

Absorción óptica, dispersión y dispersión múltiple: mediciones experimentales utilizando colorantes alimentarios, tinta china y leche.

Frank Lamelas, y Sudha Swaminathan

Cita: [Revista Estadounidense de Física](#) 88, 137 (2020); doi: 10.1119/10.0000280 Ver

en línea: <https://doi.org/10.1119/10.0000280> Ver

tabla de contenidos: <https://aapt.scitation.org/toc/ajp/88/2>

Publicado por la [Asociación Estadounidense de Profesores de Física](#)

AMERICAN
JOURNAL
of PHYSICS

Seeking applications for Editor
of the *American Journal of Physics* (AJP)





Absorción óptica, dispersión y dispersión múltiple: mediciones experimentales utilizando colorantes alimentarios, tinta china y leche.

Frank Lamelas y Sudha Swaminathan

Departamento de Tierra, Medio Ambiente y Física, Universidad Estatal de Worcester, Worcester, Massachusetts 01602

(Recibido el 27 de junio de 2019; aceptado el 12 de noviembre de 2019)

Se utiliza una serie de experimentos ópticos para ilustrar los efectos del color, la absorción y la dispersión. En experimentos sencillos, la intensidad de la luz láser roja se mide después de que el haz pasa a través de muestras con concentraciones crecientes de colorantes alimentarios, tinta negra y leche. Los datos se ajustan a funciones exponenciales y se obtiene una atenuación similar con muestras muy diferentes: tinta negra y leche blanca. Las intensidades medidas y las observaciones visuales sirven para ilustrar la distinción entre absorción, dispersión y atenuación. En experimentos más avanzados, se miden los coeficientes de atenuación y la longitud media de atenuación. En el caso de muestras de leche, las mediciones de intensidad revelan una dependencia de la concentración no exponencial, que es una señal de dispersión múltiple. Finalmente, la intensidad en función de la distancia se mide escaneando muestras de tinta o leche en forma de cuña a través de un detector. Los efectos de la dispersión múltiple en la leche son en este caso muy pronunciados. VC 2020 Asociación Estadounidense de Profesores de Física. <https://doi.org/10.1119/10.0000280>

I. INTRODUCCIÓN

Los rayos de luz que viajan a través de leche, tinta o tintes de colores pueden dispersarse o absorberse, lo que provoca una pérdida de intensidad. La pérdida de intensidad en una mezcla acuosa es proporcional a la concentración c , la intensidad I y el incremento del recorrido dx ,

$$dI \propto -I c dx; \quad (1)$$

donde I es el coeficiente de atenuación lineal para un líquido sin diluir. La concentración c es la fracción de volumen adimensional de la sustancia añadida al agua y el coeficiente de atenuación tiene dimensiones de longitud inversa. La ecuación (1) es válida en ausencia de dispersión múltiple, correspondiente a una muestra que es puramente absorbente, o para una dispersión en el límite de baja concentración. Con intensidad incidente I_0 , la intensidad es

$$I \propto I_0 e^{-I c x} \quad (2)$$

La forma de la ecuación. (2) indica que la intensidad disminuirá exponencialmente a medida que aumente la concentración o la longitud del camino.

En experimentos sencillos, los estudiantes observan la absorción y dispersión de un rayo láser rojo que viaja a través de (i) cuatro soluciones de tintes de colores, (ii) tinta negra diluida y (iii) leche diluida. Se añaden gotas de estas sustancias al agua y se mide la intensidad transmitida con un fotodiodo. La relación entre la intensidad transmitida y la incidente se traza en función del número de gotas agregadas y los estudiantes analizan los datos utilizando funciones exponenciales. Este experimento se lleva a cabo como un ejercicio de laboratorio en Física en el Arte, un curso para estudiantes no científicos.¹ La absorción y la reflexión son importantes para comprender

las condiciones de iluminación en una galería de arte y en el estudio de dibujos o capas de pintura. que puede encontrarse debajo de la superficie visible de un objeto de arte. Un ejemplo de absorción en un contexto artístico es el uso de radiografía x para visualizar pinturas que tienen pigmentos que contienen plomo o cadmio. Por otro lado, las pinturas blancas contienen partículas como carbonato de plomo o titanio; Estos materiales no son absorbentes en la parte visible del espectro y sus propiedades se explican por la dispersión que se produce en las superficies de las partículas. El laboratorio de absorción aquí descrito complementa otros laboratorios, donde los estudiantes

medir los espectros de emisión de diferentes tipos de fuentes de luz, y la reflectancia y transmisión infrarroja de tintes y pigmentos en marcadores y diversos tipos de pinturas. Antes de comenzar los experimentos de absorción, los estudiantes de Física en el Arte realizan predicciones cualitativas sobre la fuerza de absorción de los diferentes colorantes alimentarios. Pueden completar la recopilación de datos de absorción, trazar las intensidades en función del número de gotas e interpretar sus resultados durante un laboratorio de dos horas. Después del laboratorio, los estudiantes escriben un informe de dos páginas con un resumen narrativo para una audiencia general, similar en estilo a un artículo científico en un periódico, pero que incluye detalles técnicos sobre la medición y el análisis de datos. Es valioso presentar a los estudiantes las funciones exponenciales y los logaritmos a través del análisis de un experimento de absorción, ya que estas herramientas matemáticas se utilizan en otros temas de la física. Por ejemplo, los estudiantes de Física en el Arte aprenden sobre la desintegración radiactiva y la datación por carbono de objetos del patrimonio cultural, mientras que los estudiantes de cursos convencionales de física de primer año pueden aprender sobre la Ley de enfriamiento de Newton² o el comportamiento exponencial de un circuito RC de descarga.

En un experimento anterior destinado a enseñar a los estudiantes sobre la dependencia de la concentración de la absorbancia óptica, se analizaron soluciones de colorantes alimentarios utilizando un espectrómetro,³ y se probó una configuración hecha de componentes discretos en experimentos de absorción y dispersión.⁴ Resultados de un experimento sobre muestras con diferentes concentraciones de grasa láctea se presentan en la Ref. 5, mientras que en la Ref. 5 se ofrece una descripción teórica de la dispersión múltiple adecuada para estudiantes universitarios de nivel intermedio a avanzado. 6. Los experimentos descritos aquí complementan las ideas y métodos presentados en las Refs. 2 a 6, así como otros experimentos sobre las propiedades ópticas de soluciones y suspensiones acuosas enumeradas en la Ref. 7.

II. LA INTENSIDAD COMO FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN

Nuestra configuración experimental se muestra en la Fig. 1. Los experimentos comienzan con un vial de vidrio de 20 ml que contiene 10 ml de agua que se agita continuamente mediante un agitador magnético. El haz de un láser de diodo de 1 mW⁸ con una longitud de onda nominal de 650 nm atraviesa la muestra y su intensidad se mide con un sencillo detector casero. El detector se hizo grabando

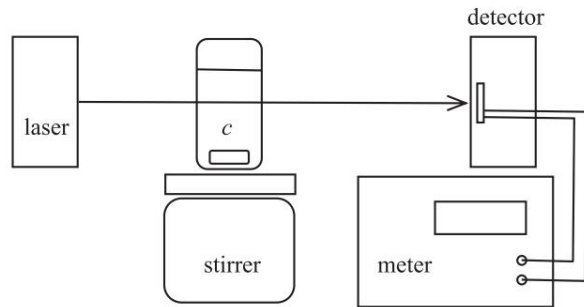


Fig. 1. Configuración experimental. Una muestra con concentración c se mantiene en un recipiente de 20 ml. vial en un agitador magnético. El detector se fabrica encintando una fotocélula de 9,7 mm. dentro de la cubierta transparente de una caja de plástico.

un fotodiodo sobrante dentro de la cubierta de plástico transparente de un proyecto caja. El fotodiodo es relativamente grande (9,7 mm) y aproximadamente cuadrado. El tamaño del detector simplifica la alineación al permitir a los estudiantes ver cuándo el rayo láser está centrado en el detector, y es relevante para los efectos de dispersión múltiple que se analizan a continuación. La corriente del detector (proporcional a la intensidad) se mide con un medidor de mesa⁹ que tiene 0,1 IA. resolución. Utilizamos un vial de vidrio cilíndrico como recipiente de muestra. porque es económico, fácil de manejar y lo suficientemente grande para una pequeña barra agitadora para colocar en el interior. El vial actúa como un cilindro. lente, lo que hace que el haz se propague corriente abajo del foco. en un En un experimento típico de Física en el Arte, la distancia entre la muestra y el detector es de 10 cm o menos y todo el haz transmitido cae sobre el detector. Cuando el detector está a 20 cm de la muestra, el El ancho del haz es aproximadamente el doble del ancho del detector.

La intensidad del haz transmitido se mide en función del número de gotas añadidas de tinte, tinta o leche. Si uno Si se ignora el ligero aumento en el volumen de la muestra debido al volumen de las gotas añadidas, la concentración después de n gotas es agregado viene dado por $c \frac{1}{4} nc_1$, donde c_1 es la concentración aumentar después de agregar una gota. La ecuación (2) se convierte en

$$I \frac{1}{I_0} = e^{-nc_1 L}; \quad (3)$$

donde L es la longitud del camino a través de la muestra. Dado que I , c_1 , y L se fijan a medida que se agregan gotas al agua, ecuación. (3) indica que la intensidad normalizada I/I_0 decae exponencialmente como una función del número de gotas n . Gotas de amarillo sin diluir, Se añaden colorantes alimentarios rojo, azul y verde¹⁰ al agua, utilizando los goteros incorporados en los viales de colorante alimentario. Antes del laboratorio, el instructor prepara un negro solución estándar de tinta de china¹¹ diluida al 1% en volumen, mientras que la solución estándar de leche se prepara con leche entera diluido al 11%. Las diluciones de tinta y leche se eligen de manera que producir una disminución exponencial similar en la intensidad transmitida cuando se añaden gotas de 50 μ l con una micropipeta. Utilizando el corriente del detector como medida de intensidad, el fondo intensidad con el rayo láser bloqueado y las luces de la habitación atenuado suele ser $I_{bkg} = 0,2$ IA. La intensidad transmitida a través de un vial lleno de agua corriente es aproximadamente $I_w \frac{1}{4} 235$ IA. Definimos la intensidad normalizada como

$$\frac{I}{I_0} = \frac{I - I_{bkg}}{I_w - I_{bkg}}; \quad (4)$$

donde I_n es la corriente del detector después de la adición de n gotas.

En la luz ambiental de la habitación, la tinta china aparece negra y lechosa. aparece blanco. Con las luces de la habitación atenuadas y el láser

encendido, después de agregar varias gotas de tinta al agua allí Hay algo de dispersión pero el rayo láser más o menos desaparece. en la mezcla oscura. Por otro lado, cuando se añade leche al agua, la mezcla parece brillar de color rojo. Un gráfico de las intensidades normalizadas versus el número de caída agregado para los distintos Las muestras se muestran en la Fig. 2. La atenuación del rayo láser. por las muestras de tinta y leche es aproximadamente igual, pero la El mecanismo es diferente, ya que la tinta es principalmente un absorbente. y la leche dispersa la luz. En otras palabras, una medición de la intensidad transmitida no determina si la muestra dispersa o absorbe la luz.¹² Los tintes coloreados muestran un efecto cualitativo pero pronunciado, a saber, el láser rojo La luz apenas es absorbida por los tintes rojo y amarillo después de la adición de diez gotas, pero se absorbe muy fuertemente después de la adición de sólo una gota de los tintes azul y verde.

Con estudiantes en un curso más avanzado como el secuencia introductoria basada en el cálculo, o en un curso de óptica de nivel intermedio, se puede proceder con un análisis más detallado de los datos. Reorganizando la ecuación. (2) y tomando el logaritmo natural, se obtiene

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\frac{1}{4} nc_1 L; \quad (5)$$

Esta ecuación muestra que se puede utilizar una gráfica del logaritmo de la intensidad normalizada para encontrar el coeficiente de atenuación con dos métodos diferentes. Se puede usar un contenedor.

con una longitud de paso fija $x \frac{1}{4} L$ (como el vial que se muestra en Fig. 1) y variar la concentración c , o se puede utilizar una muestra de concentración fija c en un recipiente en forma de cuña que tiene una longitud de trayectoria variable x , como se analiza en la Sec. III. La concentración c es la fracción en volumen de tinta o leche, siendo $c = 1$ correspondiente a tinta pura o leche pura. las concentraciones se calcularon con la mayor precisión posible teniendo en cuenta cuenta el volumen creciente de la muestra cada 50 μ l Se agrega gota. La Figura 3 muestra gráficos de $\ln(I/I_0)$ vs c , registrados con distancias muestra-detector d de 6, 10 y 20 cm.

Los datos de tinta en la Fig. 3 son lineales, de acuerdo con la ecuación. (5), pero las muestras de leche exhiben una desviación positiva de

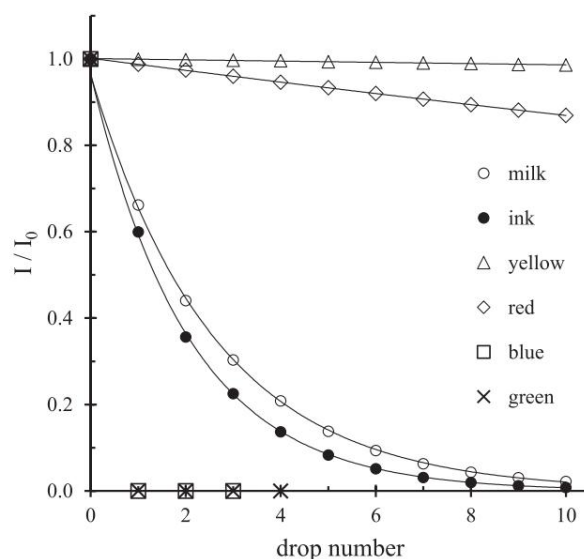


Fig. 2. Intensidad normalizada versus número de gotas agregadas para muestras de colorante alimentario, leche y tinta china. Las curvas que pasan por los puntos de datos son funciones exponenciales. La distancia entre la muestra y el detector para estas mediciones es 10cm. Los estudiantes de los laboratorios de Física en el Arte obtienen datos similares.

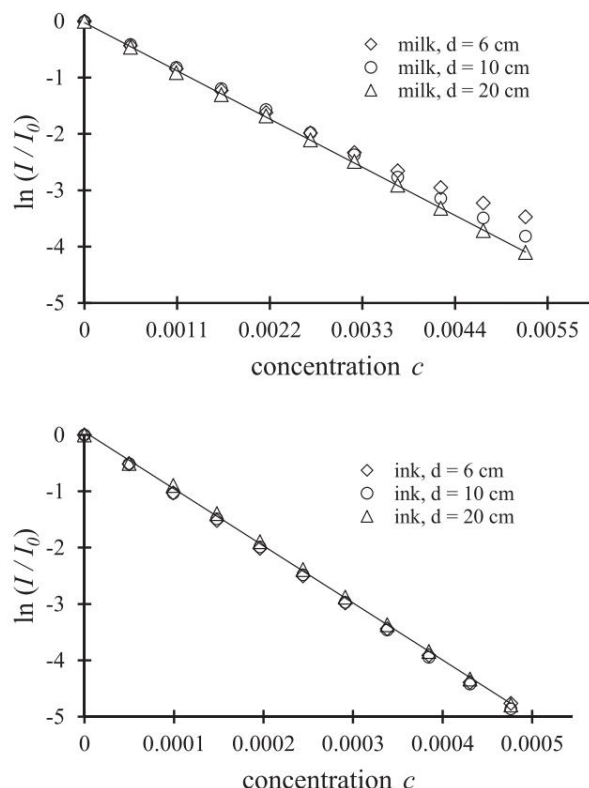


Fig. 3. Gráficos logarítmicos de la intensidad normalizada frente a la concentración para muestras de leche y tinta, con el detector a una distancia variable d de la muestra. Cada punto de datos sucesivo corresponde a la adición de una gota de 50 μ l de leche al 11% (arriba) o tinta al 1% (abajo). Los rangos del eje horizontal en los dos gráficos varían en un factor de 11, que es la relación de las concentraciones.

Comportamiento exponencial, con un efecto más fuerte a alta concentración y una distancia de detector pequeña. Con un dispersor (como la leche), existe una probabilidad finita de que un fotón que inicialmente se dispersa fuera del recorrido del detector se vuelva a dispersar en el detector. La dispersión múltiple tiende a aumentar el número de fotones que llegan al detector.⁶ En el límite de baja concentración, la dispersión múltiple es insignificante y la ecuación (1) se satisface, con una gráfica lineal de $\ln(I/I_0)$ vs c , pero la probabilidad de dispersión múltiple aumenta con la concentración. La probabilidad de dispersión múltiple en la trayectoria del detector es mayor cuando el detector abarca un ángulo sólido mayor. Para un detector de tamaño fijo, el ángulo sólido es proporcional al cuadrado inverso de la distancia del detector. (Un detector cercano subtende un ángulo grande y viceversa). La Figura 3 incluye datos de leche para distancias de detector $d = 6$ cm y $d = 20$ cm. Para un detector que es un cuadrado de 9,7 mm, los ángulos subtendidos en estos dos casos son 0,026 sr (cuando $d = 6$ cm) y 0,0024 sr ($d = 20$ cm).

Para un sistema con intensidad exponencial como en la ecuación (2), la longitud media de atenuación es $1/I$, la inversa del coeficiente de atenuación. La ecuación (5) implica que las pendientes de las parcelas en la Fig. 3 son iguales a IL para un contenedor con una longitud de camino L . Los viales de muestra utilizados en nuestros experimentos tienen un diámetro interior $L = 25$ mm. Los datos de tinta china de la Fig. 3 tienen una pendiente de 10130, lo que da como resultado un coeficiente de atenuación de enlace = 405 mm⁻¹ y una longitud media de atenuación de $1/\text{enlace} = 2,47$ lm. Para la leche, utilizamos los datos con una distancia muestra-detector de 20 cm, donde la dispersión múltiple es relativamente insignificante. En este caso la pendiente es 777, de la cual obtenemos $1/\text{enlace} = 31,1$ mm⁻¹ y $1/\text{leche} = 32,2$ lm. El coeficiente de atenuación para la leche se puede comparar con la Ref. 13, donde se muestran muestras de leche con diferente contenido de grasa.

El contenido se midió en varias longitudes de onda. En nuestro caso, asumimos que la leche entera¹⁴ tiene un contenido de grasa del 3,25%. Utilizando los datos que se muestran en la Fig. 5 (a) de la Ref. 13, el coeficiente de atenuación para fotones de 600 nm es de aproximadamente 38 mm⁻¹, un valor un 22% mayor que el que obtuvimos. También comparamos nuestros datos con los resultados de la Ref. 5. El coeficiente de atenuación de la leche entera no se informó explícitamente, pero podemos estimarlo utilizando los datos que se muestran en la Fig. 3 de ese artículo. Con $\ln(I/I_0)$ 6 y una longitud de trayectoria reportada de 75 lm, obtenemos un coeficiente de atenuación de 80 mm⁻¹, significativamente mayor que nuestro valor medido y el de la Ref. 13.

III. INTENSIDAD EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA

Usando la ecuación (5) con una concentración fija c , la pendiente de una gráfica de $\ln(I/I_0)$ frente a la longitud del camino x es igual a ILc . Se podrían realizar mediciones de longitud de trayectoria variable utilizando un conjunto de recipientes con espesor variable o utilizando un soporte de muestra en forma de cuña. En nuestra configuración (Fig. 4), un rayo láser vertical pasa a través de una cuña hecha de un par de portaobjetos de vidrio para microscopio con un espaciador en un extremo; el espaciador está hecho de un trozo de corredera. No fue necesario sellar los bordes de la cuña ya que las muestras de tinta y leche se mantuvieron en su lugar mediante fuerzas capilares. Se pegó con cinta adhesiva una escala de plástico en mm al portaobjetos superior, con el cero de la escala alineado con el extremo derecho donde los portaobjetos estaban en contacto. El mismo detector que en la Fig. 1 se cubrió con un orificio, hecho al pasar una aguja de coser de 1,1 mm de diámetro a través de un trozo de papel de aluminio. Se trazó una línea fiduciaria para marcar la posición del orificio. Se tomaron lecturas de intensidad mientras se empujaba la cuña a través del orificio. En una posición de cuña dada, la lectura de la escala en la línea fiduciaria del orificio es x_{sc} , correspondiente a la distancia desde el orificio hasta el extremo derecho de la cuña. La longitud del camino a través de la muestra está dada por $x = \frac{1}{4} x_{sc} \sin h$, donde $h = 0,89$ es el ángulo de cuña. La intensidad se midió en incrementos de 2 mm en x_{sc} , correspondientes a aumentos de 31 lm en la longitud del camino x .

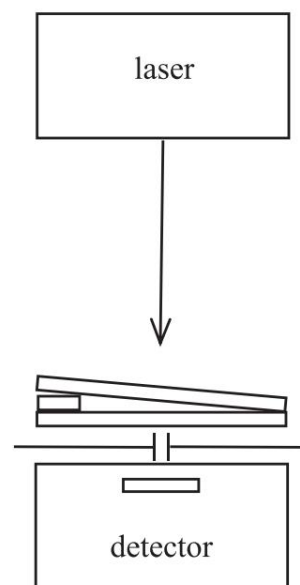


Fig. 4. Configuración para mediciones de intensidad en función del espesor de la muestra. Se sostiene una muestra líquida en una cuña hecha de dos portaobjetos de vidrio para microscopio. El detector está cubierto por una lámina con un orificio de 1,1 mm. Se pega una pequeña escala de plástico al portaobjetos superior y se escanea la cuña a través del orificio. Las intensidades se registran a intervalos de 2 mm en la posición horizontal del orificio, correspondientes a pasos de espesor de muestra de aproximadamente 31 lm.

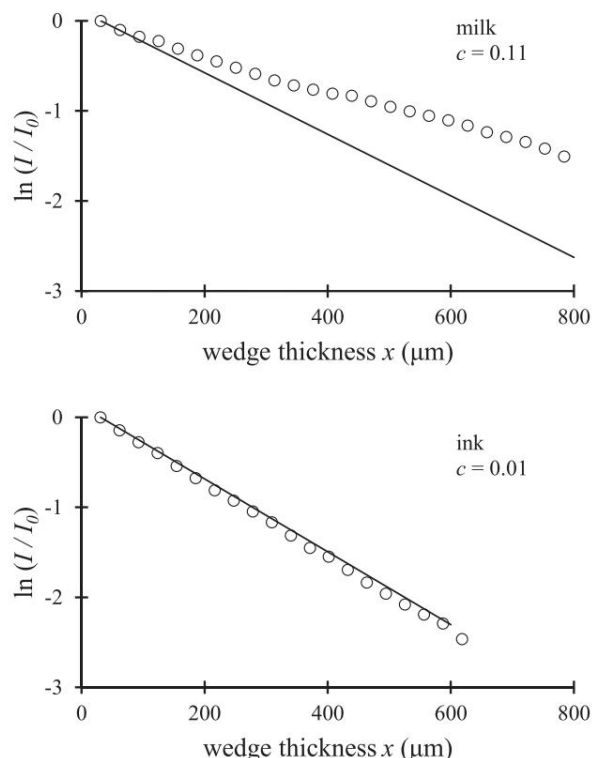


Fig. 5. Medición de la intensidad normalizada frente al espesor de la cuña para leche y soluciones estándar de tinta, utilizando la configuración que se muestra en la Fig. 4. Las líneas rectas son dibujado con pendientes correspondientes a los coeficientes de atenuación enlace $\frac{1}{4}$ 405 mm⁻¹ y leche $\frac{1}{4}$ 31,1 mm⁻¹. La gran desviación de los datos de la leche es consistente con fuerte dispersión múltiple. Los datos de la tinta muestran que se obtiene el mismo valor del coeficiente de atenuación midiendo la intensidad en función de la concentración o la intensidad en función del espesor de la muestra.

Las gráficas de $\ln(I/I_0)$ frente a x se muestran en la Fig. 5, para 1% de tinta. ($c = 0,01$) y 11% de leche ($c = 0,11$). Las líneas rectas en el Los gráficos de la Fig. 5 se realizan utilizando la ecuación. (5) con el enlace de coeficientes de atenuación y la leche obtenida de la Fig. 3. Los datos de la cuña para la tinta son lineales y parecen corresponder al mismo coeficiente de atenuación (enlace = 405 mm⁻¹) que en la concentración experimentos. En el caso de la leche, los datos de la cuña muestran una gran divergencia de la línea correspondiente a la Fig. 3 coeficiente de atenuación (leche = 31,1 mm⁻¹). La gran discrepancia entre las intensidades de la leche y la línea recta es un efecto de dispersión múltiple, presumiblemente debido a la gran Aceptación angular del detector en los experimentos de cuña. El diámetro del rayo láser en estos experimentos es aproximadamente 2,5 mm, y estimamos que la distancia desde la parte iluminada de la cuña de fluido hasta el orificio hay aproximadamente 2 mm. Estos valores producen una aceptación del detector. de aproximadamente 1,2 sr, mucho mayor que los valores correspondientes a los datos de concentración de la Fig. 3. El gran ángulo de aceptación del detector en los experimentos de cuña aumenta la probabilidad de que un fotón múltiplesmente disperso encuentre su camino hacia la superficie.

detector, teniendo en cuenta la discrepancia entre la leche datos de la Fig. 5 y la Fig. 3.

IV. RESUMEN

Se pueden utilizar experimentos de absorción y dispersión para compare los tintes de colores, la tinta negra absorbente y la leche, que es un dispersor. En el nivel introductorio, se puede medir el Intensidad transmitida a medida que se añaden gotas a soluciones agitadas. y grafique la intensidad normalizada en función del número de gotas. Los estudiantes pueden conectar el color de una solución de tinte. con la fuerza de su absorción de un rayo láser rojo. Con concentraciones apropiadas de las gotas añadidas, se puede investigar un absorbente (tinta) y un dispersor (leche) con similares atenuación en función del número de gotas. Los estudiantes aprenden a Distinguir entre absorción, dispersión y atenuación. En laboratorios más avanzados, se puede determinar la atenuación. coeficiente trazando el logaritmo de la intensidad normalizada en función de la concentración. Si uno usa un detector con un área de aproximadamente 1 cm² o más, se puede observe los efectos de dispersión múltiple en la leche realizando mediciones a varias distancias entre la muestra y el detector, correspondientes a diferentes ángulos de aceptación del detector. la cuña Los experimentos permiten medir la intensidad en función de distancia dentro de un fluido, lo que confirma que el coeficiente de atenuación de la tinta se puede determinar a partir de un gráfico de intensidad vs concentración o un gráfico de intensidad vs posición.

- ¹Sudha Swaminathan y Frank Lamelas, "Análisis de un espejo inusual en una pintura del siglo XVI: un ejercicio de museo para estudiantes de física", *Phys. Enseñar.* 55, 214-216 (2017).
- ²John W. Dewdney, "La ley de enfriamiento de Newton como introducción al laboratorio a funciones de decaimiento exponencial", *Am. J. Física.* 27, 668-669 (1959).
- ³Karen E. Stevens, "Uso de la absorción visible para analizar soluciones de Kool-Aid y dulces", *J. Chem. Educativo.* 83, 1544-1545 (2006).
- ⁴Thomas A. Lehman y Steven W. Pauls, "Un fotómetro láser que es ensamblado en segundos", *J. Chem. Educativo.* 68, 530-531 (1991).
- ⁵Gregory A. DiLisi, Collen M. Winters, Lori A. DiLisi y Kristina M. Peckinpaugh, "¿Tienes leche? Un experimento de la ley de Beer", *Phys. Enseñar.* 43, 144-147 (2005).
- ⁶Craig F. Bohren, "Múltiple dispersión de la luz y algunas de sus observaciones consecuencias", *enm. J. Física.* 55, 524-533 (1987).
- ⁷Thomas D. Rossing y Christopher J. Chiverina, "Carta de recursos TLC-1: Enseñar la luz y el color", *Am. J. Física.* 68, 881-887 (2000).
- ⁸Láser de diodo ajustable XY OS-8526A. PASCO Scientific, Inc., Roseville, CALIFORNIA.
- ⁹Multímetro de banco modelo 2831E, B&K Precision Corp., Yorba Linda, CA. También hemos obtenido resultados satisfactorios con un multímetro de mano.
- ¹⁰Colorante alimentario y colorante de huevo 21031-1100, McCormick & Company, Inc., Hunt Valle, MD.
- ¹¹Tinta india negra #951, Winsor y Newton, Londres.
- ¹²Craig F. Bohren y Donald R. Huffman, Absorción y dispersión de Luz de pequeñas partículas (John Wiley and Sons, Nueva York, 1983).
- ¹³B. Aernouts, R. Van Beers, R. Watte, T. Huybrechts, J. Lammertyn y W. Saeys, "Propiedades ópticas a granel visibles y del infrarrojo cercano de la leche cruda". *J. Ciencia láctea.* 98, 6727-6738 (2015).
- ¹⁴Código de Regulaciones Federales de los Estados Unidos, 21CFR131.110.