

# Diez prácticas y una filosofía en la enseñanza de la física

## Introducción

Francisco Jaque Rechea  
Fernando Cusso Pérez

**D**ESDE tiempo atrás ha sido una preocupación constante en aquellos que nos dedicamos a la enseñanza de la física el que los alumnos «vean» y midan los fenómenos físicos. Es muy común en nuestras Facultades, Colegios e Institutos llenar pizarras de fórmulas sobre los campos eléctricos y magnéticos, pero si uno pregunta: ¿quién ha medido si la fuerza entre cargas sigue una ley con el inverso del cuadrado de la distancia?, verá que son muy pocos o ninguno los que contestan afirmativamente. Para más desesperación experiencias de este tipo y otras que se mencionan en este trabajo son fáciles, baratas, bonitas y sólo necesitan algo de dedicación.

Antes de comentar la filosofía de las prácticas mencionaremos que la experiencia que refleja este trabajo consistió en la realización de «diez» prácticas sobre temas teóricos que forman parte del programa de Física General del Primer Curso de Licenciatura en la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Madrid. La elección de estas diez prácticas no es única, ni pretendemos decir que la mejor, simplemente de ellas se ven fenómenos relacionados con la Mecánica, Electricidad y Magnetismo de los

que se pueden obtener sus leyes matemáticas. Si el éxito acompaña a esta experiencia, los mismos

temas teóricos pueden ir acompañados con distintas prácticas a fin de que en unos años se pueda completar una panorámica de la física a nivel de C.O.U. y primer Curso de Facultad de Ciencias.

Las experiencias elegidas se realizaban después de la explicación teórica del tema. Los alumnos formaban grupos de cuatro, realizando posteriormente una discusión en clase sobre los datos obtenidos, teniendo por tanto una buena estadística para también «ver» los errores y discutir sus fuentes. Una vez discutidas las prácticas, cada alumno debía desarrollar un texto que comprendía distintos apartados, cuyos objetivos se detallan a continuación.

## Introducción

Se pretende en este apartado exponer la parte teórica necesaria para la realización de la práctica así como comentarios bibliográficos e históricos en los casos oportunos. Esta parte obliga al alumno a un repaso personal de lo explicado en las clases teóricas.

Se hace una descripción de como se midió el fenómeno físico haciendo una relación de los distintos equipos utilizados. Es importante destacar aquí dos aspectos. a) El alumno debe realizar un esquema general de la experiencia, así como exponer detalles concretos de la misma, lo que le sirve como aprendizaje para futuros diseños. b) Debe mencionar también la sensibilidad de los equipos, no para hacer un cálculo de errores serio, sino para poder discutir si con ellos puede medir con exactitud y finalmente comentar cuales son las posibles fuentes de errores.

## *Resultados*

El alumno expone en este apartado los resultados comentando las figuras. Es obvio decir aquí el interés de la representación de los datos, la elección adecuada de unidades en los ejes, utilización de distintos papeles para representar y utilizar correctamente las unidades, etc. ¡Cuántos artículos científicos no apetece leerlos por unas figuras mal presentadas!

## *Discusión*

En esta sección se discuten los resultados. Si no han «salido bien» del todo ... mejor, pues nos dan otra oportunidad de aprender al discutir el por qué de esa desviación con la teoría. Si el resultado es correcto nos queda la resignación de haber medido con finura.

Finalmente el alumno debe dar su impresión sobre lo que ha visto y medido, siendo este el momento donde más se le deja rienda suelta a su imaginación. Si el lector, al ver esta composición, recuerda lo parecida que es al formato de un trabajo científico en una revista científica, está en lo cierto.

La exposición de las prácticas va acompañada de reseñas bibliográficas de científicos cuyos trabajos estuvieron relacionados con la materia de la práctica. Queremos destacar que hay una excepción. La primera reseña bibliográfica corresponde a D. Nicolás Cabrera, fundador de la División de Física de la Universidad Autónoma de Madrid (U.A.M.), cuyas aportaciones en el campo de la Física de Sólidos, que obviamente no están tratados en este trabajo, han sido fundamentales en el desarrollo de esta disciplina en los últimos treinta años. Además es aceptado en la Comunidad Científica Nacional en la extensa área de la Física de Sólidos que su trabajo, su personalidad y entusiasmo por volver a lanzar la investigación en España ayudaron de forma decisiva al auge de la Física en España, desde su llegada hacia el final de la década de los años 60 a nuestro País.

Por tanto creemos que la inclusión de la reseña del Profesor Cabrera, no sólo es de justicia por su gran labor científica sino que proporciona una importante dosis de optimismo en cuanto a la capacidad de hacer Ciencia por parte de la comunidad científica española. Y no nos cabe ninguna duda que hacer Ciencia, aunque sea de forma humilde, significa hacer una mejor docencia.

# **Práctica nº 1: movimiento uniforme y uniformemente acelerado**

**Nicolás Cabrera Sánchez (1913-198 )**

Nicolás Cabrera nació en Madrid el 12 de febrero de 1913. Su padre, Blas Cabrera, fue un científico de renombre internacional y creador en España de una prestigiosa escuela de magnetismo cuyo trabajo se desarrolló en el Instituto Nacional de Física y Química fundado en 1932 bajo el mecenazgo de la Fundación Rockefeller.

Nicolás Cabrera comienza su andar científico en este Instituto con otro joven físico y posteriormente profesor de gran prestigio, Salvador Velayos, que mantuvo en España la tradición en magnetismo iniciada por su maestro Blas Cabrera después de la guerra civil. Este trágico episodio interrumpe la actividad del grupo fundado por Blas Cabrera que ya tenía en el año 1936 una gran relevancia internacional.

Exiliado en París, Nicolás Cabrera trabajó en el Bureau Internacional de Pesas y Medidas. Posteriormente se traslada a Inglaterra para trabajar en la Universidad de Bristol con importantes hombres de la ciencia como el premio Nobel Sir Neville Mott. Sus trabajos de aquella época sobre la teoría de Oxidación en Metales (1949) y sobre el crecimiento de cristales (1951) han sido pilares fundamentales en el desarrollo de la Física del Estado Sólido.

Nicolás Cabrera se traslada a los Estados Unidos en 1952, concretamente a la Universidad de Virginia. Durante sus años en Virginia trabaja en una nueva disciplina: la Física de Superficies, cuyo papel en el desarrollo de áreas tan importantes como por ejemplo la microelectrónica, ha sido fundamental.

En 1969 vuelve profesionalmente a España como Director de la División Física de la recién creada Universidad Autónoma de Madrid y apuesta, con entusiasmo, por la idea de hacer Física en España. Durante esta etapa compagina la labor de gestión de crear la infraestructura suficiente para hacer Ciencia en la U.A.M. con el trabajo de investigación en la Física de Superficies, demostrando su «olfato» científico en el estudio de efectos de emisión de puntas, que daría lugar años después al descubrimiento del «microscopio de efecto túnel».

Pero quizás, en esta última etapa, lo más destacado de Nicolás Cabrera fue devolver la ilusión por la Ciencia, comenzando con el grupo de científicos que alrededor de él se formó en la Universidad Autónoma de Madrid y que posteriormente influyó en el despertar científico de España en los comienzos de la década de los años 70.

## **Práctica**

### **Introducción**

Se pretende en esta práctica comprobar la Ley de Inercia, de que toda partícula libre mantiene su estado cinético. Naturalmente es fácil ver que si no hay fuerzas exteriores y la partícula está en reposo sigue siempre en la misma situación. Pero ... ¿y la segunda parte? No encontramos fácilmente a nivel de laboratorio algo que se mueva siempre con velocidad constante, porque es difícil eliminar las fuer-

zas externas no intencionadas y un buen ejemplo es el razonamiento.

Para realizar esta práctica, se requiere conocer el concepto de impulso  $F \cdot \Delta t$ , pues para poner en movimiento un cuerpo aplicaremos una fuerza durante un tiempo que será lo suficientemente largo, como para observar durante el mismo el movimiento acelerado. Asimismo, la presencia de las fuerzas de razonamiento será también visualizada.

### ***Técnica experimental***

La primera necesidad en este tipo de medidas es la de disponer de un reloj adecuado. Dado, como veremos más adelante, que nuestros móviles se mueven a velocidades del orden de 50 cm/s, un cronómetro normal de precisión  $\approx 0.5$  s no es suficiente si el carril por donde deslizan nuestros móviles es de 1 m de longitud. Así que necesitamos medir tiem-

pos más cortos o mejor dicho, menos largos, pues un segundo en Física es casi una eternidad.

El sistema elegido como reloj se presenta en la Figura (1) y consta de un electroimán con núcleo de hierro alimentado a 220 V. Con esta alimentación el cursor, A, golpea sobre una cinta grabadora dando 50 golpes por segundo. De esta forma, entre dos golpes el tiempo transcurrido es:  $\Delta t = 1/50 \text{ s} = 0.02 \text{ s} = 20 \text{ ms}$ .

Es interesante comentar que en este tiempo un avión a 900 Km/h recorrería sólo cinco metros. ¡No está mal la elección del reloj!

Una vez elegido nuestro reloj, sencillo y rápido, el movimiento lo haremos sobre unos carros de bajo rozamiento que se presentan en la Figura (2). Las ruedas son muy finas para evitar dicho rozamiento, pero no del todo, hecho que como veremos más adelante es de agradecer, pues nos servirá para adquirir más conocimiento a partir de nuestras medidas.

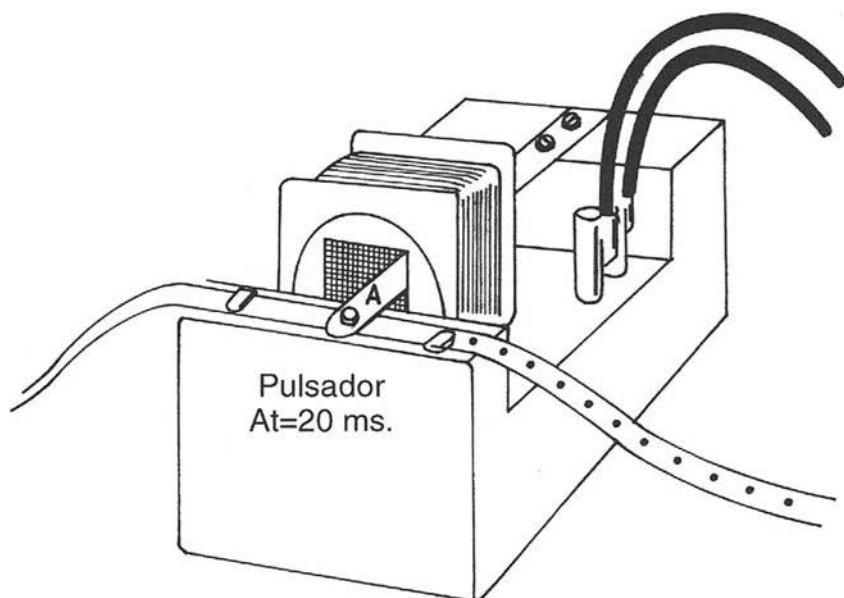


Figura 1. «Reloj» consistente en un electroimán con núcleo de hierro alimentado a 220 V. El cursor, A, golpea sobre la cinta cada 20 ms.

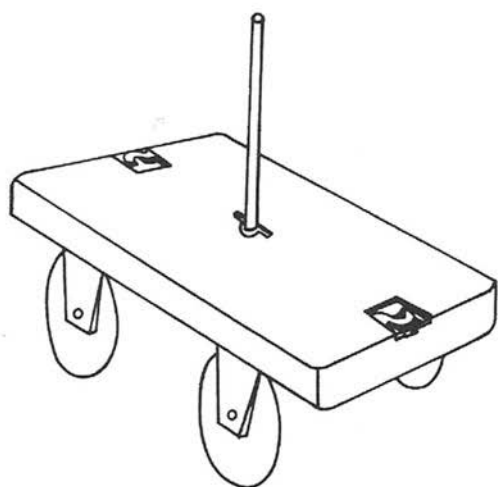


Figura 2. Carro de ruedas muy finas para disminuir el rozamiento.

## Resultados experimentales

La Figura (4) presenta la grabación sobre la cinta al dar un impulso al carro con una masa total de 30 gr. Pueden, a simple vista observarse tres zonas.

La zona I, cuyo espaciado ( $\Delta S$ ), para un mismo intervalo de tiempo  $\Delta t = 20 \cdot 10^{-3}$  s aumenta, debe corresponder al tiempo en que permanece la fuerza (mano) aplicada al carro. El movimiento es por tanto uniformemente acelerado y el tiempo de aplicación de la fuerza es del orden de 80 milisegundos.

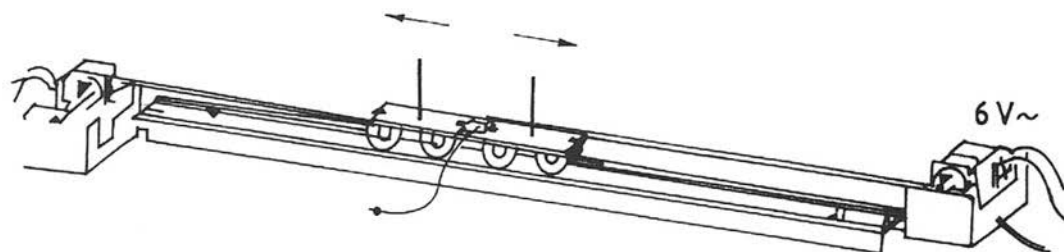


Figura 3. Sistema experimental para el estudio del movimiento uniforme y uniformemente acelerado.

El impulso al carro lo daremos con la mano y tendrá una duración que podremos medirla con nuestro reloj. Así veremos lo rápidos que somos aplicando una fuerza sin necesidad de ser unos consumados boxeadores de la Física. Finalmente la Figura (3) presenta una panorámica general de la experiencia.

En la zona II el espaciado es prácticamente constante, lo que supone un movimiento uniforme: no hay fuerzas aplicadas y de acuerdo con la ley de inercia no debe variar la velocidad.

Finalmente (zona III) para tiempos más largos empieza a notarse un descenso en el espaciado  $\Delta s$ , lo

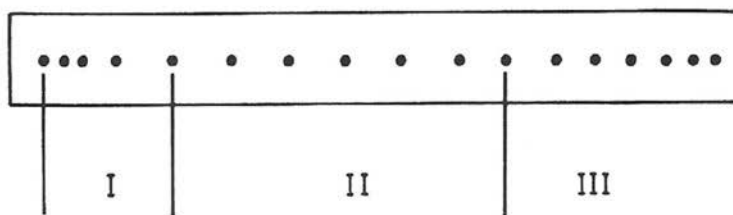


Figura 4. Grabación resultante sobre la cinta del «reloj».

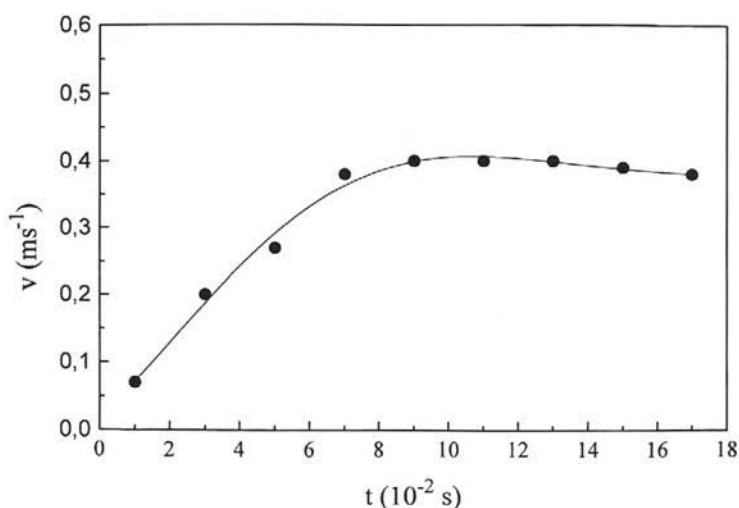


Figura 5. Velocidad media calculada para incrementos del tiempo de 20 ms, en función del tiempo total.

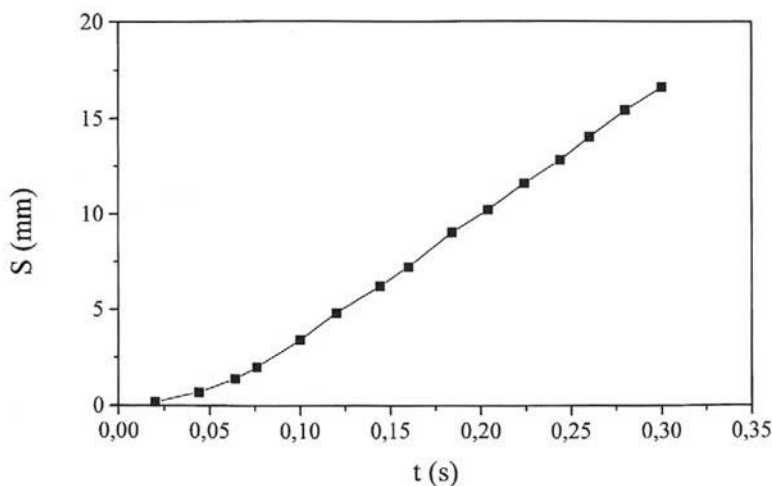


Figura 6. Espacio recorrido ( $S$ ) en función del tiempo ( $t$ ).

que supone que visualizamos una fuerza, opuesta al movimiento cuyo origen está en el rozamiento carril-carro, resistencia del aire, etc.

En la Figura (5) se ha dibujado la velocidad media para incrementos del tiempo de 20 ms, en función del tiempo total. El  $\Delta t$  es tan pequeño que podemos decir que se trata de la velocidad instantánea.

La velocidad  $v$  aumenta hasta llegar a una situación «casi» constante. Para tiempos más largos se observa una lenta disminución en el valor de  $v$ .

La Figura (6) presenta los valores del espacio en función del tiempo, observándose después del cuarto intervalo ( $t = 4/50 \text{ s}$ ) un comportamiento lineal acorde con la ley de inercia (movimiento uniforme).

## ***Discusión y conclusiones***

Es interesante destacar en primer lugar como pueden obtenerse con gran fiabilidad medidas durante tiempos «cortos» con el método sencillo aquí empleado.

Ya en relación con las medidas realizadas, el aumento de la velocidad, ver Fig. (5), durante alrededor de  $8 \cdot 10^{-2}$  s, se puede explicar porque es durante ese tiempo cuando la fuerza de nuestra mano se aplica y el movimiento es uniformemente acelerado. Esto también se observa en la Fig. (6), donde la dependencia lineal se cumple después de una superlinealidad de  $S$  frente a  $t$  (zona I) que se asemeja o parece parabólica. ¿Podría ser del tipo  $S \approx t^2$ ?, parece

que sí y esto se verá en la siguiente práctica al medir la caída libre de los cuerpos.

Finalmente queremos mencionar que esta experiencia visualiza muy bien no sólo el concepto de Ley de Inercia, sino también el de velocidad media e instantánea. Además y para terminar llamamos la atención de como las cosas salen bien, aunque hemos dado el impulso con el dedo, hay rozamiento, no tenemos ningún colchón de aire entre el carril y el carro ... En resumen hemos hecho una «chapuza» (pero ha salido bien).

En adelante veremos como hay que hacer esas «chapuzas» en Física y como la naturaleza, a pesar de nuestro poco cuidado, está deseosa de revelar sus secretos.

## **Práctica nº 2: caída libre. Movimiento uniformemente acelerado. Media de g.**

### **Galileo Galilei (1564 - 1642)**

Astrónomo y físico italiano. Descubridor de las lunas de Júpiter y de las leyes que gobiernan la caída de los cuerpos.

Normalmente conocido por su nombre de pila, Galileo, nació en Pisa, hijo de padre médico. Aunque comenzó sus estudios como estudiante de medicina, su interés cambió posteriormente hacia las matemáticas y la física.

Fue profesor de matemáticas en Pisa a la edad de 25 años, trasladándose posteriormente a Padua en 1591 y más tarde a Florencia.

Si bien nunca se casó, tuvo dos hijas y un hijo de Marina Gamba, de origen veneciano, a quienes abandonó cuando se trasladó a Florencia en 1610.

La fama de Galileo descansa, en gran parte, en los descubrimientos que hizo mediante el telescopio, un instrumento que aunque no inventó él mismo fue realmente el primero en explotar con éxito. Su diseño usaba un objetivo de vidrio convexo y un ocular cóncavo dando como resultado una imagen directa del objeto.

En 1610 observó por primera vez las montañas de la luna, cuatro satélites alrededor de Júpiter y numerosas estrellas, demasiado débiles para ser observadas a simple vista. Estas observaciones, descritas en su libro «mensajero Sideral» (1610), le hicieron famoso. También descubrió las fases de Venus, manchas solares y la estructura compuesta por Saturno y aunque fue incapaz de observar los anillos del mismo como tales, lo observó como un planeta triple.

Sus descubrimientos de cuerpos celestes que de una manera tan evidente no giraban en torno a la tierra, así como su apoyo, público y abierto, a la Cosmología heliocéntrica de Copérnico le llevaron a entrar en conflicto con la iglesia.

En 1632 escribió su «Diálogo de los dos sistemas del mundo». En este libro trataba de mantener su apoyo al punto de vista copernicano de una forma diplomática, pensando que las autoridades eclesiásticas verían dicha versión con simpatía, aunque evidentemente falló al interpretar la resistencia oficial ante las nuevas ideas. Al año siguiente se encontró ante la Inquisición y le fue mostrada la cámara de la tortura, viéndose forzado a claudicar. Fue sentenciado a arresto domiciliario de por vida a la edad de 69 años.

Entre sus notables descubrimientos no astronómicos se halla el del «Isocronismo del Péndulo», es decir, la constancia del período del péndulo para oscilaciones pequeñas. Estas oscilaciones fueron medidas por Galileo, utilizando su propio pulso, cuando era un estudiante de medicina. Galileo diseñaría un reloj cuyo escape estaba controlado por el péndulo, que fue construido por su propio hijo tras la muerte de Galileo.

También encontró que la velocidad de caída de los cuerpos es independiente de su peso. Este resultado fue obtenido utilizando la caída sobre planos inclinados y no arrojando pesos desde la Torre inclinada de Pisa, como se piensa comúnmente. Su trabajo en mecánica aparece en sus «Discursos Rela-



tivos a Dos Nuevas Ciencias» (1638), que cimenta su posición como padre de la Física matemática. Las «dos nuevas ciencias» que él creó son ahora conocidas como «Resistencia de Materiales» y «Dinámica».

Galileo murió el año del nacimiento de Newton; su trabajo implanta el moderno estilo científico: observación, experimentación y uso de las matemáticas como forma preferida para expresar resultados.

Galileo fue también un músico notable, artista y escritor, un auténtico hombre del Renacimiento. Sus numerosas contribuciones a la Física hacen de él miembro del reducido grupo de los grandes científicos de todos los tiempos, y sus descubrimientos unidos a su fuerte personalidad y a su conflicto con la Iglesia, hacen de él una de las más románticas figuras de la Ciencia.

## Práctica

### Introducción

En la práctica anterior hemos comentado que durante la aplicación del impulso el movimiento no era uniforme y eso se veía claramente en las representaciones de la Figuras (5) y (6). Ver un movimiento uniformemente acelerado es sencillo pues para eso disponemos de la aceleración de la gravedad.

Si dejamos caer un cuerpo, no desde muy alto, este realizará aproximadamente un movimiento con aceleración constante. Es utilizar la historia de la manzana de Newton, quizás no cierta pero de cualquier manera bonita.

Así el objetivo de esta práctica es dejar caer cuerpos de distinta masa desde alturas no muy grandes ( $\approx 1$  m) y ver que cumplen la ley  $\text{Espacio} = (1/2) g t^2$ , (I) independientemente de la masa.

Pero ... ¿y el razonamiento del aire, de la cinta ...? ¿no estropearán nuestras medidas?, ¿no sería mejor hacer el experimento en vacío? De nuevo veremos como la naturaleza está deseosa de hablar incluso con experimentos poco cuidadosos o con pocos recursos económicos.

### Técnica experimental

Utilizaremos nuestro reloj para ahora colocado como indica la Figura (7). Colgaremos en el extremo de nuestra cinta, que es como el segundero, distintas masas y no vamos a tener precaución en la experiencia de que las masas sean iguales.

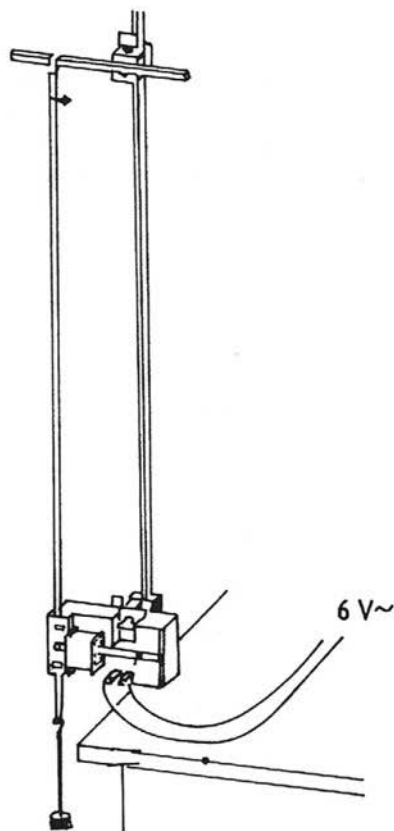


Figura 7. Sistema experimental para medidas de caída libre.

La longitud de la cinta, que es igual a decir el espacio durante el cual vamos a comprobar la ley de la caída, ha sido siempre inferior a 40 cm.

La Figura (7) presenta el experimento a punto de realizarse y es importante decir aquí la precaución que se debe tomar para que la cinta deslice lo mejor posible.

## Resultados obtenidos

La Figura (8) presenta el resultado obtenido sobre la cinta grabadora, en donde se visualiza que el movimiento no es uniforme.

¿Responderá este resultado a la ecuación (I):  $S \propto t^2$ ?  
¿obtendremos un valor aceptable de la gravedad?

La Figura (9) representa cualitativamente el espacio frente al tiempo, donde claramente se observa que no es un movimiento uniforme.

La Figura (10) presenta la gráfica del espacio frente a  $t^2$ , para tres masas distintas. Si la ecuación (I) es cierta, deberíamos encontrar una ley lineal e independiente de la masa. El comportamiento lineal es correcto pero en la segunda afirmación parece que hemos fallado y aparece una variación con la masa: ¡Un desastre! No, un poco de paciencia que igual la estadística nos echa una mano.

La tabla I nos muestra todas las medidas realizadas por los alumnos (unos 40) que son suficientes para realizar nuestra pequeña estadística. Una primera visión indica que hay valores para todos los

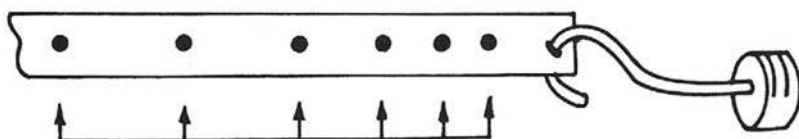


Figura 8. Grabación sobre la cinta en el movimiento de caída libre.

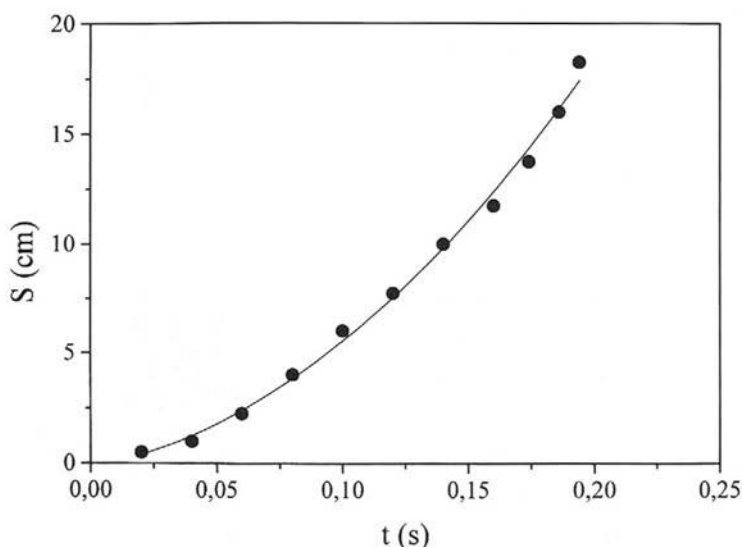


Figura 9. Representación del espacio en función del tiempo para el movimiento de caída libre.

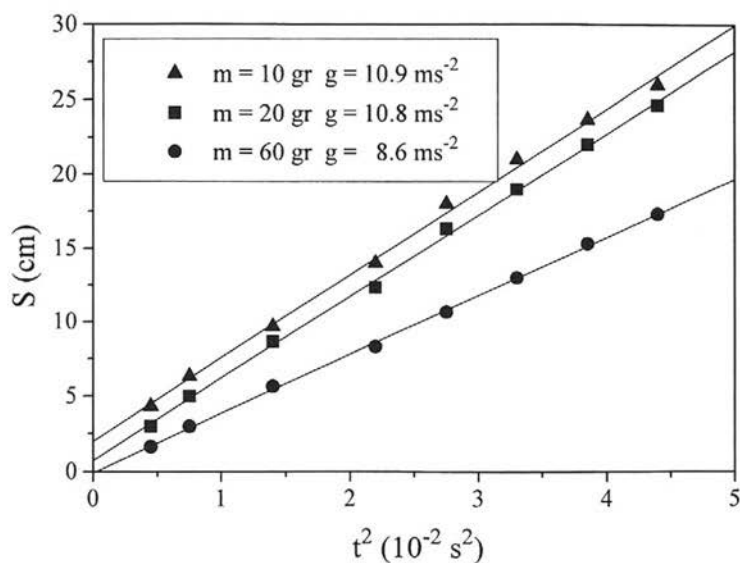


Figura 10. Representación del espacio en función del cuadrado del tiempo, para el movimiento de caída libre de diferentes masas.

gustos. ¡Valores de  $g = 3 \text{ ms}^{-2}$  que serían fabulosos por ejemplo en un salto de altura! Si el atleta mantiene su capacidad de impulso, debería cumplirse que:

$$Mgh = Mg'h' \quad \text{luego} \quad h' = gh/g'$$

El récord del mundo sobre  $h \approx 2,50 \text{ m}$  pasaría aproximadamente a  $h' \approx 8 \text{ m}$ . Indudablemente se ha equivocado quien midió  $g = 3 \text{ ms}^{-2}$ .

Pero volvamos a nuestra estadística. La tabla I

presenta el conjunto de datos obtenidos por los diferentes grupos de alumnos, representados a su vez en la Figura (11) en forma de diagrama de barras (histograma).

Se observa como el mayor número de valores están comprendidos entre 9 y  $10 \text{ ms}^{-2}$  y, lo que es más importante, para distintas masas; lo que nos indica la veracidad de la ley con  $t^2$  y su no dependencia de la masa.

Tabla I: Valores de  $g$  a partir de la ecuación (1)

$g \text{ (m s}^{-2}\text{)}$								
4.6	12	10	13.5	11	10.4	10.3	7	10.5
5.5	8.7	10	10.6	10.9	10.9	10.5	3	9.7
5.3	11.6	10.9	5.4	11.7	11.2	11.2	11.4	1.0
7.5	5.3	10.3	7.0	10.3	9.2	8.7	8.8	8.7
9.2	8.9	9.5	13.3	10	8.1	9.5	8.0	

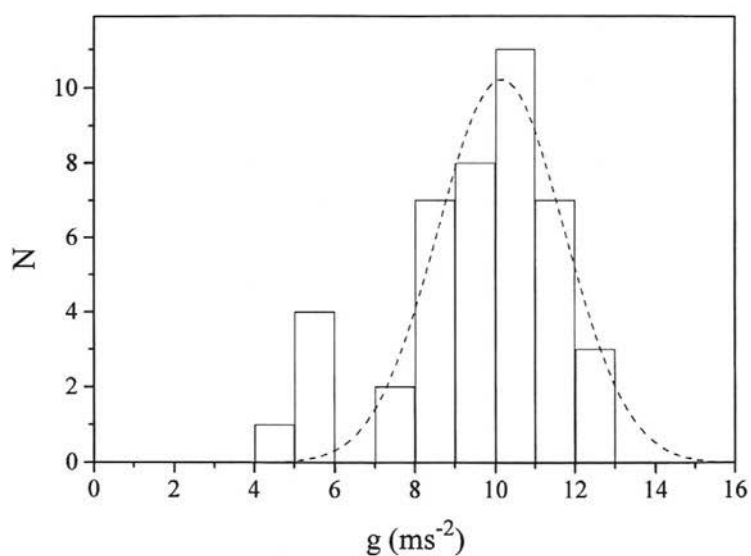


Figura 11. Representación del conjunto de datos obtenidos por los diferentes grupos de alumnos.

De cualquier forma, el valor obtenido para  $g$  no es muy preciso. Veremos más adelante como con

otro método muy sencillo, el péndulo simple, podemos obtener un valor de  $g$  más exacto.

## **Práctica nº 3: fuerzas interiores y conservación de la cantidad de movimiento**

### **Newton (1642-1727)**

Físico y matemático inglés. Descubridor del Teorema del Binomio e inventor del Cálculo Integral. Investigador en Mecánica, Óptica y Gravitación.

Newton nació prematuramente el año en que murió Galileo, tres meses después de la muerte de su padre, propietario de la mansión Woolsthorpe en Lincolnshire. Fue dejado al cuidado de su abuela en Woolsthorpe cuando su madre volvió a casarse, quedando bajo la influencia de su tío que pronto reconoció sus capacidades.

Newton fue a la escuela local pasando posteriormente a Cambridge en 1661, donde permaneció durante cerca de 40 años, excepto por un breve periodo de tiempo en que volvió a su casa en Woolsthorpe, debido a la gran plaga de 1665. Allí, y durante el periodo de 1665-1666 trabajó en muchas de las ideas por las que es famoso, considerándose este periodo como su «año milagroso».

El propio Newton escribió sobre este periodo indicando que a principios del año 65 encontró el método de aproximar series y de reducir la potencia de un binomio a tales series, es decir, el Teorema del Binomio. El mismo año encontró el «Método de las Tangentes» y el «Método de las Fluxiones», es decir, el Cálculo Diferencial, y en enero del año siguiente la Teoría de los colores y el «Método Inverso de Fluxiones», es decir, el Cálculo Integral, comenzando ese mismo año sus trabajos en gravedad

y los estudios sobre la luna y su comparación con las fuerzas gravitacionales en la superficie de la Tierra. En sus propias palabras Newton indica «todo esto fue en los dos años de 1665 y 1666, puesto que en esos años yo me encontraba en el punto culminante de mi edad de invención y mi preocupación e interés por las Matemáticas y Filosofía eran mayores que en ningún tiempo posterior».

De vuelta al Trinity College en Cambridge, sucedió a su profesor Isaac Barrow, como profesor Lucasiano en 1669, a la edad de 26 años. Fue elegido Fellow de la Royal Society en 1672 y durante el periodo de 1669-76 Newton presentó muchos de sus resultados en Óptica, participando en diversas controversias relativas a ellos.

En 1679 reanudó su correspondencia con Hooke, lo que renovó de nuevo su interés en problemas de Dinámica, resolviendo el problema del movimiento elíptico planetario descubierto por Kepler. En 1684 Newton recibió la visita de Halley quien le persuadió de escribir sus resultados en Dinámica, lo que fue completado en 18 meses. El resultado de este trabajo, los «Principios Matemáticos de Filosofía Natural» (Los «Principia»), constituye probablemente el libro más importante e influyente de toda la producción científica jamás escrita. A partir de ese momento los intereses matemáticos de Newton menguaron considerablemente, siendo sustituidos por intereses en Teología y en la vida política. Tam-

bién gastó mucho tiempo y esfuerzo en Alquimia (sin resultados).

En 1692, Newton, según sus propias palabras, perdió la razón. Probablemente sufrió un período de fuertes depresiones. Posteriormente sus intereses retornaron a Londres y la política y gracias a su amistad con Charles Montagne, primer Conde de Halifax, Newton se convirtió en Secretario (Warden) y posteriormente Director (Master) de la Casa de la Moneda, en 1696 y 1698 respectivamente; llevando a cabo con gran habilidad la reforma de la moneda. Por esto fue elevado a la dignidad de caballero en 1705.

En 1701 había renunciado a su Cátedra Lucasiana y a su posición en el Trinity College, aunque permaneció como Presidente de la Royal Society desde 1703 hasta su muerte.

Gran parte del tiempo de los últimos 20 años de la vida de Newton fueron empleados en agrios debates sobre prioridad sobre los descubrimientos científicos con Flamsteed y Leibniz en los que Newton demostró un elevado grado de rudeza y obsesividad. Murió, después de una dolorosa enfermedad, en 1727.

Las investigaciones de Newton en mecánica desarrollan gran maestría y establecen un sistema uniforme basado en las 3 leyes del movimiento:

1. Un cuerpo en reposo o movimiento uniforme continuará en ese estado si no se aplica ninguna fuerza.
2. La fuerza aplicada es igual al ritmo de cambio del momento.
3. Si un cuerpo ejerce una cierta fuerza sobre otro cuerpo, éste ejerce una fuerza igual y opuesta sobre el primero.

A partir de estas leyes, Newton explicó la colisión de las partículas, los resultados de Galileo rela-

tivos a la caída de los cuerpos, las tres Leyes de Kepler del movimiento planetario, el movimiento de la luna, la tierra y las mareas.

Las deducciones fueron hechas utilizando el cálculo, pero fueron expuestas en los «Principia» geométricamente, a fin de clarificar estos resultados a los lectores contemporáneos.

La Teoría General de la Gravitación, según la cual dos cuerpos de masas  $m_1$  y  $m_2$ , a una distancia  $d$ , se atraen el uno al otro con una fuerza  $F = G m_1 m_2 / d^2$ , donde  $G$  es una constante universal, fue desarrollada originalmente por Newton a partir de sus trabajos del movimiento de la luna en 1665. Podría ser correcto, tal como mantuvo el sobrino de Newton, que esta idea surgió de la observación de una manzana cayendo de un árbol, en su casa natal de Woolsthorpe.

Newton también publicó otro célebre tratado: «Óptica» (1704) que fue un compendio coherente del comportamiento de la luz. En él propone sus ideas corpusculares, añadiendo algunas ideas nuevas de periodicidad que no aparecen ni siquiera en los tratados de Hooke y Huygens sobre Teoría Ondulatoria. Fenómenos como la refracción de la luz por un prisma y la producción de colores por la dispersión, así como los anillos coloreados (Anillos de Newton) que aparecen en el punto de contacto entre una lente y un espejo, están incluidos también en este trabajo. También reciben su nombre los llamados telescopios de Newton en que se utilizan de forma conjunta lentes y espejos para conectar la luz.

La unidad de Fuerza en el Sistema Internacional, el Newton, está basado en su segunda Ley, y es igual a la fuerza que produce una aceleración de  $1 \text{ m/s}^2$  cuando actúa sobre la masa de  $1 \text{ Kg}$ .

Newton ejerció una influencia profunda en la Ciencia y en el Pensamiento. Como matemático, el

descubrimiento del teorema del binomio (1776) y el Cálculo y, posteriormente, sus Leyes de Gravitación Universal y Leyes del Movimiento, son las cumbres de sus descubrimientos y la base de su colosal estatura científica.

Es interesante constatar que la visión de Newton sobre sí mismo, al final de su vida, tiene un matiz notablemente distinto: «no se como puedo aparecer ante el mundo, pero ante mí mismo me veo como un muchacho jugando al borde de la playa y divirtiéndome, ahora con una piedrecilla más suave que otra o con una concha algo más bella que lo ordinario, mientras que el gran océano de la verdad permanece por descubrirse ante mí».

## Práctica

### Introducción

En la práctica nº 1 hemos introducido el concepto de impulso, como fuerza que actúa durante un cierto tiempo sobre un móvil. Vimos que si una vez terminado el impulso despreciábamos el rozamiento, el móvil mantenía su velocidad constante. Como  $F \Delta t = \Delta(mv)$  si  $F$  es nula  $\Delta(mv) = 0$  y decimos entonces que se conserva la cantidad de movimiento o momento lineal.

Para visualizar y comprobar esta primera ley de conservación hay que conseguir que las fuerzas exteriores sean nulas. ¿Es posible en la práctica? Nos puede servir nuestro montaje anterior siempre que en nuestro sistema carro - carril el rozamiento sea despreciable, así como la oposición del aire.

El objetivo por tanto, es comprobar en un sistema aislado si podemos visualizar y medir que la cantidad de movimiento permanece constante.

La práctica además nos servirá como introducción para, una vez estudiada la conservación de la energía, profundizar en los problemas de choque.

### Técnica experimental

El problema en este caso es obtener un sistema aislado  $\Sigma$  Fuerzas exteriores = 0, pero que existan fuerzas internas. Esto se puede conseguir uniendo dos carros de igual o distinta masa, por un muelle comprimido. La acción del muelle representa las fuerzas internas y colocando el sistema sobre el carril, en este caso si despreciamos el rozamiento, la resultante de las fuerzas exteriores es nula.

La Figura (12) muestra la experiencia en su conjunto con la colocación adecuada de los relojes, antes de aplicar una llama al hilo que por dentro del muelle, mantiene los carros unidos.

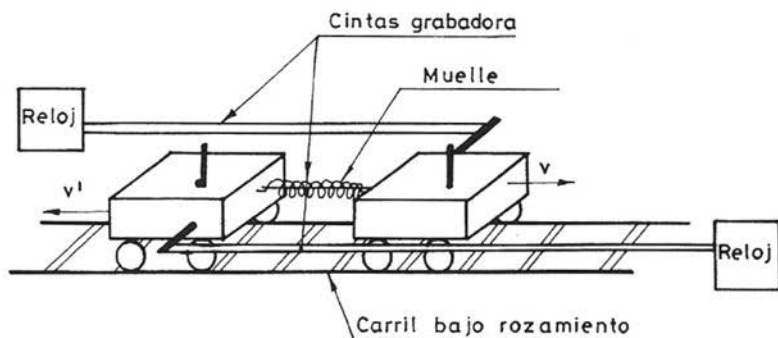


Figura 12. Sistema para el estudio de fuerzas internas en un sistema aislado.

## Resultados y discusión

En la Figura (13) se presenta la dependencia de  $v$  y  $v'$  (velocidad de los carros) con el tiempo para el caso en que las masas sean iguales.

Dos hechos hay que destacar en este punto:

- i) El movimiento es casi uniforme,  $v = \text{cte.}$
- ii) Los carros se mueven con velocidades distintas.

¿No se cumple entonces que  $m \cdot v = \text{cte.}$ ? ¿De nuevo en donde hemos fallado?

Para discutir este pequeño fracaso, hay que tener en cuenta que después del corte del hilo, uno de los carros lleva consigo el muelle y por tanto, su masa es algo mayor. Los carros son de 50 gr. de masa y si observamos la Figura (13), ambos llevan velocidades de 56 cm/sg. y 48 cm/sg. respectiva-

mente. Si llamamos  $m$  a la masa del muelle debe ocurrir que:

$$(50 + m) \cdot 48 = 56 \cdot 50$$

obteniéndose para  $m$  el valor  $m = 8$  gr.

El alumno debe ir rápidamente a conocer si su muelle pesa cerca de 8 gr. para definitivamente comprobar que se cumple  $m \cdot v = \text{cte.}$ , y así convencerse que ha conseguido un sistema aislado sencillo.

Finalmente, en relación con la Figura (13), es claro que  $v$  y  $v'$  no son constantes. El sistema no está perfectamente aislado y la pérdida de velocidad está relacionada con el rozamiento. Podemos preguntar al alumno a la vista de este resultado ¿dónde encontrará sistemas aislados en donde esto no ocurra o los efectos exteriores sean mínimos?

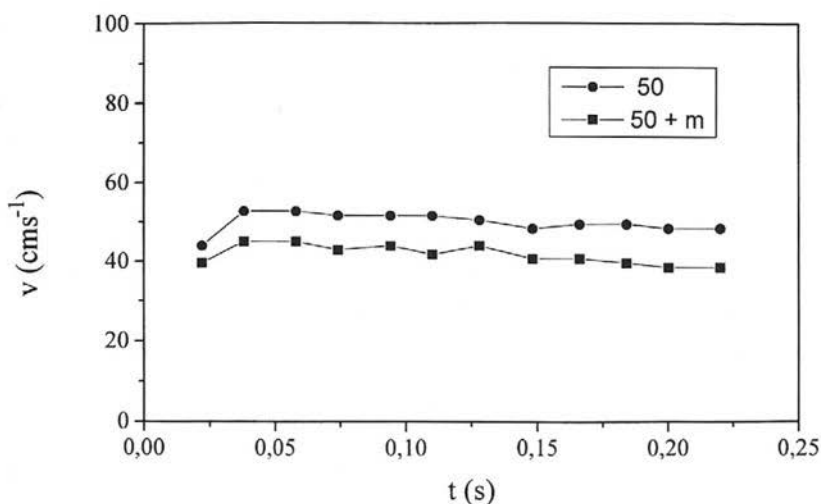


Figura 13. Dependencia de las velocidades de los carros con el tiempo.



**Prácticas nº 4 y nº 5:**  
**Movimiento armónico simple.**  
**Oscilador armónico**  
**4) Péndulo simple**  
**5) Estudio del muelle**

**Huygens (1629 - 1695)**

Físico y astrónomo holandés. Propuso la Teoría Ondulatoria de la luz. Descubrió los anillos de Saturno, introdujo el reloj de péndulo, trabajó en la Teoría de la Dinámica y en el péndulo compuesto.

Miembro de una rica familia de La Haya, recibió una sólida educación comenzando estudios de Derecho antes de encaminarse hacia las Ciencias y las Matemáticas. Después de Newton es el Físico más influyente del final del siglo XVII.

En 1655, utilizando un telescopio mejorado por él mismo, fue el primero en describir correctamente el sistema de anillos de Saturno, descubriendo también Titán, su luna mayor. Anunció el descubrimiento y observación de los anillos de Saturno en forma cifrada. Al año siguiente obtuvo la primera solución al problema de la Dinámica de colisión de cuerpos elásticos.

La constancia del período del péndulo había sido descubierta por Galileo. Huygens mostró que, para pequeñas oscilaciones, el período puede expresarse como:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

donde T es el período, l la longitud del péndulo y g la aceleración de la gravedad.

Diseñó un reloj de péndulo y posteriormente inventó uno de mayor precisión basado en el péndulo compuesto, moviéndose en un arco cicloidal. La Física no habría podido avanzar sin un sistema preciso de medida de tiempos.

Sin embargo, el gran logro de Huygens se refiere a la Teoría Ondulatoria de la Luz, expuesta por primera vez en 1678. Describió la luz como una vibración, propagándose a través de un éter consistente en partículas microscópicas y considerando que cada punto del frente de ondas se convertía en fuente de una serie de ondas esféricas secundarias cuya envolvente constituiría el frente de ondas en el instante posterior, lo que se conoce como construcción de Huygens.

Fue capaz, mediante este modelo, de dar una explicación simple a las Leyes de la Reflexión y Refracción de la luz, así como del fenómeno de doble refracción, observado en algunos minerales, prediciendo igualmente de forma correcta que la velocidad de la luz es más lenta en los medios más densos. Esta concepción es opuesta a la concepción corpuscular de Newton y la visión actual, según la cual cada concepción puede ser apropiada dependiendo de la situación experimental, ha debido esperar hasta el siglo XX para ser formulada.

## Práctica

### Introducción

El objetivo de estas prácticas es el estudio del oscilador armónico. Es curioso que, siendo fundamental en grandes áreas de la Física entender el comportamiento del oscilador armónico, sean quizás las prácticas que menos instrumentación necesitan: sólo hilos y muelles.

La importancia de profundizar en este tema se puede dejar planteada, quizás comentando que, de forma clásica, se puede entender el comportamiento de un sólido, ¡ $10^{22}$  átomos en un  $\text{cm}^3$ !, considerando que dichos átomos están unidos por muelles. Sólo con esto se puede comprender el porqué absorben luz los cuerpos, sus propiedades térmicas, estructurales, etc... con un grado de aproximación grande, que luego con un retoque cuántico hace que este entendimiento llegue a límites fantásticos. Así, por ejemplo, mediante medidas ópticas puede detectarse en un sólido la posición de una impureza que se encuentra en él en la proporción de UNA PARTE en un millón. Esto es detectar un blanco en una ciudad de un millón de negros.

En relación con el péndulo simple, es conocido que para oscilaciones pequeñas, el período  $T$  viene expresado por  $T = 2\pi \sqrt{l/g}$ , en donde  $l$  es la longitud del péndulo y  $g$  el valor de la aceleración de la gravedad allí donde estamos haciendo el experimento. Utilizando esta relación no sólo podemos comprobar dicha expresión, sino también calcular el valor de  $g$ . Así podemos hacer un nuevo juego estadístico y además comparar su valor con el obtenido en las experiencias de caída libre.

En relación con el estudio del muelle, el ánimo de la práctica es calcular su constante de recupera-

ción, tanto de una forma dinámica como estática. Queremos de nuevo aquí hacer hincapié en que, aunque algunas veces se diga que el objetivo es «calcular el valor de...», lo que buscamos es principalmente «ver», como decíamos en la introducción, la ley y el fenómeno, con la idea de que ayude a las explicaciones de clase.

### Técnica experimental

La sencillez de estas prácticas hace que en este apartado sólo sea necesario resaltar que los péndulos no necesariamente terminan en una masa puntual o bola de pequeño diámetro, que no se tenga ninguna precaución en que las masas sean iguales, que varíen bastante, y finalmente, que la medida del período se haga sobre un promedio de diez oscilaciones.

### Resultados experimentales

La Figura (14) presenta los valores de  $T^2$  frente a  $l$ , que ha variado entre 0.5 y 1.1 m. Se observa un comportamiento lineal, que pasa por el origen de las coordenadas, lo que indica por tanto que sigue una ley  $T^2 \propto l$ .

Este resultado, de acuerdo con la expresión  $T = 2\pi \cdot (l/g)^{1/2}$  permite, a partir de la pendiente, obtener el valor de  $g$ , que en el caso de los datos de la Figura (14) es de  $9.86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , un valor mucho mejor que el obtenido mediante la caída libre en la práctica N° 2.

La Figura (15) nos muestra el histograma de todos los resultados obtenidos en clase. Si se compara con el presentado en la práctica de caída libre, se observa que ahora el máximo de eventos se centra en un valor de  $9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Esto indica que la medida

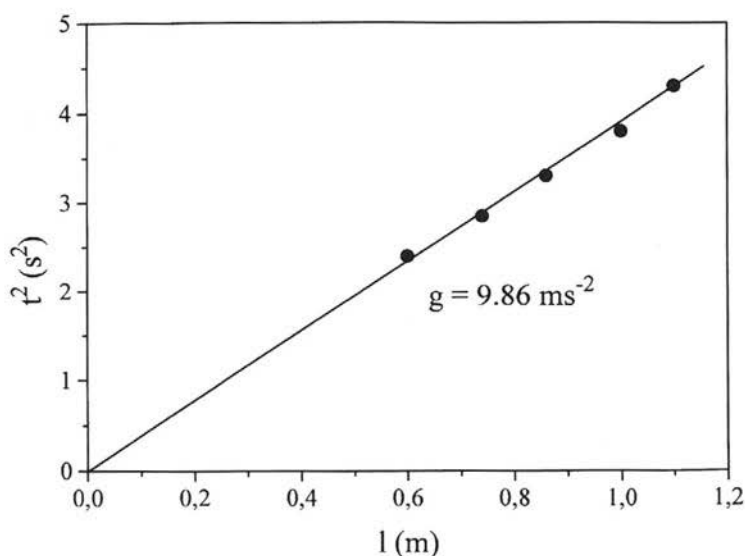


Figura 14. Dependencia del cuadrado del período en función de la longitud del péndulo.

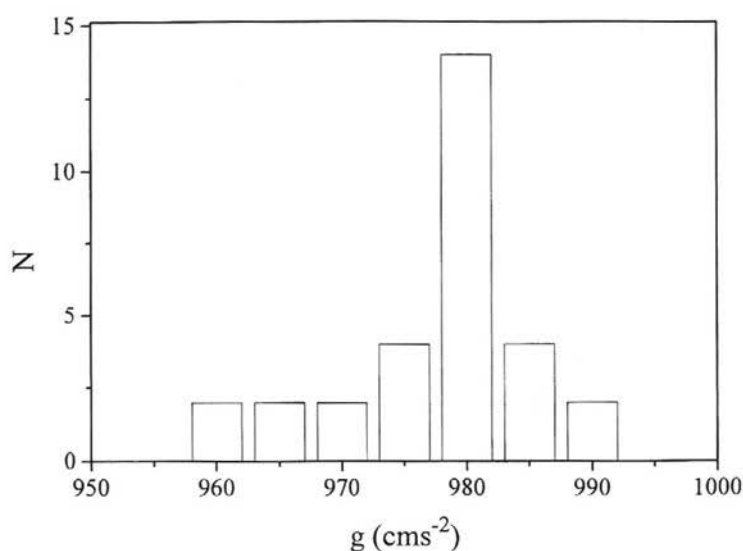


Figura 15. Estadística de valores de  $g$  obtenidos a partir del péndulo simple.

utilizando el péndulo simple es mejor que la que se obtiene en caída libre. Destacar que al haber utilizado distintas masas se vuelve a demostrar la no dependencia de  $g$  con la masa.

Finalmente podemos preguntarnos ¿qué pasa si

las oscilaciones no son pequeñas? Vamos a caer en el clásico tópico de dejar que lo investigue el alumno avanzado o mejor dicho, el alumno con interés.

En relación con el estudio del muelle, la Figura (16) presenta la elongación frente al peso. Se

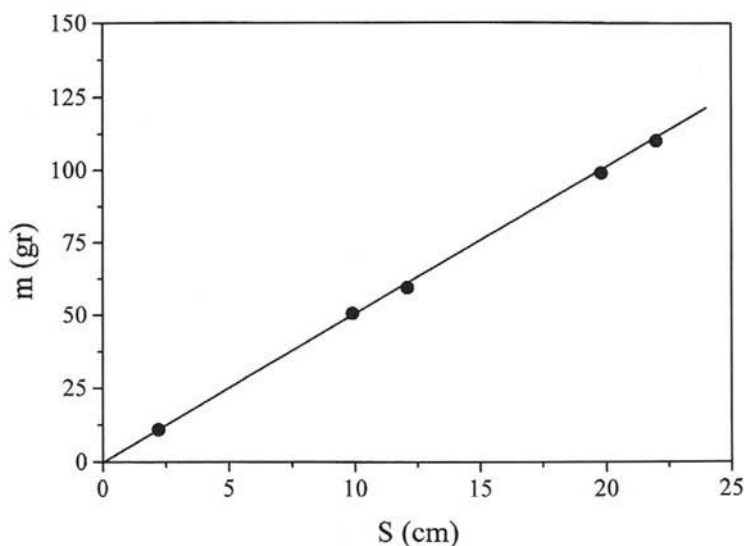


Figura 16. Relación entre la masa del muelle y su elongación.

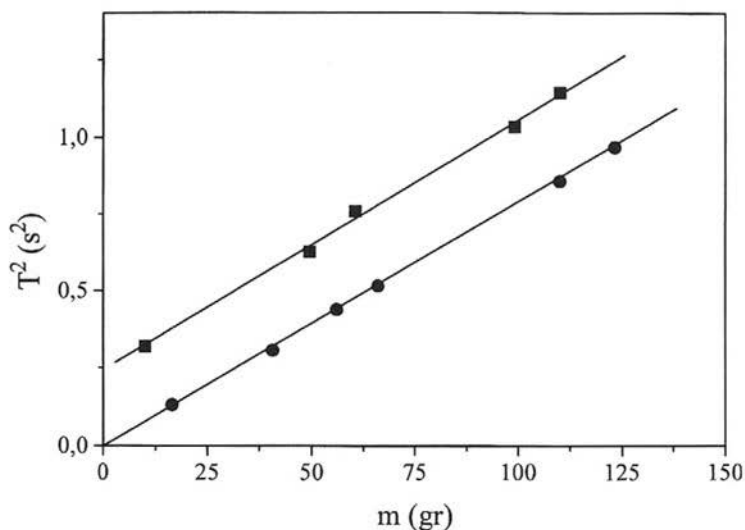


Figura 17. Cuadrado del período de oscilación en función de la masa.

observa una dependencia lineal de acuerdo con la Ley  $F = -Kx$ . De la pendiente se obtiene un valor de  $K$  de  $4.9 \text{ Nw/m}$ .

Si una vez colocada en los extremos del muelle una masa  $m$  éste se pone a oscilar, el período  $T$  viene dado por la expresión:

$$T = 2\pi \sqrt{m/K} \quad (\text{III})$$

La Figura (17) representa el valor obtenido de  $T^2$  frente a  $m$ . El comportamiento es lineal, de acuerdo con la teoría, pero para uno de los muelles (1°) la recta no pasa por el origen. Independientemente de

este error el valor de  $K$  obtenido, por la expresión anterior y los datos de la representación  $T^2 \propto m$  arrojan un valor de 4.1 Nw/m lo que significa una diferencia del  $\approx 17\%$  que sería interesante analizar.

## **Conclusiones**

Las conclusiones más importantes obtenidas son:

i) El buen valor obtenido para  $g$  utilizando un péndulo simple.

ii) La buena reproducción de la ley  $T = \sqrt{m/k}$  del movimiento armónico simple, estudiado mediante la utilización del muelle del péndulo simple.

iii) El no obtener una representación, ver Figura (17), que pase por el origen, necesita un mayor cuidado en la medida de masas y tiempos.

## **Práctica nº 6:**

### **conservación de la energía**

**Joule (1818 - 1889)**

Físico inglés. Estableció la Teoría Mecánica del calor. Joule nació en una acaudalada familia de cerveceros de Manchester. Delicado y tímido recibió instrucción en su propia casa en Ciencia y Matemáticas por Dalton. Pronto se vio atraído por la Física y especialmente, por problemas relacionados con el calor, comenzando su trabajo experimental en un laboratorio cerca de las destilerías familiares. La habilidad de Joule permitió medir calor y cambios de temperatura de forma precisa, siendo animado a continuar su trabajo por W. Thomson.

A la edad de 18 años Joule comenzó sus estudios sobre el calor desarrollado por una corriente eléctrica, y en 1840 dedujo la ley que relaciona la corriente que circula por un conductor de una cierta resistencia y el calor generado: Ley de Joule.

Entre 1837 y 1847 su trabajo estableció el «principio de conservación de la energía» y la equivalencia del calor con otras formas de energía. Aunque Mayer, Thomson y Helmholtz fueron importantes contribuyentes, fue Joule quien de manera precisa y explícita expresó este concepto.

La cantidad de trabajo mecánico requerido para producir una determinada cantidad de calor fue determinada por Joule en 1843, midiendo las pequeñas contribuciones de calor producidas en una masa de agua por la rotación de paletas movidas por cuerpos en caída.

Thomson y Joule colaboraron a partir de 1852 durante 7 años en una serie de experimentos concluyendo en el conocido efecto Joule - Thomson, don-

de un gas en expansión es enfriado a medida que se produce trabajo en la separación de las moléculas.

También contribuyó Joule a la Teoría Cinética de los Gases, realizando una primera estimación de la velocidad de un gas de moléculas (1848).

Fue una persona de gran modestia permaneciendo como asistente de Thomson en lugar de perseguir y continuar sus propias líneas de trabajo. A la edad de 55 años su salud se deterioró notablemente y su trabajo científico se vio prácticamente interrumpido.

Joule permanece como uno de los físicos experimentales más relevantes de su siglo, habiendo realizado su trabajo antes de los 30 años en un problema de gran importancia, el equivalente mecánico del calor. Atacó este problema con ingenuidad realizando medidas precisas y detectando con tenacidad posibles fuentes de error.

El Joule es la unidad de energía en el Sistema Internacional. Calor y trabajo se miden en las mismas unidades.

## **Práctica**

### **Introducción**

Dentro del área de la Física y Química existen hoy en día varias imposiciones que la evidencia experimental respeta de una manera casi sagrada. Así, en una práctica anterior, hemos visto la conservación de la cantidad de movimiento, (con cierta faci-

lidad) cuando el sistema es aislado, aunque este aislamiento se ha conseguido de una manera algo artificial. No es la única imposición y llaman la atención otros hechos, como no poder bajar del cero absoluto. ¡Hoy en día, a nivel de laboratorio, se llega a  $0.00001^{\circ}\text{K}$  pero no se llega al valor 0! Más conocida es la imposibilidad de sobrepasar la velocidad de la luz, siempre con el permiso de los aficionados a la Ciencia Ficción. Estos límites de la Física no son fáciles de poner de manifiesto a un nivel acorde con el curso que aquí se presenta.

Sin embargo, si está a nuestro alcance demostrar la conservación de la energía en un sistema mecánico. Este hecho es un dogma tan bien establecido que, cuando no se cumple, se inventa algún honrado ladrón que se llevó la energía y, conseguir así, que cuadren los números. Más adelante, la ciencia siempre ha encontrado, en forma de una nueva partícula, emisión de radiación electromagnética, etc., al supuesto ladrón de energía.

El motivo, pues, de esta práctica es poner de manifiesto esta conservación. Para ello, a uno de nuestros carros le vamos a dar una energía potencial mediante un muelle. Comprimiendo y luego soltando éste, se medirá, para diferentes masas del carro, la energía cinética que adquiere.

La energía potencial del muelle es  $E_m = 1/2 \cdot K \cdot x^2$  y si la energía se conserva será igual a la cinética que adquiere el carro  $1/2 \cdot m \cdot v^2$ . Si  $E_m$  la mantenemos constante, lo que implica comprimir el muelle siempre igual, debe verificarse que:

$$1/2 \cdot m \cdot v^2 = E_m \quad \text{ó} \quad 1/v^2 \propto m \quad (\text{IV})$$

## Resultados experimentales y discusión

La Figura (18) presenta la velocidad media del carro en función del tiempo, para tres masas distintas del mismo, cuando es liberado el muelle.

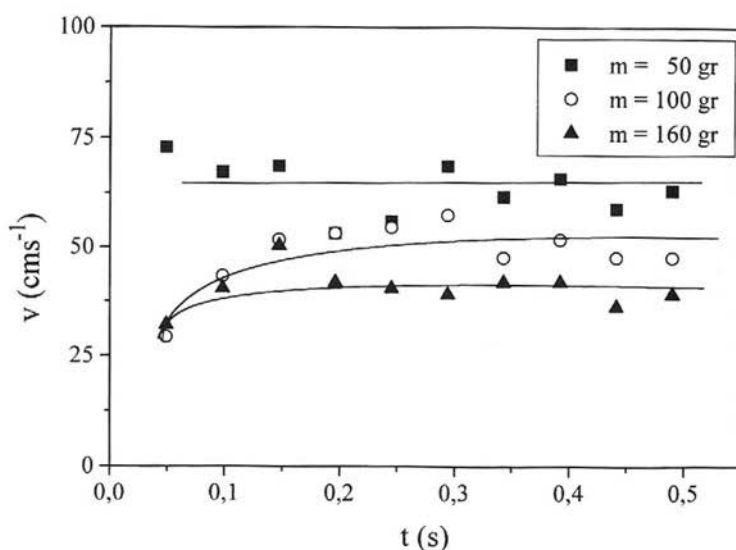


Figura 18. Velocidad media del carro en función del tiempo para tres masas distintas.

Se observa, al igual que en la práctica N° 1, una primera zona de movimiento no lineal, seguida de otra con velocidad constante. La primera zona tiene una interpretación análoga al impulso, comentado en la práctica 1, y corresponde a un movimiento acelerado que dura mientras el muelle actúa sobre el carro. En nuestro caso, este tiempo es del orden de 2/50 s. Cuando el muelle deja de actuar, el movimiento es con velocidad constante, y el valor de esta velocidad debe cumplir la relación (IV).

La representación de esta relación se muestra en la Figura (19), donde se observa que la dependencia lineal se cumple de una forma muy aceptable.

Una vez vista la conservación de la energía, puede calcularse la constante K de recuperación del muelle y comprobar si es el mismo valor al obtenido por los métodos utilizados en prácticas anteriores.

Para insistir más en los temas de conservación, en la práctica siguiente combinaremos los dos teoremas de conservación, en una única experiencia: Choques.

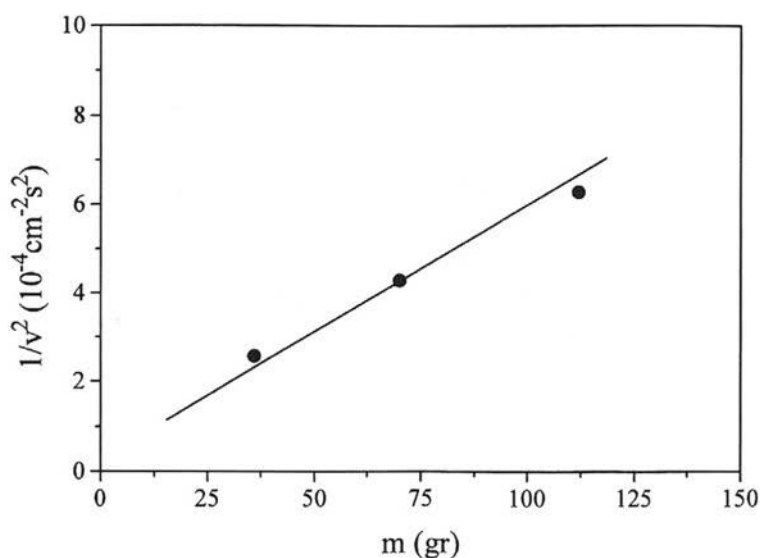


Figura 19. Dependencia de la inversa del cuadrado de la velocidad en función de la masa del carro.



## Práctica n ° 7: choque elástico

### Lawrence (1901 - 1958)

Físico americano, inventor del ciclotrón y productor de nuevos elementos radioactivos.

Lawrence creció en Dakota del Sur en el seno de una familia de maestros (su madre enseñó matemáticas y su padre era el Director de una Escuela de Magisterio).

Realizó sus estudios en Dakota del Sur, Minnesota y Yale, ocupando a partir de 1928 un puesto en la Universidad de California en Berkeley, alcanzando algunos años más tarde (1936) la Dirección del Laboratorio de Radiaciones.

A partir de 1929 el trabajo de Lawrence se centró en la producción de partículas suficientemente energéticas para provocar, mediante colisiones, reacciones nucleares.

Los aceleradores lineales utilizados para la producción de estas partículas eran incómodamente largos necesitando elevados voltajes de aceleración. Lawrence introdujo la concepción del ciclotrón, donde las partículas son aceleradas en una trayectoria espiral entre dos semicilindros («Des») situadas entre los polos de un electroimán. Un voltaje AC entre las «Des» se encarga de acelerar las partículas.

El primer ciclotrón (usando un imán de 10 cm) se puso en funcionamiento en 1931. Las versiones posteriores, de mayor tamaño, lograron producir haces de protones de  $8 \cdot 10^4$  eV, convirtiendo núcleos de litio en núcleos de helio, confirmando así la primera transformación nuclear obtenida por Cockcroft y Walton en 1932.

Cientos de nuevos isótopos radioactivos, incluyendo la mayoría de elementos transuránicos, se-

rían producidos poco después. También mesones y antipartículas serían generados y estudiados por el equipo dirigido por Lawrence.

En 1939 recibió el Premio Nobel, siendo nombrado en su honor el elemento atómico número 103 (Lw).

### Práctica

#### Introducción

En las prácticas anteriores hemos visto, por separado, la ley de la conservación de la cantidad de movimiento y la ley de conservación de la energía. El motivo de esta experiencia es unir ambos conceptos en el estudio de un choque elástico.

El interés de esta práctica no estriba sólo en comprobar que se cumplen las predicciones, sino que de nuevo se debe aprovechar la experiencia para apuntalar los conceptos de fuerzas interiores, sistema aislado, movimiento uniforme y efecto de las fuerzas de rozamiento.

#### Técnica experimental

La Figura (20) muestra el diseño utilizado en la realización de la práctica, en donde de nuevo nuestro reloj con cinta grabadora nos servirá para conocer la velocidad antes y después del choque, así como para comprobar si los efectos del rozamiento son importantes o no, a la hora de hacer los balances energéticos.

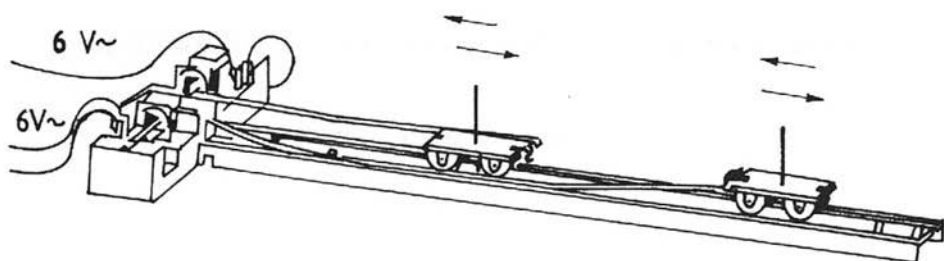


Figura 20. Sistema experimental para el estudio de choques elásticos.

## Resultados y discusión

Se debe comenzar la práctica con un caso sencillo, uno de los carros parado, comprobando que después del choque éste sale con la velocidad del primero, permaneciendo el segundo en reposo. Esto debe ocurrir siempre y cuando los carros tengan la misma masa. Recomendamos que siempre, para calcular la velocidad, se hagan las representaciones  $S-t$  y  $v-t$  análogas a las descritas en la práctica N° 1.

Comprobado este caso, puede pasarse a variar la masa de uno de los carros, manteniendo todavía

uno en reposo para, finalmente, hacer un choque con ambos carros en movimiento.

No hemos realizado, en este caso, representaciones gráficas sino que haremos hincapié en «ver» todas las posibilidades con idea de afianzar los conceptos. Como por ejemplo, el considerar la ley de conservación de la cantidad de movimiento, «ver» que ésta es vectorial, mientras que la de la energía es escalar, entre otras.

Finalmente, colocando un pequeño trozo de plastelina el alumno puede repetir algunos de los ejemplos anteriores en la visión no elástica del choque, observando y discutiendo las diferencias.

# Práctica nº 8: Ley de Coulomb

**Coulomb (1736 - 1806)**

Físico francés, descubridor de la ley de la dependencia con la inversa del cuadrado de la distancia de la fuerza electromagnética.

Coulomb recibió formación como Ingeniero militar y sirvió en el ejército durante 9 años en La Martinica. Posteriormente regresó a Francia, ejerciendo como Ingeniero Consultor para, más tarde, renunciar a su puesto en la armada, cambiando simultáneamente su interés en la ingeniería por la Física. Durante la Revolución Francesa fue obligado a abandonar París, retornando bajo el mandato de Napoleón y ejerciendo como Inspector General de Instrucción Pública.

No es sorprendente que en vista de sus servicios militares muchos de sus primeros trabajos estuvieran relacionados con problemas de ingeniería en estática y mecánica. Mostró que la fricción es proporcional a la presión normal, lo que es conocido como «Ley de Coulomb de la Fricción». Sin embargo, es principalmente recordado por su trabajo relativo a las fuerzas eléctricas y magnéticas. Desde 1784 hacia delante, realizó una serie de delicados experimentos utilizando una balanza de torsión inventada por él mismo y capaz de detectar fuerzas equivalentes a  $10^{-10}$  N. Descubrió que la fuerza entre dos esferas cargadas es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas y directamente proporcional al producto de sus magnitudes (Ley de Coulomb), éste fue un resultado importante mostrando el paralelismo con la «Ley de Newton de la Gravitación». También mostró un resultado similar aplicable a polos magnéticos.

La unidad de carga eléctrica en el Sistema In-

ternacional es denominada Coulomb en su honor. Es la carga que atraviesa la sección de un conductor por el que circula una corriente de un amperio en un segundo.

## Práctica

### Introducción

Una vez conocido el movimiento de los cuerpos, la pregunta inmediata es: ¿Por qué las masas se atraen? Desgraciadamente no es fácil medir a nivel laboratorio la ley de atracción de masas, ya que ésta es una interacción pequeña. Parece que en este caso, a nivel de laboratorio, la naturaleza nos vence. Quizás, como comentaremos más adelante, necesitaríamos un laboratorio con menos vibraciones, unos alumnos menos nerviosos y, porqué no, profesores con mayores habilidades experimentales.

En esta práctica estudiaremos los campos utilizando la atracción entre cargas que es mucho más fuerte. El efecto es fácil de ver sin más que frotar un plástico y ver como se atraen pequeños papeles. Observarlo es trivial, pero comprobar que dicha fuerza es proporcional a las cargas, e inversamente al cuadrado de la distancia, requiere un montaje un poco más sofisticado.

### Técnica experimental

La Figura (21) presenta un esquema del diseño experimental, que consiste en un péndulo de torsión con una pequeña esfera A y un espejo pegado al hilo.

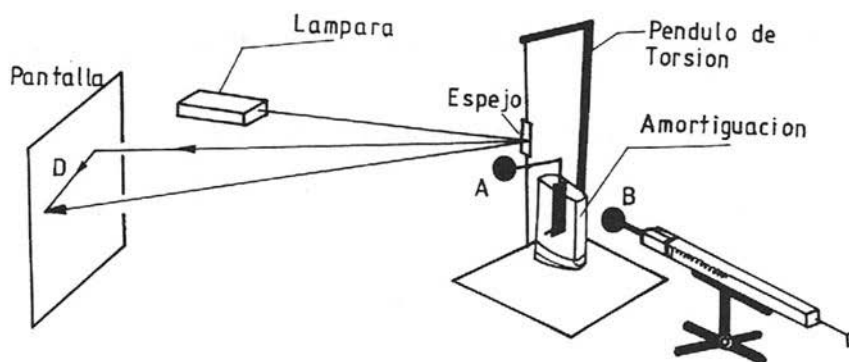


Figura 21. Sistema experimental para la comprobación de la Ley de Coulomb.

La esfera A se carga mediante un acelerador Van de Graaf o bien frotando previamente un barra de plástico que luego toca la bola metálica. Otra esfera B es también cargada y se acerca a la esfera A. La repulsión entre ambas se detecta iluminando el espejo y detectando el movimiento del «spot» en una pared. Como se observa en la figura, el péndulo se ha amortiguado para conseguir una mayor rapidez de medida. El valor de la fuerza se obtendrá midiendo el desplazamiento D en la pared, tomando como origen la posición del «spot», cuando la esfera B no está cargada o está muy lejos de la esfera A.

¿Será esta medida, de verdad, proporcional a la fuerza entre las cargas? El alumno puede comprobar, que si los desplazamientos son pequeños y la distancia entre el espejo y la pared grande (en los datos que se presentan a continuación esta distancia fue de  $\approx 12$  m.), este supuesto es correcto.

## Resultados y discusión

La Figura (22) presenta la dependencia de D frente a  $1/r^2$ . Se observa una relación lineal, lo que indica que  $F \approx 1/r^2$ . El hecho de no pasar por el origen se debe a errores sistemáticos en la medida de las distancias D y/o r, pues las esferas no son puntuales.

Hemos demostrado la dependencia de F con  $1/r^2$  pero, ¿podríamos ampliar más y comprobar que  $F = kqq'/r^2$ ? Sabiendo que la relación entre la capacidad C, la carga q y el voltaje V es  $CV = Q$  y que para una esfera  $C = 4\pi\epsilon R$ , utilizando esferas de distintos radios y cargándolas al mismo potencial, esto puede comprobarse aunque implica una mayor sofisticación.

La experiencia montada es interesante para investigar qué ocurre cuando entre las cargas A y B se interpone un dieléctrico o un metal y para investigar, colocando un hilo a través de una resistencia a tierra, la descarga de la esfera en función del tiempo. A veces, este efecto de descarga aparece, sin necesidad de colocar ese hilo a tierra, si la humedad del recinto es grande; así que hay que procurar escoger un día poco húmedo y nunca al final de una sesión de clases pues, por suerte, respiramos, lo que hace aumentar la humedad y por tanto la conductividad eléctrica del aire.

Finalmente, queremos llamar la atención sobre que además de obtener la ley  $F \approx 1/r^2$  podemos plantear muchas preguntas, apoyándonos en lo que hemos visto en el laboratorio, algunas de las cuales exponemos a continuación a título de ejemplo:

i) Si el metal interpuesto anula la fuerza entre las cargas, ¿no es esto una manera de apantallar o

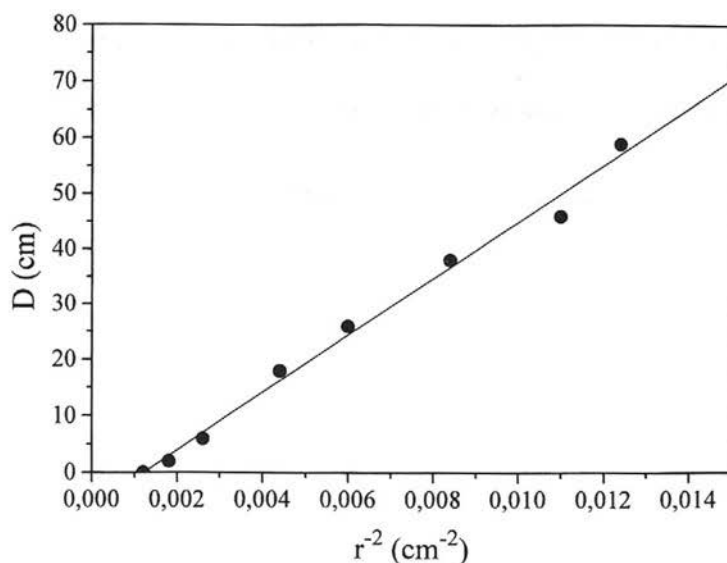


Figura 22. Desviación del haz D en función de la inversa del cuadrado de la distancia r entre las esferas cargadas.

protegerse de los campos eléctricos y electromagnéticos? ¿Tiene esto algo que ver con que no se escuche la radio de un coche dentro de un túnel?

ii) ¿Por qué descargamos la esfera cargada conectándola a tierra? ¿Es que la tierra es capaz de aceptar gran cantidad de carga sin notarlo?

iii) ¿No será que la dificultad de medir la atracción entre masas es que si éstas están cargadas «vemos» el efecto electrostático y no el gravitacional? ¿Qué relación existe entre las fuerzas gravitatoria y eléctrica?

Es quizás ahora, el momento de comentar que aunque después de esta experiencia hemos conseguido conocer la ley de atracción, nos falta contestar a una pregunta clave: ¿Por qué se atraen las masas y las cargas eléctricas? ¿Cuál es el mecanismo que opera? ¿Quién hace de enlace o puente para que la interacción gravitatoria o eléctrica llegue de un cuerpo a

otro? En otras palabras, ¿cuál es el «hilo» que atrae las masas y las cargas?

Evidentemente, hay muchas preguntas cuya respuesta es hoy todavía tema de investigación, aunque su ley matemática sea tan antigua como Newton y Coulomb.

Finalmente, y en relación con el comentario de la dificultad de medir la atracción entre masas, es necesario destacar que con masas manejables a nivel laboratorio (20 Kg.) la atracción es débil y para ganar sensibilidad, el péndulo debe dejarse sin amortiguación cambiando a un hilo de menos coeficiente de torsión, lo que implica inestabilidad en el sistema. Esto exige ausencia de vibraciones, paciencia y tiempo. Pero la analogía entre el campo electrostático y gravitatorio permite estudiar este último, ampliando sus efectos, con esferas o planos cargados, en lugar de masas.

## **Práctica nº 9: movimiento de cargas en campos magnéticos. Relación E/M**

**J.J. Thomson (1856-1946)**

Físico inglés. Descubridor del electrón.

Thomson comenzó sus estudios en el Owens College (posteriormente la universidad de Manchester) con la esperanza de convertirse en Ingeniero. La pobreza causada por la muerte de su padre en 1872 le llevó, sin embargo, a estudiar matemáticas, física y química, al no poder asumir los gastos que suponían entonces el aprendizaje de la ingeniería.

Fue becado en el Trinity College, Cambridge (1876), graduándose en Matemáticas en 1880 e incorporándose al profesorado del Trinity College para alcanzar posteriormente la Cátedra Cavendish (1884-1919, sucediendo a Rayleigh) y nombrado Master of Trinity en 1918.

En términos modernos J.J. Thomson era un experimental, aunque sus manos eran torpes y sus mejores trabajos fueron, de hecho, llevados a cabo por ayudantes.

Thomson había llevado a cabo un excelente análisis, desde el punto de vista matemático, sobre los vórtices en 1883, y la especulación sobre la posibilidad de que los átomos fuesen «vórtices en el éter electromagnético», le llevaron a investigar los rayos catódicos.

Varios físicos alemanes consideraban que los rayos catódicos eran ondas y Hertz había tratado de demostrar que no podían ser partículas, ya que en sus experimentos no eran desviados por campos eléctricos.

Sin embargo, Thomson repitió el experimento

en más alto vacío (evitando así polarización del aire), demostrando que los campos eléctricos si desviaban los rayos catódicos (1897). Combinando campos eléctricos y magnéticos obtuvo la relación carga-masa ( $e/m$ ) de los constituyentes de los rayos catódicos, demostrando que era independiente del material constituyente del cátodo.

En abril de 1897 anunció que había descubierto una nueva partícula. Profundizando en sus experimentos, Thomson midió la carga  $e$  con un experimento similar a Millikan y combinando ambos resultados ( $e$  y  $e/m$ ) encontró para las nuevas partículas una masa unas 1.000 veces menor que la del hidrógeno. Estas partículas serán denominadas «electrones» poco después.

Los descubrimientos de Thomson abrirían el camino para el estudio de la estructura atómica, lo que sería abordado por Rutherford, su sucesor en la Cátedra de Cavendish.

El principal logro de Thomson puede considerarse que fue la creación del Laboratorio de Cavendish como el más avanzado en la física experimental del momento.

A Thomson, premio Nobel en 1906 por sus trabajos sobre conductividad eléctrica de los gases, seguirían hasta siete de sus ayudantes que posteriormente ganarían también el premio Nobel. Como satisfacción final verá como su propio hijo (G.P. Thomson) ganará también este premio en 1937 al demostrar la dualidad onda-corpúsculo del electrón.

## Práctica

### Introducción

Antes de entrar en el origen de los campos magnéticos, veamos que si en una región del espacio existe un campo magnético, éste puede detectarse cuando una carga  $q$  la atraviesa con una velocidad  $v$ , pues sobre ella aparece una fuerza  $F$  dada por:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (V)$$

donde  $\vec{B}$  es la intensidad del campo magnético. Si  $\vec{v}$  y  $\vec{B}$  son perpendiculares, la expresión anterior queda:

$$F = q \cdot v \cdot B$$

y si  $B$  es homogéneo y no depende del tiempo, la carga debe describir una trayectoria circular, pues según la ecuación (V),  $F$  siempre es perpendicular a  $v$  y constante. Esta fuerza debe ser igual a  $mv^2/R$ , lo que permite relacionar el radio de la trayectoria  $R$  con  $B$ ,  $q$  y  $m$ :  $R = mv/qB$ .

El objetivo de esta práctica es comprobar este efecto y obtener el valor de la relación carga/masa del electrón, una de las constantes importantes de la Física.

### Técnica experimental

La Figura (23) presenta un esquema del sistema experimental utilizado. Consiste en una ampolla de vidrio con un vacío de  $10^{-4}$  torr (análogo al utilizado en los tubos de TV), en cuyo interior se ha introducido un cañón de electrones. Este consiste en un filamento que, al ser calentado por el paso de una corriente, emite electrones, que posteriormente son acelerados mediante una diferencia de potencial  $V$ , de forma que la velocidad que adquieren es:  $1/2 mv^2 = eV$ .

Los electrones acelerados entran en un campo magnético perpendicular a ellos, como indica la figura, y chocan con una pantalla fosforescente cuadrículada que permite conocer la desviación producida por el campo magnético. Variando el voltaje de aceleración pueden observarse las leyes antes descritas.

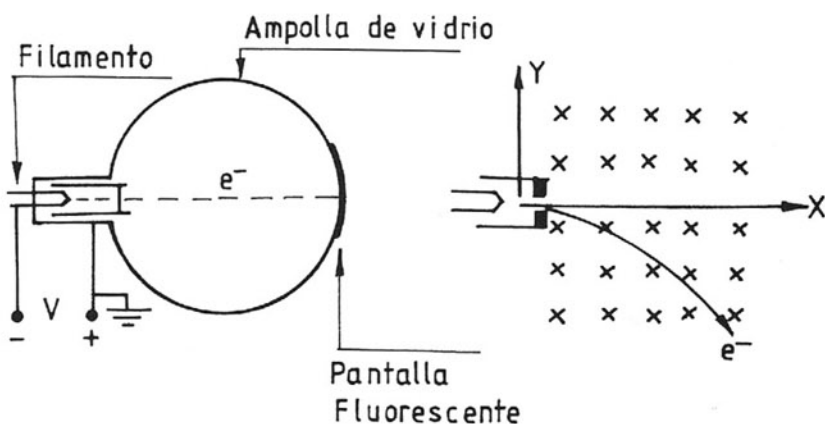


Figura 23. Sistema experimental para el estudio del movimiento de cargas en campos magnéticos.

El campo magnético se ha producido en este caso mediante dos bobinas, por donde se hace circular una corriente continua, que se encuentran adosadas al globo de vidrio.

## Resultados y discusión

El primer resultado experimental de interés es visualizar la desviación de las cargas en función del potencial y del campo magnético aplicado, y observar que el «spot» luminoso depende de la corriente que pasa por el filamento.

Si llamamos  $Y$  a la desviación en la pantalla del «spot», producido al chocar los electrones, es fácil demostrar que se cumple que:

$$B^2 = \frac{m}{q} 8 \frac{(Y^2 + L^2)^2}{Y^2} \quad V = \frac{8m}{q} \cdot V \cdot \delta \quad (\text{VI})$$

de forma que debe existir una relación lineal entre el cuadrado del campo magnético y  $\delta = (Y^2 + L^2) / Y^2$  en donde  $L$  es el radio de la bombona.

La Figura (24) presenta esta relación para dos potenciales de aceleración de 3500 V. y 2500 V. respectivamente, siendo el comportamiento lineal satisfactorio. Esta representación permite obtener a partir de las pendientes de las rectas, el valor de  $q/m$  que ha sido en nuestro caso de  $2 \cdot 10^{-11} \text{ C} \cdot \text{Kg}^{-1}$ , muy próximo al real  $1.75 \cdot 10^{-11} \text{ Ckg}^{-1}$ . En este tipo de medidas, conseguir el orden de magnitud puede considerarse como un éxito.

Podemos aprovechar finalmente este clima de Física experimental para conocer la velocidad que han adquirido los electrones. Sabiendo que la carga del electrón es  $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  y su masa  $m = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$ , de acuerdo con lo expuesto anteriormente, la velocidad que adquiere el electrón viene dada por:  $eV = 1/2 mv^2$ .

Para  $V = 2.500$  Voltios obtenemos que  $v = 3 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ . ¡Un 10% de la velocidad de la luz! Uno ahora se pregunta si esta velocidad es suficiente para observar variaciones de la masa. Es conocido que en

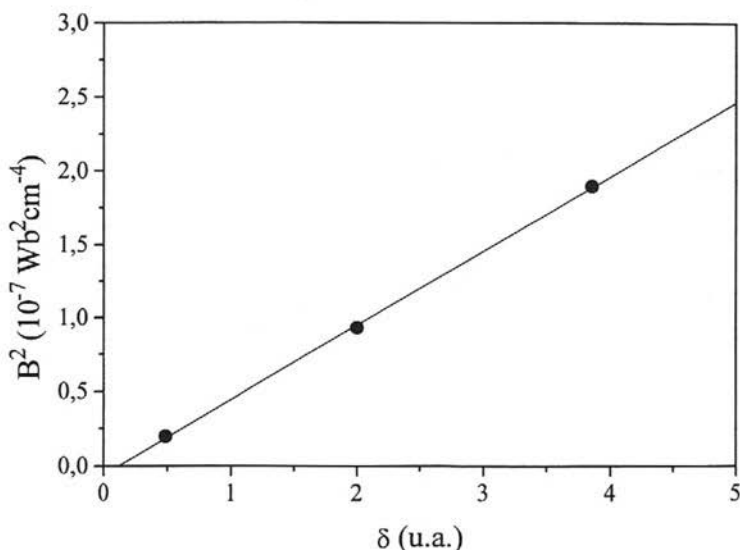


Figura 24. Representación gráfica de la relación (VI).



teoría de relatividad la masa varía con la velocidad según la ecuación:

$$m = \frac{m_0}{1 - \sqrt{\frac{v^2}{c^2}}} \quad c = \text{velocidad de la luz}$$

En nuestro caso

$$\frac{v^2}{c^2} = \frac{9 \cdot 10^{14}}{9 \cdot 10^{16}} = 10^{-2},$$

que se puede despreciar frente a 1 y por tanto  $m = m_0$  masa en reposo del electrón. ¿Pero qué ocurriría si aplicásemos un potencial de 50.000 voltios, próximo al que tienen los cañones de los aparatos de TV? En este caso, la velocidad sería de  $\approx 6 \cdot 10^8$  m/s y  $v^2/c^2 \approx 0.16$  *no despreciable frente a la unidad*, entrando por tanto en el dominio relativista.

Uno se pregunta, a la vista de esta discusión, que si puede ser tan sencillo, ¿cómo no se detectó esta variación de la masa de las partículas si de rayos catódicos y potenciales mayores de 100.000 voltios se disponía ya antes de 1900? La respuesta es afirmativa, y en un trabajo anterior al 1905, fecha de publicación de la teoría de la relatividad por Einstein, se comentó que la mecánica clásica no podía explicar el movimiento de las partículas cargadas, cuando éstas son aceleradas a potenciales elevados.

Como comentario final diremos que no estamos tan lejos de la Física Moderna y, que igual que un segundo es un intervalo de tiempo enorme en el mundo de la Física, velocidades de 1.000 Km/h son en esta disciplina situaciones casi estáticas.

# Práctica nº 10: origen de los campos magnéticos. Experiencia de Oersted

## Oersted (1777-1851)

Físico danés. Descubridor de la producción de un campo magnético por una corriente eléctrica.

Oersted estudió Ciencias Físicas y Farmacia en la Universidad de Copenhague y después de una etapa periodística y maestro fue nombrado profesor de Física en 1806, llegando a ser posteriormente Director del Instituto Politécnico de Copenhague.

Oersted es recordado por su descubrimiento de que una corriente eléctrica induce un campo magnético a su alrededor, algo en lo que él creía, basado en su propia intuición.

En un famoso experimento realizado por primera vez frente a sus estudiantes en 1820, colocó una brújula directamente bajo un alambre. Cuando la corriente fue conectada a través de dicho alambre la aguja se desplazó ligeramente. Su descubrimiento llevó a una gran actividad y resurgimiento del interés de otros físicos en electricidad y magnetismo. Oersted también obtuvo el primer valor preciso de la compresibilidad del agua en 1822.

## Práctica

### Introducción

En la práctica anterior hemos visto el efecto que sobre una partícula cargada en movimiento produce un campo magnético, sin preocuparnos del origen de dicho campo. Oersted, cuenta la historia de la Física, observó la desviación de una aguja imantada cuando cerca de ella se hacía pasar una corriente

continua por un hilo. Este descubrimiento fue la base para deducir que el origen de los campos magnéticos son las corrientes eléctricas. ¿Y el origen del magnetismo de los sólidos? En este caso, la «corriente» la producen los electrones girando alrededor del núcleo, y habrá magnetismo cuando lo hagan ordenadamente respecto a los átomos vecinos; por si se agita demasiado a los átomos (incrementar la temperatura) pierden esta propiedad.

El objetivo, pues, de esta práctica es en primer lugar repetir la experiencia de Oersted, para posteriormente comprobar experimentalmente que el campo magnético creado por un conductor rectilíneo (aunque no sea indefinido) responde a la expresión:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi a} \quad \text{VII}$$

en donde  $I$  es la intensidad de corriente y  $a$  es la distancia a la cual se mide el campo  $B$ .

### Técnica experimental

La figura (25) representa un esquema del experimento. A diferencia de Oersted, no utilizaremos una brújula sino un péndulo de torsión que tan buen resultado nos dio para repetir la experiencia de Coulomb. En este caso, la esfera cargada se cambia por un imán que será desviado si la corriente crea un campo magnético. Igualmente, el par de fuerzas que sobre el imán se produce será medido por la desviación  $L$  sobre la pared del «spot» luminoso, tomando

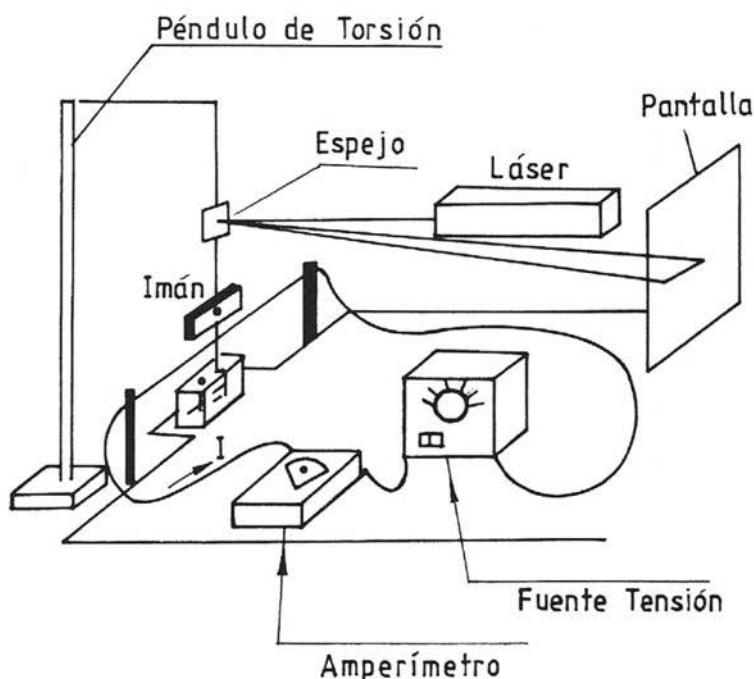


Figura 25. Experiencia de Oersted

como origen la posición de éste cuando no pasa corriente por el hilo.

Este sistema de gran sensibilidad permite trabajar con campos magnéticos débiles, del orden del terrestre, y por tanto con corrientes de unos pocos de mA. lo que permite asegurar que el hilo no se calienta, siendo así, en estas condiciones, la resistencia y la intensidad constante y en definitiva que el campo magnético no varía mientras dura la experiencia.

## Resultados y discusión

El primer hecho que se debe observar es la desviación del imán al paso de la corriente en función del sentido de ésta, para a continuación ver la dependencia de  $B$  con  $I$  y  $a$ .

La Figura (26) presenta la desviación  $l$ , que es

proporcional al par sobre el imán y por tanto al campo magnético  $B$  en función de la corriente  $I$ .

De acuerdo con la expresión VII,  $B$  ó  $l$  es lineal con la corriente  $I$ , de acuerdo con el resultado indicado.

En relación de la dependencia con  $a$ , ésta se obtiene moviendo el hilo conductor paralelo a la mesa, teniendo precaución de que éste quede paralelo al imán. El resultado obtenido de esta variación se muestra en la Figura (27), en donde se ha representado  $l$  frente a  $1/a$ . La dependencia lineal responde al comportamiento previsto con la teoría. En la Figura (27) la recta debería pasar por el origen. Este hecho se nos ha repetido varias veces a lo largo del curso y, como en este caso, responde casi siempre a un error sistemático. Concretamente, en esta experiencia, es debido a como tomamos el origen de la distancia  $a$ . Es fácil corregir esta desviación, pero intencionada-

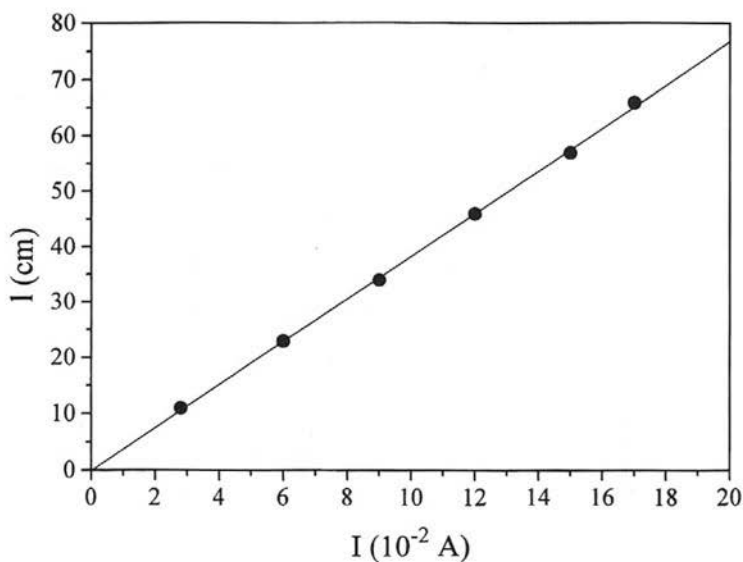


Figura 26. Desviación del haz  $l$  en función de la corriente.

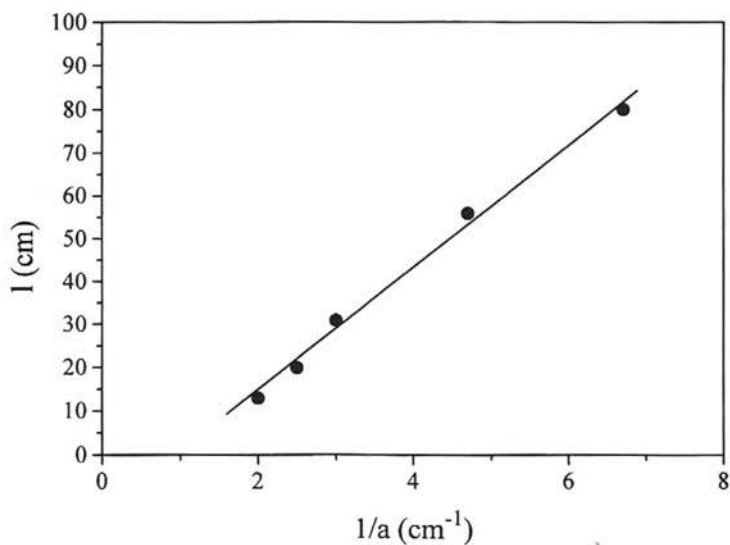


Figura 27. Desviación del haz  $l$  en función de la distancia.

mente no lo hemos hecho, pues lo más importante es ver el comportamiento lineal y el alumno debe acostumbrarse, que con resultados no perfectos, muchas veces se aprende más.

El lector puede ampliar este estudio y sustituir el conductor rectilíneo por un espira o un solenoide

y continuar comprobando las leyes físicas. Pero quizás a lo que más le animamos es a saber qué campo aplicó, compararlo con el terrestre, comprobar que a las intensidades utilizadas no hay aumento de temperatura del hilo, en fin, a hacer números sobre la experiencia que ha realizado.

## RESUMEN

Este trabajo presenta una cierta «filosofía» de la enseñanza de la física a través de la realización de diez prácticas de laboratorio a nivel de C.O.U. y primer curso de Facultad de Ciencias.

La mencionada «filosofía» consiste en que los alumnos deben acompañar y simultanear la realización de experiencias sencillas de forma conjunta, en la misma clase y en paralelo con la teoría.

Los datos obtenidos por diversos grupos de alumnos sobre la misma experiencia son discutidos globalmente proporcionando una buena estadística.

La selección de prácticas no es única ni mucho menos, sino que puede ser variada a voluntad del docente de acuerdo con sus posibilidades experimentales, aunque las aquí presentadas ofrecen una selección amplia y asequible.

Finalmente se han incluido también algunas notas biográficas para conectar al estudiante con aspectos humanos e históricos del desarrollo de la Ciencia.

**Palabras clave:** Física, enseñanza, prácticas de laboratorio.

## ABSTRACT

This work presents a «philosophy» of teaching physics through the carrying out of ten laboratory demonstrations during the last course at high school or the first years faculty level.

That philosophy consists in the simultaneous development of experimental and theoretical teaching in the same lecture hall, using for that simple experimental demonstrations.

The data gathered by several groups of students also allows an introduction to the statistical handling of measurements.

The selection of the experiments is not unique and can be adjusted by the teacher according with the apparatus available in a particular Center, although those here presented are a wide and reasonable selection.

Finally, the inclusion of introductory biographic notes provides a connection with the historic and human aspects of the development of science.

**Key words:** Physic, teaching, laboratory demonstrations.

Francisco Jaque Rechea  
Fernando Cusso Pérez  
Dpto. de Física de Materiales  
Facultad de Ciencias  
Universidad Autónoma de Madrid  
Ciudad Universitaria de Cantoblanco  
28049 MADRID