estudiadas así como una introducción a los fenómenos ondulatorios.

Los conceptos relevantes son los siguientes:

- **Luz.** La luz es una onda electromagnética que se propaga a través del vacío, a la velocidad de 300000 km/s. También es una partícula, llamada fotón que transporta pequeños paquetes de energía. La luz es ambos a la vez, por lo que se tiene que tratar con cuidado en cada problema físico.

- **Longitud de onda.** Propiedad de cualquier onda, correspondiente a la distancia entre una oscilación de la onda.
- **Difracción.** La difracción es un fenómeno que ocurre cuando las ondas, al encontrarse con barreras en su propagación, rodean al objeto y se siguen transmitiendo, donde cada punto de la onda es una nueva fuente de emisión. Desde las olas en el mar hasta la luz, la difracción es un fenómeno muy común y no poco conocido. No confundir con **refracción**, que corresponde al cambio de la dirección de los rayos de luz al cambiar el medio donde se están propagando.

Procedimiento de armado del experimento

Para armar el experimento de la Ley de Difracción necesitaremos las siguientes herramientas:

- Cortacartón.
- Adherente para maderas.

MATERIAL	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	PRECIO TOTAL	REFERENCIA
Trozo de madera (10x5x1)	\$1.000	1	\$1.000	Homecenter Sodimac
CD	\$250	2	\$500	Homecenter Sodimac
Adherente “No más clavos”	\$1.690	1	\$1.690	Homecenter Sodimac

Tabla 2.1. Tabla con los materiales para la construcción del experimento. El precio total del experimento es de \$2.940.



Figura 2.1. Experimento de Ley de Difracción terminado.

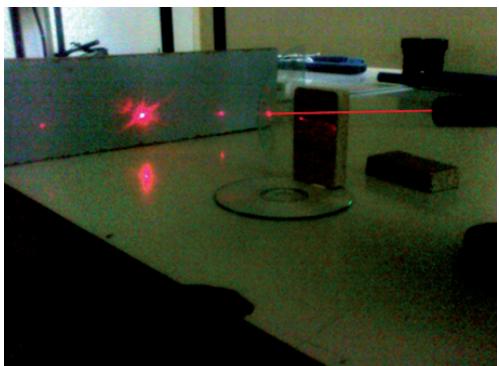


Figura 2.3. Segunda modalidad del experimento de Ley de Difracción, con el CD con capa reflectante boca abajo.

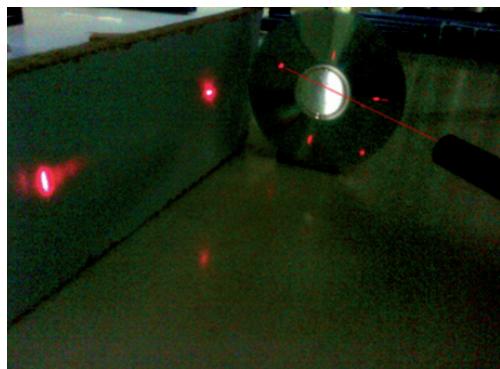


Figura 2.2. Primera modalidad del experimento de Ley de Difracción, con la configuración de la Figura 2.1.

El procedimiento para armar el experimento es el siguiente:

1. Tome un CD y raspe la capa reflectante (el lado del CD por el que aparecen los logos) con la ayuda del cortacartón.
2. Con mucho cuidado, corte este CD por la

mitad.

3. Adhiera el CD cortado y otro CD completo (con la capa reflectante) tal como se muestra en la Figura 2.1 a la madera.

Este experimento tiene dos modalidades de ejecución. El primero es poner el CD que está cortado boca abajo y dejar el CD con la capa reflectante parado, tal como se muestra en la Figura 2.1. Así, si se pone una superficie plana frente a dicho CD y se hace rebotar un haz de luz desde el CD a la superficie, se observa el patrón mostrado en la Figura 2.2. Por otro lado, si se pone el CD con la capa reflectante intacta boca abajo y se hace pasar el haz de luz através del CD que cortamos que no posee dicha capa, se observa el patrón de la Figura 2.3.

Tenga en consideración que lo que estamos pasando a llevar en el CD son círculos concéntricos (que en realidad son espirales) de partes grabables y no grabables, por lo que es óptimo apuntar con el láser siempre en la dirección radial.

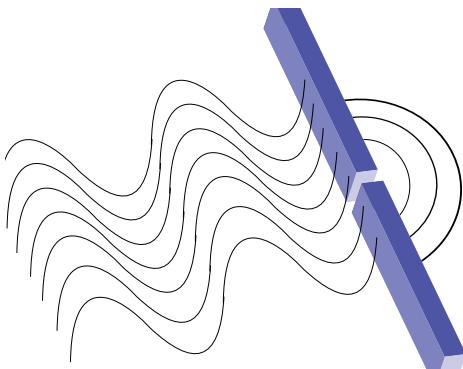


Figura 2.4. Ondas circulares (cilíndricas, en estricto rigor) generadas al encontrarse una onda plana con una ranura.

Preguntas con respuestas

Pregunta 1. ¿Por qué se produce el patrón observado?

En general, cuando una onda plana se encuentra con una ranura por la cual puede pasar, se produce un patrón como el que se observa en la Figura 2.4. En nuestro experimento, lo que tenemos en realidad es una configuración como la de la Figura 2.5, en donde los patrones generados por las distintas ranuras se suman y cancelan, dependiendo de la distancia a la que se encuentren las ranuras. En la pantalla dibujada en la Figura 2.5, que “recibe” el golpe de las ondas, justo a la mitad de la distancia entre las ranuras, por ejemplo, se observará un máximo de intensidad de onda (luz, en nuestro caso), disminuyendo este máximo a medida que nos movemos de dicha distancia. En algún punto mientras nos alejamos, aún así, las ondas se volverán a sumar (aunque con menor intensidad que la del centro), y observaremos otro “máximo de intensidad”. Este es exactamente el patrón que se observa en las Figuras 2.2 y 2.3: un máximo en el centro y luego, una cierta distancia hacia los lados, nuevamente máximos de intensidad. Nótese que entre estos máximos hay ausencia de luz (¡las ondas se destruyen entre sí! en otras palabras... ¡luz más luz puede generar oscuridad!). A este patrón de máximos y mínimos de luz se le llama patrón de difracción. Los CD, en particular, tienen pequeñas rendijas que separan las partes “grabables” de las que no, lo que permite que veamos este patrón.

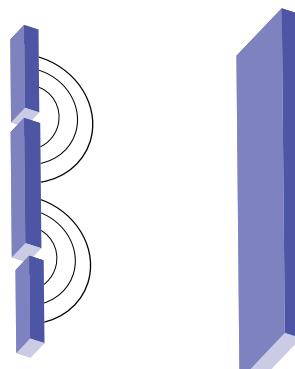


Figura 2.5. Ondas generadas en el experimento de la Ley de Difracción.

Pregunta 2. ¿Puedo usar cualquier tipo de iluminación?

En un principio la respuesta es afirmativa, pero sería muy difícil observar los efectos, ya que la luz de una linterna, por ejemplo, está compuesta de muchos colores y sale en muchas direcciones (cada color tiene su propio patrón de difracción), a diferencia del láser, donde los rayos de luz salen sólo en la dirección en la que se apunta.

Pregunta 3. ¿Por qué no vemos la difracción de la luz cada vez que se ilumina algo?

Para que ocurra este fenómeno, se deben dar ciertas condiciones, como intensidad relativa de los máximos con respecto a la luz de fondo, la longitud de onda de la luz y por sobre todo, el tamaño de los objetos que interfieren en el camino de la luz. Cuando los objetos son del tamaño parecido a la longitud de onda de la luz, se producirá difracción, pero como la mayoría de los objetos que usamos son muy grandes, no podemos percibir el efecto.

Ecuaciones relevantes para los experimentos

La difracción, como se dijo antes, no es únicamente un fenómeno que afecta a la luz, sino que a todas las ondas. En teoría, cada punto del frente de onda, es un fuente de la onda, así, cada punto emite una onda esférica. El fenómeno es más notorio cuando el objeto que interfiere es del tamaño de la longitud de onda. Es por eso que las ondas

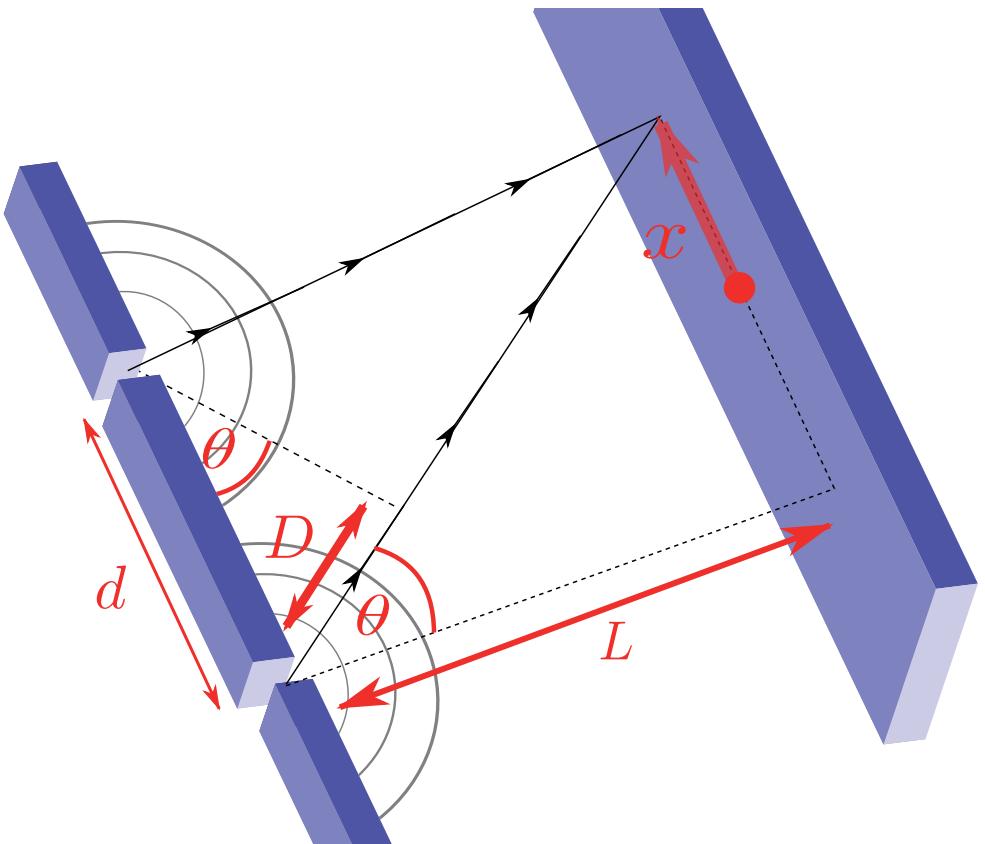


Figura 2.6. Geometría del problema en el experimento de la Ley de Difracción mediante dos rendijas.

en el mar se propagan sin importar los obstáculos, o la señal de radio que se escucha incluso entre los edificios.

La razón por la cual observamos el patrón de difracción que observamos es que las ondas de luz producen interferencia constructiva y destructiva. Si la diferencia de camino entre dos ondas iguales es un múltiplo de la longitud de onda, por ejemplo, se producirá interferencia constructiva (las ondas se sumarán). En la Figura 2.6 se muestra la geometría del problema. Si seguimos dos rayos de luz que emergen de las distintas ranuras, como propusimos, existirá interferencia constructiva siempre y cuando:

$$D = d \operatorname{sen}(\theta) = n\lambda$$

Donde D es la diferencia de camino entre los rayos, d es la separación entre las ranuras, θ es el ángulo de inclinación con respecto a la normal desde la ranura de abajo y λ es la longitud de onda, tal como se indica en la Figura 2.6. Note que en dicha configuración puede ser difícil obtener el ángulo θ , pero ud. puede medir L , la distancia de las ranuras hacia la pantalla en donde se observa el patrón y x , la distancia entre el máximo central y el máximo que ud. observa justo alrededor de este. Es fácil demostrar que, si asumimos que este ángulo es pequeño (lo que nos permite aproximar una tangente a un seno) y d , la separación entre las rendijas, también es pequeño en comparación a x , se obtiene:

$$d = \frac{n\lambda L}{x}$$

Notar que, si bien cuando n vale 1 corresponde a los máximos más brillantes, para valores mayores de n siguen habiendo máximos, sólo que son muy débiles.

Proposición de actividades

Usando un láser de longitud de onda distinta, por ejemplo verde, podría calcularse la longitud de onda del nuevo láser, dado que conocemos la separación entre las rendijas.

También puede calcularse la posición de los máximos secundarios, por ejemplo $n=2$ y, en una habitación oscura, medir su ubicación experimentalmente.

