



Actividades experimentales en física general con fotografía y vídeo digitales

R. Valdés Castro^a y V. Tricio^b

Departamento de Física, Universidad de Burgos, España.

a) Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos; rvaldes@ubu.es†

b) Facultad de Ciencias; vtricio@ubu.es

†autor para la correspondencia

Recibido el 1/06/2007. Aprobado en versión final el 15/06/2007.

Sumario. Prácticamente desde su invención, la fotografía es utilizada en las investigaciones sobre Física y Astronomía. A partir de los años sesenta del pasado siglo esa tecnología ha sido empleada, más bien ocasionalmente, en la realización de mediciones durante la enseñanza de la Física. Desde hace unos años nosotros estamos utilizando los ordenadores y las cámaras digitales como equipos generales del laboratorio docente y empleándolos sistemáticamente para el planteamiento y la resolución de problemas experimentales. En nuestro trabajo presentamos un conjunto de actividades experimentales, concebidas gracias al uso de las técnicas fotográficas modernas. Mostramos el software *Análisis de Imágenes*, creado por nosotros para la realización de mediciones sobre fotos y vídeos. Abarcamos temáticas de mecánica, movimiento térmico, óptica, física de partículas y teoría de la relatividad. El material docente elaborado tiene utilidad para integrar a las clases de resolución problemas “teóricos” elementos de la actividad experimental. Los resultados de nuestra labor pueden ser de interés para la enseñanza a distancia.

Abstract. From its invention, photography is used for investigations on Physics and Astronomy. In the last century that technology occasionally was used for measurements in Physics education. Now we are using computers and digital cameras like general equipment in the laboratory and we are using them systematically for exposition and resolution of experimental problems. In our work we show a set of experimental activities using the modern photographic techniques. We show software *Análisis de Imágenes*, created by us for measurements on photos and videos. We have included thematic related to mechanics, thermal motion, optic, particles and relativity.

Palabras clave. Medios audiovisuales 01.50.F-, uso de computadoras en la enseñanza de Física 01.50.ht, Uso de computadoras en el laboratorio 01.50.Lc.

1 Introducción

La fotografía digital es, desde sus orígenes, una herramienta para las investigaciones científicas, la actividad periodística y la creación artística. Actualmente es un elemento más del consumo masivo (al menos en los países desarrollados), cuando la educación para todos se ha convertido en una aspiración de la sociedad. De ahí la necesidad de familiarizar a los estudiantes de los diferentes niveles de enseñanza, con los principios de funcionamiento y la utilización de esa nueva tecnología. Por otra parte, la fotografía digital es un medio didáctico que

permite agilizar el aprendizaje y tiene particular trascendencia para la educación a distancia.

En el caso de la enseñanza de la Física y especialmente de la formación universitaria, es prácticamente imposible concebir el laboratorio docente sin las cámaras digitales. Existen dos tendencias básicas en la utilización de fotografía digital:

- La ilustración de los conceptos expuestos en libros o por el profesor en el aula.
- La familiarización de los estudiantes con elementos de la actividad investigadora contemporánea.

Es precisamente en esta última tendencia, relacionada

con la resolución de problemas, la realización de mediciones, los cálculos analíticos y numéricos, la emisión de suposiciones, el diseño de experimentos, etc., en la que centramos nuestra atención.

Con el fin de hacer mediciones sobre fotografías y vídeos hemos confeccionado y utilizamos el programa *Análisis de Imágenes (PAI)*. Se trata de un software que permite medir distancias, intervalos de tiempo e intensidad de la luz. Ello permite plantear y solucionar de forma novedosa, problemas relativos a diferentes temáticas del curso de Física General: mecánica, movimiento térmico, óptica, física de partículas y teoría de la relatividad. Hemos preparado dieciséis problemas experimentales acompañados de las fotografías o vídeos correspondientes. A continuación describimos el software *Análisis de Imágenes* y resumimos el contenido de las actividades experimentales concebidas.

2 Medios utilizados para realizar las actividades experimentales

La Fig. 1 muestra las dos ventanas principales de nuestro software *Análisis de Imágenes* mientras se usaba en la realización de experiencias concretas^{1, 2}. El sistema consta de dos módulos principales. Uno lo denominamos Posición y Tiempo y es especialmente útil para la realización de actividades relativas a la mecánica, movimiento térmico y Física de las partículas elementales. Puede ser utilizado con las normas PAL y NTSC. El otro módulo, lo llamamos Posición, Intensidad y Color de la Luz que, claro está, se usa en mediciones ópticas. Los botones de control permiten seleccionar fotogramas de vídeos, medir intervalos de tiempo entre fotogramas, determinar las coordenadas de puntos sobre una imagen e insertar automáticamente en una hoja de *Microsoft Excel* los resultados de las mediciones. El software cuenta con un explorador de páginas Web que posibilita a los alumnos acceder al planteamiento de los problemas y hallar artículos que orientan cómo solucionarlos.

Para tomar fotografías y vídeos de unos dos minutos de duración, utilizamos la cámara digital *Sony DSC – W5*. Con esta cámara es posible hacer secuencias de 16 fotogramas de objetos en movimiento (modo continuo o de disparos múltiples). La superposición de los fotogramas permite conformar una sola imagen de tipo estroboscópico, sin necesidad de oscurecimiento y de lámparas intermitentes. La cámara brinda la posibilidad de regular el tiempo de exposición y la abertura del diafragma. Ello tiene especial interés para obtener imágenes nítidas de objetos en movimiento. El procesamiento del material fotográfico lo realizamos con herramientas generales como *Adobe Photoshop* y *Adobe Premiere*.

La mayoría de las instalaciones experimentales usadas para hacer las fotografías incluye una regla. Ello tiene como objetivo contar con un patrón de longitud conocida, que permita determinar la escala de la imagen utilizada en las mediciones.

3 Resumen de actividades experimentales preparadas

Presentamos a continuación catorce actividades que abarcan diversas temáticas de Física General.

Medición del radio de la Tierra. Se utilizan una fotografía de Egipto tomada por un satélite de la NASA y el método de Eratóstenes para calcular el radio de la Tierra. Con el programa *Análisis de Imágenes* se mide la distancia entre Asuán y Alejandría, cuyas posiciones han sido indicadas en la foto. Conociendo las latitudes de cada una de las ciudades mencionadas, se halla el radio de la Tierra.

Medición del tiempo de exposición de una cámara. Realizamos una secuencia de fotogramas de la caída libre de un cuerpo. En cada fotograma la imagen del móvil es una traza cuya longitud depende del tiempo de exposición. Midiendo la longitud de las trazas y el intervalo de tiempo entre los disparos estroboscópicos, se calcula el tiempo de exposición de la cámara. Para la realización de esta experiencia conviene utilizar tiempos de exposición del orden de $1/30 - 1/25$ s.

Conservación de la energía mecánica. Se utiliza la fotografía estroboscópica de media oscilación de un péndulo simple de unos 30 cm de longitud. Con ella es posible medir el desplazamiento de la carga colgada, realizado durante el lapso (0,04 s) entre dos disparos estroboscópicos sucesivos. Se puede considerar que en ese tiempo el movimiento de la pesa es prácticamente rectilíneo uniforme. Ello permite hallar la energía cinética de la pesa en el tramo de recorrido analizado. Si se mide la altura de la pesa respecto a determinado nivel de referencia, se halla la energía potencial correspondiente. Determinando las energías cinética y potencial de la carga en dos posiciones distintas, se comprueba la conservación de la energía mecánica atendiendo a los límites de las incertidumbres experimentales.

Conservación del momentum lineal. Los alumnos estudian el choque inelástico de dos pelotas de goma en el plano. La fotografía estroboscópica de las bolas permite determinar la velocidad de cada una. Las pelotas tienen la misma masa. De este modo, midiendo solamente velocidades, se comprueba la conservación de la cantidad de movimiento del sistema dentro de los límites de las incertidumbres experimentales. Por otra parte, también es posible determinar que la energía mecánica no se conserva en este caso y que aproximadamente el 50% de ella se transforma en energía interna del sistema.

Estudio de la caída de un proyectil considerando la resistencia del aire. Se analizan las fotos estroboscópicas de la caída de una bolita de poliestireno de 14 mm de diámetro y de una pelota de ping-pong. Se utilizan distintos modelos para describir el movimiento observado: caída libre, movimiento con resistencia del aire proporcional a la velocidad y al cuadrado de la misma. La masa de los móviles y el coeficiente de resistencia frontal medio son dados. La comparación de los gráficos

experimentales de posición y tiempo, con la representación gráfica de la solución numérica las ecuaciones diferenciales de movimiento permiten esclarecer que el modelo más adecuado para describir la caída de la pelotita de poliestireno y de la pelota de ping – pong es el que considera la resistencia del aire dependiente del cuadrado de la velocidad.

Tiro oblicuo de un proyectil. Es examinada la fotografía estroboscópica del movimiento de una pelotita de poliestireno lanzada con un ángulo respecto a la horizontal. Se comparan la trayectoria experimental, con las predicciones hechas a través de la solución numérica de las ecuaciones diferenciales que describen el movimiento considerado. Para resolver las ecuaciones diferenciales, las condiciones iniciales se hallan a través de mediciones sobre la fotografía. Considerando la incertidumbre de la medida de las condiciones iniciales (coordenadas y velocidad), se hacen tres predicciones teóricas: la trayectoria de alcance máximo, la de alcance mínimo y la de alcance medio. La trayectoria experimental queda entre las dos primeras y muy cercana a la última. La experiencia pone de manifiesto la significativa sensibilidad del sistema de ecuaciones diferenciales a las condiciones iniciales².

Oscilaciones armónicas. Con el programa Análisis de Imágenes los estudiantes examinan un vídeo del movimiento de un péndulo simple. Las mediciones del tiempo y de la posición de la carga colgada, permiten construir el gráfico de elongación respecto al tiempo y comprobar que el modelo de oscilaciones armónicas es adecuado para describir fenómenos reales.

Estudio del movimiento browniano. Los alumnos utilizan vídeos del movimiento de partículas brownianas para comprobar la fórmula de Einstein y estimar el número de Avogadro. También comprueban que los desplazamientos brownianos responden a una distribución normal.

Comprobación de la ley de Malus. Se utiliza una secuencia fotográfica de la imagen de una fuente de luz polarizada. La luz se hace pasar a través de un polarizador. Variando en un valor constante el ángulo entre el eje del polarizador y el eje de polarización de la luz incidente se obtiene la secuencia de fotogramas. La intensidad de la luz es medida con el programa Análisis de Imágenes. Así se obtiene una muestra de puntos experimentales a la que se ajusta plenamente la ley de Malus.

Determinación del ancho de una rendija de difracción. Utilizando la aproximación de Fraunhofer los alumnos calculan el ancho de una rendija. Para ello, miden la distancia entre dos mínimos de difracción del mismo orden. Esta experiencia esboza el camino de posibles aplicaciones de la difracción.

Calibración de una red de difracción. El uso de redes de difracción en espectrometría requiere el calibrado de las mismas. Utilizando la fotografía de un patrón de difracción obtenido con un láser de He-Ne, los estudiantes determinan la constante y el período de la red con que fue obtenida la imagen.

Estudio de la difracción de electrones. Si en un

tubo de rayos catódicos se hace incidir el haz de electrones sobre un blanco con polvo de grafito, es posible observar un patrón de difracción. La ley de Bragg permite calcular las distancias entre los planos atómicos paralelos que determinan el patrón. Los anillos de difracción se detectan con una pantalla fluorescente y son fotografiados. El diámetro de los anillos depende de la longitud de onda de los electrones que interactúan con el grafito. Calculando dicha longitud y midiendo el diámetro de los anillos de difracción, con la ley de Bragg se determina la distancia interplanar correspondiente. Para realizar las mediciones los alumnos cuentan con una secuencia de fotogramas que contienen patrones de difracción, obtenidos con distintos potenciales de aceleración de los electrones. Ello permite utilizar la regresión lineal durante los cálculos, cuyos resultados son coherentes con al ley de Bragg.

Estudio de la traza de un positrón. Se analiza la fotografía de la huella que en la cámara de Wilson deja una partícula cargada, al atravesar una varilla de plomo en un campo magnético homogéneo de inducción conocida. Observando la foto, los alumnos hallan el sentido del movimiento de la carga y, con la ley de Lorentz, el signo de la misma. La energía de la partícula se aporta como dato, obtenido mediante el conteo de la cantidad de ionizaciones (número de gotas) en la traza. Midiendo el radio de la trayectoria registrada, es posible calcular el impulso de la partícula. Sobre esta base y con la fórmula relativista correspondiente, se determina la energía cinética. Este resultado experimental se compara con el obtenido de hallar teóricamente la energía cinética que tendría un electrón de carga positiva en las condiciones indicadas. Razonamientos similares condujeron al descubrimiento del positrón hacia 1932.

Estudio de un par electrón – positrón. Es analizada la fotografía de las trazas de un par electrón – positrón, generado cuando un fotón γ atraviesa una varilla de plomo en la cámara de niebla. La energía del fotón y la inducción del campo magnético exterior son conocidas. Los estudiantes deben precisar qué traza corresponde al electrón y cuál al positrón, comprobar que toda la energía del fotón se transfiere al par electrón – positrón y estimar el impulso que recibe el núcleo del átomo de plomo al ocurrir la desintegración.

4 Dos ejemplos ilustrativos

Medición de la longitud de onda de líneas espectrales. Utilizando lámparas habituales en los laboratorios docentes de Física, hemos obtenido las fotografías de espectros de diferentes elementos. En calidad de espectrógrafo (Fig. 2) se puede utilizar el montaje siguiente. Sobre un banco óptico se fija una varilla que sostiene la regla patrón R . A la distancia de aproximadamente 1,40 m es colocada una red de difracción d , con aproximadamente 600 líneas por milímetro y previamente calibrada. Justo detrás de la red, rozándola con su objetivo, se ubica la cámara fotográfica CF . Entre la regla y la red

se sitúa la lámpara espectral L , a más de un metro de distancia de la segunda.

Empleando una instalación semejante se obtienen imágenes que permiten calcular, con un error del orden o inferior al 1%, la longitud de onda de las líneas espectrales visibles de átomos como los de hidrógeno, helio, mercurio y cadmio. La figura 3 corresponde al espectro visible del hidrógeno¹.

Utilizando las fotos realizadas, los estudiantes pueden abordar problemáticas como las siguientes:

-¿Cómo medir la cantidad de líneas por milímetro que tiene una red de difracción?

-¿Qué procedimiento seguir para hallar la longitud de onda de las líneas espectrales grabadas por la cámara digital?

Comprender a fondo la solución de estos interrogantes es una tarea compleja para los alumnos que se inician en la Física. Por eso conviene organizar una secuencia de actividades, que orienten la atención de los estudiantes hacia elementos claves de la metodología de medición⁴.

Algunas actividades son:

La cámara fotográfica es un componente esencial de la instalación utilizada para medir la longitud de onda de las líneas espectrales.

-Describe en un esquema cómo se forman en la cámara la imagen del espectro y de la regla patrón.

-¿Qué importancia tiene colocar el objetivo de la cámara lo más cerca posible de la red?

-En el espectrógrafo descrito la red de difracción se coloca aproximadamente a 1 m de la lámpara. La medición de las longitudes de onda se realiza utilizando la aproximación de Fraunhofer. ¿Con qué error puedes suponer paralelos los rayos de luz procedentes de la lámpara?

Los estudiantes preparan la respuesta a las problemáticas y tareas enunciadas, basándose en documentos preparados al efecto y a los que acceden utilizando el explorador del programa Análisis de Imágenes.

Estudio de la distribución de la intensidad de la luz en patrón de difracción de Fraunhofer. El análisis teórico de la difracción de la luz por una rendija rectangular, de conformidad con la aproximación de Fraunhofer, permite determinar que la intensidad del patrón varía según la expresión

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \quad (1)$$

donde I_0 es la intensidad de la luz en el centro del máximo de orden nulo, $\alpha = \frac{\pi b}{\lambda L} x$, b es el ancho de la rendija,

λ la longitud de onda de la luz, L la distancia desde la fuente de luz hasta la pantalla y x la distancia desde un punto del patrón hasta el centro del máximo. La fórmula anterior tiene sentido cuando L es suficientemente grande.

En nuestra experiencia empleamos un láser de He-Ne para obtener el patrón de difracción, que fotografiamos en blanco y negro. La fotografía en blanco y negro per-

mite eliminar errores en la medición de la intensidad de la luz, que en una imagen a color introducirían los filtros de la cámara digital. El esquema de la instalación experimental utilizada corresponde al de la Fig. 3. Proponemos que los alumnos solucionen tareas como las siguientes:

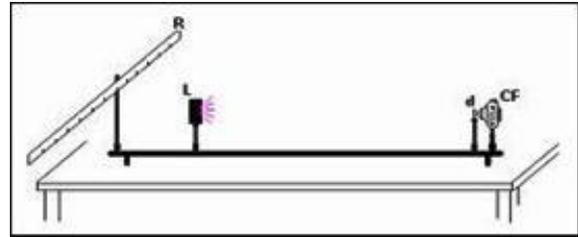


Figura 2. Espectrógrafo sencillo.



Figura 3. Montaje fotográfico con las líneas espectrales del hidrógeno.

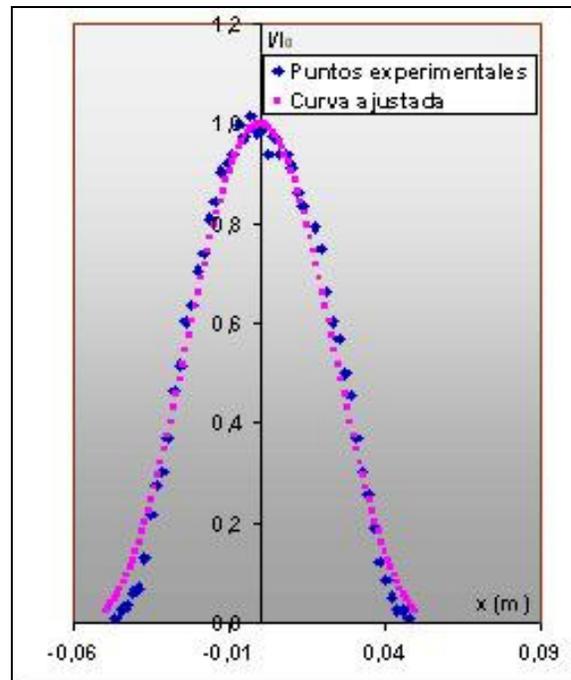


Figura 4. Gráfico de I/I_0 respecto a x .

1. Construye el gráfico experimental de la intensidad relativa I/I_0 respecto x , para el máximo de orden nulo.
2. Ajusta a los puntos experimentales la curva teórica

- representativa de los valores de esa intensidad relativa.
3. Calcula el ancho de la rendija de difracción utilizada en el experimento.
 4. ¿Qué ley de distribución propondrías para caracterizar la variación de la intensidad de la luz en la dirección perpendicular a la que ocurre la difracción?

el carácter gaussiano de la distribución de fotones en el haz del láser de He-Ne.

5 Conclusiones

La utilización combinada de la fotografía digital y los ordenadores en la realización de mediciones, abre claras perspectivas a la tendencia didáctica de familiarizar a los estudiantes con elementos de la actividad investigadora contemporánea y a la educación a distancia.

Referencias

1. R. Valdés, V. Tricio, J. A. Curbelo y A. Cubas, La fotografía digital y el ordenador en la resolución de problemas, Libro de Actas: XXIX Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física, Vol. I, julio (2003).
2. R. Valdés y V. Tricio, Experiencias de elaboración y uso de la fotografía digital en la resolución de problemas docentes de física, Revista 100cias@uned, N°8, pp. 144-152 (2005).
3. R. Valdés y V. Tricio, The computer means and the study of the movement of bodies submerged in a fluid. An application of didactic ideas; Proceedings International conference on Education IADAT 2004. Innovation, Technology and Research in Education, Bilbao, July (2004).
4. C. Carreras y M. Yuste, Una forma sencilla y natural de iniciar a los estudiantes en la Óptica Cuántica: obtención y análisis de algunos espectros atómicos; Óptica Pura y Aplicada, Vol. 21, pp. 167-177 (1988).

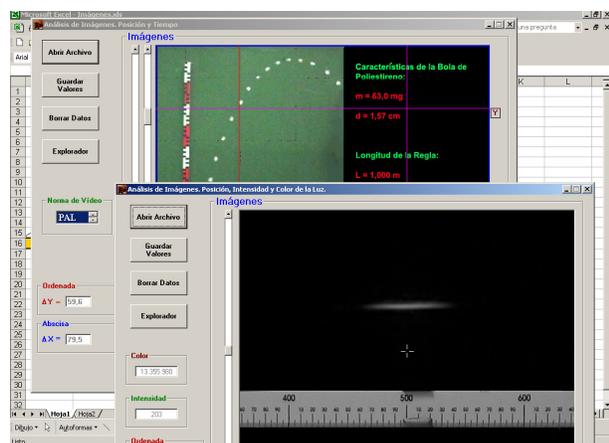


Figura 5. Ventanas principales del software “Análisis de Imágenes”.

Las mediciones hechas con el software *Análisis de Imágenes* y con la fotografía del patrón, ponen de manifiesto que la aproximación de Fraunhofer es adecuada para describir los datos experimentales (Fig. 4). Por otra parte también es posible fundamentar experimentalmente