

EL ARCO IRIS. DE LA RETRORREFLEXIÓN EN UNA GOTA A SU OBSERVACIÓN EN LA NATURALEZA.

Genaro SAAVEDRA, Juan C. BARREIRO, Héctor NAVARRO, Emilio SÁNCHEZ-ORTIGA
Facultad de Física , Departamento de Óptica , Universidad de Valencia (España).

Resumen

El objetivo de esta propuesta es presentar una serie de experiencias sencillas que permitan explicar la formación del Arco Iris. Para ello, se analiza en primer lugar, a partir de los modelos geométrico y ondulatorio, la retrorreflexión en una esfera transparente con luz monocromática. Los experimentos propuestos consideran esferas de distintos tamaños y materiales (agua y vidrio), así como diferentes longitudes de onda. Posteriormente, se analiza el fenómeno de la dispersión cromática con luz blanca, empleando un matraz esférico lleno de agua. Finalmente, estudiamos la formación del Arco Iris para un colectivo de "gotas", tal y como ocurre en la Naturaleza, a partir de un panel de microesferas de vidrio.

Palabras Clave: *Arco Iris, Arcos supernumerarios, Banda de Alejandro, Dispersión cromática.*

1. Introducción

El Arco Iris es uno de los fenómenos más vistosos que se pueden contemplar en el cielo. Es conocido que, además del arco primario con su característica distribución cromática (del color rojo en su parte exterior al azul en la interior, recorriendo todo el espectro visible) es posible observar simultáneamente un segundo arco iris , conocido como Arco Iris secundario, el cuál presenta una distribución de los colores invertida respecto al primario. También se observan, aunque raramente, unos pequeños arcos en la parte inferior del arco primario y en la superior del secundario que reciben el nombre de arcos supernumerarios (veáse Fig. 2). Toda esta riqueza física justifica que el Arco Iris haya sido objeto de numerosos estudios en el pasado. A lo largo de la Historia han sido muchas las personas que han realizado estudios con el fin de comprender éste fenómeno, estando entre ellas figuras de gran relevancia como Descartes, Young o el propio Newton. Sin embargo, podemos decir que la Física del Arco Iris no es una "Física del pasado" sino que su completa descripción no ha sido llevada a cabo todavía en la actualidad.



Fig. 1. Arco Iris observado en el campus de Burjassot de la Universitat de Valencia (España).

Para la explicación de este fenómeno se han ido desarrollando diferentes modelos teóricos que tratan de dar cuenta desde los aspectos más generales hasta los detalles más finos. Sin embargo, su observación en el cielo es complicada ya que se deben cumplir unas ciertas condiciones no demasiado habituales en la práctica. Es por ello interesante proponer un conjunto de experiencias demostrativas y, en algún caso, cuantitativas que permitan a los estudiantes abordar su análisis de forma controlada en la clase o en el laboratorio.



Fig. 2. Fotografía en la que se observa la presencia de los llamados arcos supernumerarios en la parte inferior del Arco Iris primario.

En esta propuesta se analizan experimentalmente las predicciones de los modelos geométrico y ondulatorio propuestos por Descartes y Young, respectivamente. Ambos están basados en la descripción de la dispersión de luz a través de una esfera. A partir de los resultados obtenidos, se lleva a cabo una descripción del fenómeno para un cierto volumen de esferas, y se comprueban dichos resultados con una sencilla experiencia de laboratorio.

2. Introducción teórica

A continuación consideraremos los distintos modelos que se tratan a lo largo de esta propuesta y que permiten analizar en profundidad los distintos elementos que componen el Arco Iris.

2.1 Fenómeno individual

Cuando se ilumina una gota de agua con un haz luminoso se observa que existe una cierta cantidad de luz que es retrorreflejada, es decir, que se ve proyectada en sentido contrario al de incidencia sufriendo una cierta desviación. La descripción de este suceso es esencial para la comprensión completa del fenómeno del Arco Iris.

Si el haz ilumina por completo la gota, la luz retrorreflejada forma un cono cuyo vértice se encuentra sobre el eje que pasa por el centro de la gota y que es paralelo a la dirección de incidencia. Esto significa que existe simetría axial con respecto a dicho eje y que podemos limitar nuestro estudio a lo que sucede en un plano que lo contiene.

2.1.1 Modelo geométrico de Descartes

Para comprender el fenómeno del Arco Iris se debe estudiar inicialmente lo que le ocurre a la luz cuando incide sobre una única gota de agua. En este proceso consideraremos que las gotas de lluvia son idealmente esféricas. Además, el desarrollo teórico se hará para un material transparente cualquiera. Así pues, por medio de la Óptica Geométrica se estudiará a continuación la trayectoria que sigue un rayo de luz monocromática que incide desde el aire sobre una esfera de radio a , compuesta por una sustancia de índice de refracción n (véase Fig. 3).

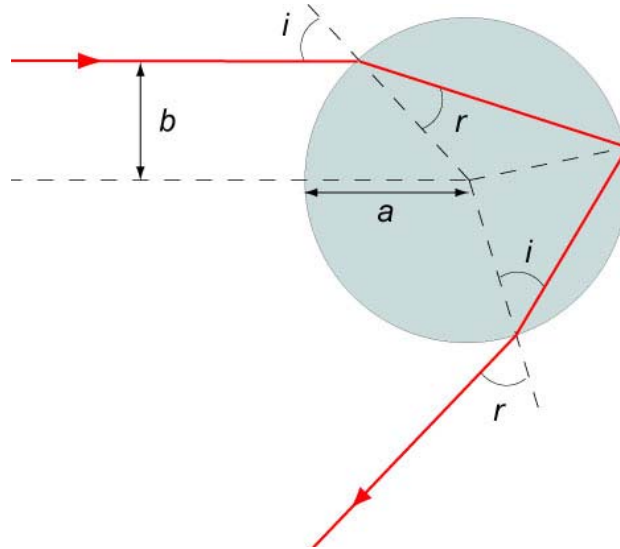


Fig. 3. Retroreflexión de un rayo de luz tras sufrir una reflexión en el interior de una esfera transparente.

Es fácil demostrar, realizando un razonamiento puramente geométrico, que la desviación que sufre el rayo respecto a la dirección de incidencia tras m reflexiones en el interior de gota es

$$\theta_m = |2(i - r) + m(\pi - 2r)|, \quad (1)$$

donde i es el ángulo de incidencia, r el ángulo de refracción entre el aire y el vidrio y el módulo implica que $\theta_m \in [0, 2\pi]$.

Pues bien, como vamos a ver, el arco primario es aquel formado por rayos que han sufrido una única reflexión en el interior de la esfera ($m=1$) mientras que el secundario se corresponde con rayos cuya desviación viene dada por dos reflexiones internas ($m=2$). Nuestro estudio se limitará a estos dos, que son los que se observan en la naturaleza pero, en general, existen arcos asociados a cada una de las infinitas reflexiones que se pueden dar en el interior de la esfera.

Es interesante expresar el ángulo de desviación θ_m en función del parámetro x , que se define como

$$x \equiv \sin i = b/a, \quad (2)$$

el cual, para una esfera de radio fijo a , depende exclusivamente del parámetro de impacto b , es decir, la altura a la que incida el rayo respecto al eje que define la dirección de incidencia de la luz y pasa por el centro de la esfera. De esta forma, haciendo uso de la ley de Snell, el ángulo θ_m de los rayos que componen el arco primario en función del parámetro x será

$$\theta_1(x) = \pi + 2 \sin^{-1} x - 4 \sin^{-1}(x/n), \quad (3)$$

donde n es el índice de refracción de la esfera.

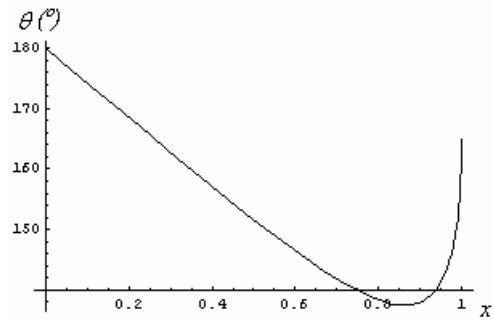


Fig. 4. Ángulo de desviación de los rayos que penetran en una esfera de índice de refracción $n=4/3$ tras sufrir una reflexión interna en función del parámetro de impacto x .

En la Fig. 4 se ha representado gráficamente la función $\theta_1(x)$. De dicha gráfica se puede extraer gran cantidad de información relevante para nuestro estudio. Como se observa, la función presenta un mínimo para un cierto valor de x , que denotaremos como x_{0min} , el cual se corresponde con un ángulo de desviación $\theta_{1,min}$.

Consideremos ahora una esfera transparente iluminada en su mitad superior por un haz monocromático colimado tal y como se muestra en la Fig. 5. La desviación que presentan los rayos que han sufrido una reflexión en el interior de la esfera irá disminuyendo según aumente la altura b con la que inciden los mismos hasta alcanzar un cierto valor a partir del cual la desviación comenzará a aumentar. Esto se traduce en una concentración de rayos en la dirección marcada por el ángulo $\theta_{1,min}$ ya que para valores del parámetro x en el entorno del mínimo los ángulos de desviación son a primer orden idénticos. La concentración de rayos se produce para un ángulo que se corresponde con el de observación del color asociado a esa longitud de onda en el Arco Iris primario. Además, para ángulos inferiores a $\theta_{1,min}$ no existe ningún rayo que haya sufrido una única reflexión en el interior de la esfera.

A partir del estudio de la función $\theta_1(x)$ es fácil obtener el valor $\theta_{1,min}$ que vendrá dado por

$$\theta_{1,min}(x_{0min}) = \pi + 2 \sin^{-1} x_{0min} - 4 \sin^{-1}(x_{0min}/n), \quad (4)$$

donde el valor del parámetro x en el mínimo es

$$x_{0min} = \sqrt{(4 - n^2)/3}. \quad (5)$$

El razonamiento que seguiremos para analizar el arco secundario empleando el modelo geométrico de Descartes es análogo al que hemos realizado con el primario. En este caso, el ángulo de desviación que poseen los rayos tras sufrir dos reflexiones internas (es decir, con $m=2$) vendrá dado por la expresión

$$\theta_2 = |2(i - r) + 2(\pi - 2r)|, \quad (6)$$

que escribiéndola en función del parámetro x queda como

$$\theta_2(x) = |2\pi + 2 \sin^{-1} x - 6 \sin^{-1}(x/n)|. \quad (7)$$

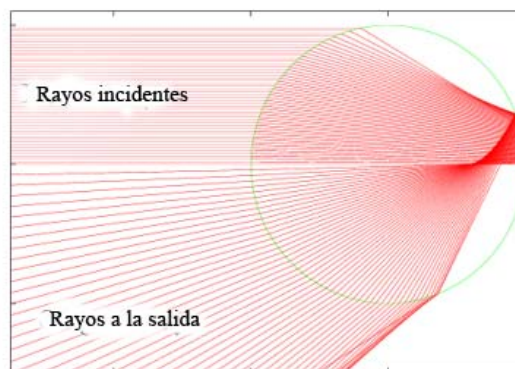


Fig. 5. Esquema que muestra la concentración de rayos en un determinado ángulo (θ_0) para una sola reflexión interna y una determinada longitud de onda.

Si ahora representamos gráficamente $\theta_2(x)$ (veáse Fig. 6) observamos que la función presenta una disposición invertida con respecto a $\theta_1(x)$ y que, por tanto, posee un extremo que en este caso será un máximo.

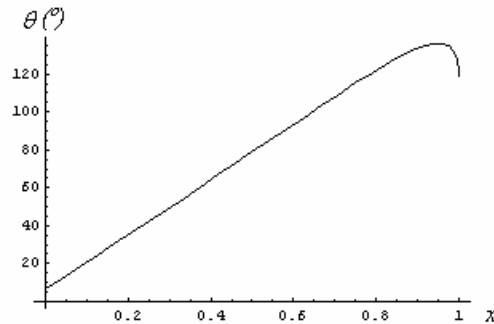


Fig. 6. Ángulo de desviación de los rayos que penetran en una esfera tras sufrir dos reflexiones internas en función del parámetro de impacto para una gota de agua.

Razonando de manera idéntica que en el caso del arco primario concluimos lo siguiente: Si una esfera transparente se ilumina, por ejemplo en su mitad inferior (ver Fig. 7), la desviación que presentan los rayos que han sufrido dos reflexiones en el interior de la esfera con respecto a la dirección de incidencia aumentará conforme aumente la altura b con la que inciden los mismos hasta alcanzar un cierto valor máximo $\theta_{2,max}$, a partir del cual comenzará a disminuir.

Realizando el análisis de la función obtenemos los valores de θ_2 y de x correspondientes a dicho máximo

$$\theta_{2,max}(x_{0,max}) = \left| 2\pi + 2 \sin^{-1} x_{0,max} - 6 \sin^{-1} (x_{0,max}/n) \right| \quad (8)$$

siendo para este caso el valor del parámetro x en el máximo de la función igual a

$$x_{0,max} = \sqrt{(9 - n^2)/8} . \quad (9)$$

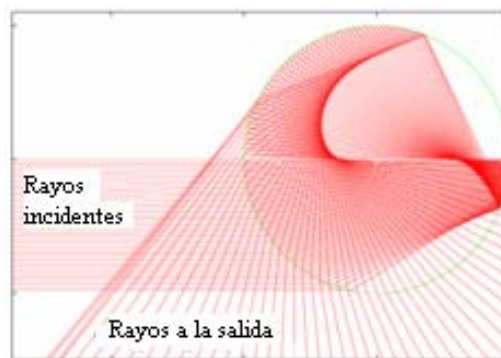


Fig. 7. Esquema que muestra la concentración de rayos en un determinado ángulo (θ_0) para dos reflexiones en el interior de la esfera y una determinada longitud de onda.

2.1.2 Dispersión cromática

En el apartado anterior hemos estudiado la forma en que una esfera transparente desvía los rayos provenientes de un haz colimado monocromático. A continuación, veremos lo que sucede cuando dicho haz proviene de una fuente de luz blanca. En las expresiones (5) y (9) se observa que los ángulos de desviación mínima tanto en el arco primario como en el secundario dependen exclusivamente del índice de refracción del material que forma la esfera. Dado que el

índice de refracción es función de la longitud de onda, al iluminar la esfera con luz blanca, el ángulo de desviación mínima para cada longitud de onda será distinto y por tanto lo será también el ángulo para el cual se produce una concentración de luz asociada a dicha longitud de onda. Los colores del Arco Iris son por tanto consecuencia de la variación del índice de refracción del agua con la longitud de onda de la luz. En la Fig. 8 se ha representado $\theta = \theta(x)$ para $m=1$ y $m=2$ en el caso del agua para distintas longitudes de onda del espectro visible. Como puede observarse, existe un intervalo entre 129° y 138° en el cual no hay luz retrorreflejada. El resultado es un espacio oscuro entre los arco iris primario y secundario conocido como la banda oscura de Alejandro. Se comprueba además a partir de la gráfica que la disposición de colores del arco secundario es inversa respecto a la del primario.

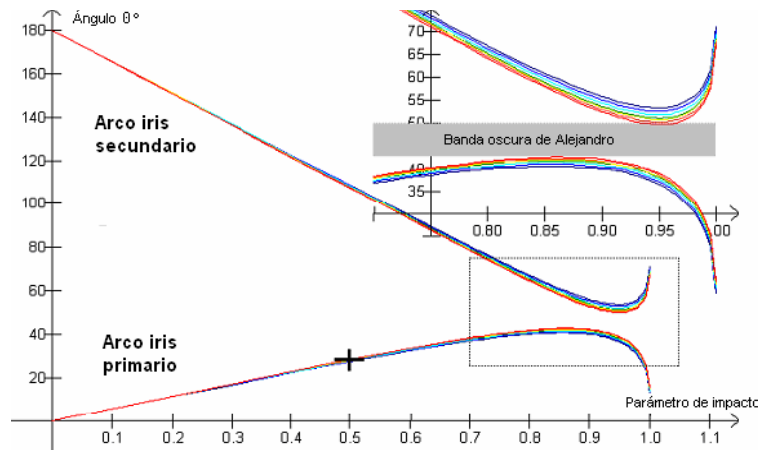


Fig. 8. Representación gráfica de las funciones $\theta_1(x)$ y $\theta_2(x)$ en el caso del agua para distintas longitudes de onda del espectro visible.

2.1.3 Modelo ondulatorio de Young

En los desarrollos anteriores para los cuales se ha empleado un modelo geométrico no se tiene en cuenta la naturaleza ondulatoria de la luz. El modelo ondulatorio de Young para el Arco Iris, el cual es fácil de introducir considerando las variaciones de camino óptico de los frentes de onda en función del ángulo de dispersión, predice la aparición de una serie de máximos y mínimos interferenciales. Dichas interferencias son conocidas como arcos supernumerarios. La posición angular de los máximos de interferencia con respecto al ángulo de desviación mínima para el arco primario vienen dadas por

$$\theta_N - \theta_{1,\min} = \frac{1}{2} \left(\frac{d^2\theta}{dx^2} \Big|_{x_0} \right)^{1/3} \left[\frac{3\pi(2N + 3/4)}{2ka} \right]^{2/3}, \quad (10)$$

donde N es el orden del máximo, θ_N el ángulo de desviación respecto de la dirección de incidencia para el cual aparece el máximo de orden N , $k = 2\pi/\lambda$ es el número de ondas y a es el radio de la esfera.

2.2 Fenómeno colectivo

A partir del análisis individual llevado a cabo podemos determinar como se forma el Arco Iris para un volumen de esferas y cuales son las condiciones para su observación en la Naturaleza. Dado que tanto el arco primario como el secundario se producen por retrorreflexión de la luz en las gotas de agua, para poder visualizar el Arco Iris es necesario que el observador se sitúe con el Sol a las espaldas, sin estar éste tapado por las nubes, y mire hacia una zona de lluvia. Debido a la simetría axial existente entorno al eje que une los ojos del observador y el Sol (veáse Fig. 9) es posible estudiar el fenómeno en un plano que contenga a ambos y posteriormente realizar una rotación entorno al eje para interpretar el fenómeno en su plenitud. A partir de estas premisas, podemos afirmar que si el observador mira hacia una gota cuya posición angular (con respecto al eje de simetría tomando los ojos del observador como vértice) se

corresponde con el ángulo de desviación mínima para una determinada longitud de onda, éste verá la gota iluminada con el color correspondiente a dicha longitud de onda. Igualmente, todas las gotas que formen el mismo ángulo con respecto al observador se verán iluminadas con un color idéntico. Como el ángulo de desviación mínima varía para cada longitud de onda, si el observador posee una visión completa del volumen de gotas verá una cierta zona del cielo en la cual las gotas aparecen iluminadas con los distintos colores del espectro visible (ver Fig. 10).

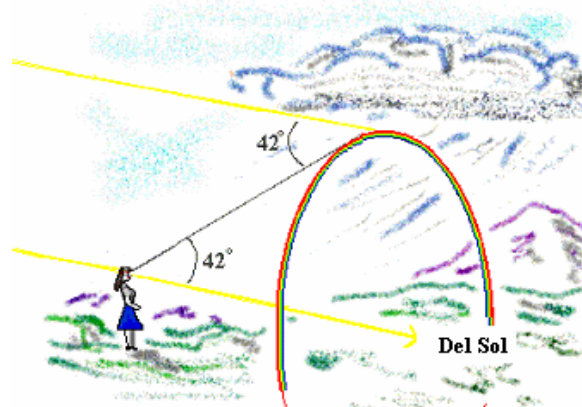


Fig. 9. Representación de la observación del Arco Iris en el que se aprecia la simetría revolución de éste con respecto al eje que une el Sol con los ojos del observador.

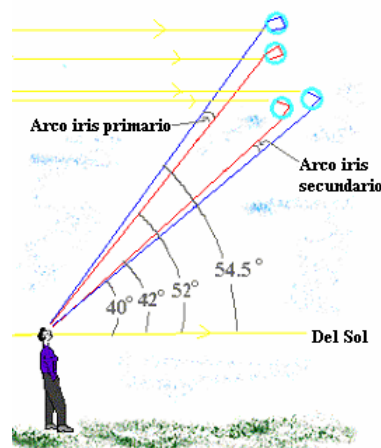


Fig. 10. Dibujo en el que se representan las posiciones de distintas gotas en las que el observador recibiría la luz correspondiente a los ángulos de desviación mínima para distintas longitudes de onda en el caso del Arco Iris primario.

3. Propuestas experimentales

A continuación se realizará la descripción de los montajes experimentales propuestos para la comprobación de los distintos fenómenos descritos en la sección anterior.

3.1 Fenómeno individual

3.1.1 Medida del ángulo de desviación mínima para los arcos primario y secundario y de la posición de los máximos supernumerarios en el caso del arco primario

El montaje que se propone para la realización de las distintas medidas correspondientes a una única esfera iluminada con una determinada longitud de onda se muestra en la Fig. 11. Éste consta de un banco óptico de 100 cm de longitud sobre el cual se sitúan los distintos componentes montados en deslizadores. Para comprobar la dependencia del ángulo de desviación mínima tanto con la longitud de onda como con el material del que está compuesta la esfera se propone emplear dos láseres de distinta longitud de onda y realizar las medidas para esferas de distintos materiales, en este caso, agua y vidrio tipo BK-7. Del mismo modo, se puede comprobar que dicho ángulo es independiente del radio de la esfera utilizando para ello esferas de distintos

tamaños. Este montaje nos permitirá también realizar medidas de la posición de los arcos supernumerarios y demostrar su dependencia con la longitud de onda, el radio de la esfera y el material del que este compuesto la misma.



Fig. 11. Montaje experimental para realizar medidas de los ángulos de desviación de un haz de luz monocromático a través de gotas de agua y de esferas de vidrio.

El sistema de iluminación consta de un láser con un expansor de haz, formado por dos lentes convergentes de distancias focales 5 mm y 150 mm, que permite la obtención de un haz colimado de extensión suficiente como para iluminar por completo esferas de distintos tamaños. Asimismo, tras el expansor de haz se coloca un diafragma mediante el cual se consigue ajustar de forma precisa el diámetro del haz y la zona de la esfera que se desea iluminar. De esta forma, se eliminan órdenes de reflexión que no son de interés a la hora de realizar medidas.

Para medir los distintos ángulos de desviación se emplea un espectrogoniómetro al cual se le han realizado una serie de modificaciones, que cuales permiten, entre otras cosas, colocar las esferas de vidrio BK-7 y suspender gotas de agua en el centro del aparato de tal manera que se encuentren correctamente alineados con el haz proveniente del láser. Con el fin de realizar este último proceso, se dispone de una jeringa con una aguja de un grosor tal que es posible suspender de ella gotas de agua y que éstas mantengan una forma aproximadamente esférica. Por otra parte, a uno de los lados del espectrogoniómetro y montado sobre un banco óptico de 50 cm de longitud, se incorpora un microscopio con desplazamiento micrométrico en la dirección transversal, lo cual permite realizar medidas del radio de las distintas esferas. A pesar de que el radio de las esferas de vidrio es conocido, este microscopio es especialmente importante a la hora de realizar la experiencia con gotas de agua. Además, en el brazo del telescopio del espectrogoniómetro y en el microscopio se incorporan sendas cámaras CCD conectadas a diferentes canales de un monitor de TV que facilitan la toma de medidas tanto de los ángulos de desviación como del tamaño de las gotas.

Una vez iluminada correctamente, según el caso, la esfera de vidrio o la gota de agua, se hace un barrido angular a un lado y otro del haz láser con el brazo del telescopio del espectrogoniómetro. De esta forma se observarán dos zonas iluminadas con presencia de máximos y mínimos interferenciales separadas por una zona de completa oscuridad (banda de Alejandro) (ver Fig. 12).

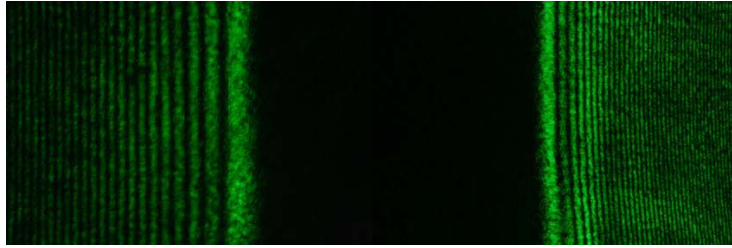


Fig. 12. Fotografía de la retroreflexión de luz de una gota iluminada con el láser verde ($\lambda = 532\text{nm}$). Se observan, de izquierda a derecha, la zona del primario, la banda de Alejandro y la zona del secundario. También aparecen los máximos y mínimos de interferencia correspondientes a los arcos supernumerarios.

Recordemos que la luz retroreflejada por una esfera se distribuye en un cono. Con el fin de aumentar la precisión en las medidas, éstas se harán en un corte transversal del cono a izquierda y derecha respecto a la dirección de incidencia del haz láser. El ángulo de desviación mínima corresponde a aquella posición a partir de la cual comienza a haber luz retroreflejada y coincide con el máximo interferencial de orden cero. Se medirán asimismo la posición angular de los distintos máximos y mínimos interferenciales del arco primario para las esferas de vidrio y agua.

3.1.2 Comprobación de la dispersión cromática por medio de una esfera iluminada con luz blanca

En este apartado se pretende mostrar cómo se produce la dispersión cromática por retroreflexión a través de una única esfera iluminada con luz blanca. Para ello se propone el montaje de la Fig. 13. En él se dispone de un matraz esférico lleno de agua montado sobre un banco óptico. La iluminación proviene de un proyector que proporciona un haz colimado de luz blanca el cual se hace pasar a través de una cartulina perforada de forma que se ilumine el matraz por completo y que el cono de luz retroreflejado se proyecte sobre la cartulina. De esta forma, sobre la cartulina se observa un arco (excepto en las zonas superior e inferior debido a la no esfericidad del matraz) con una distribución de colores correspondiente al arco primario. La cartulina dispone de un papel milimetrado que nos permite la medida del radio del arco para un color determinado.

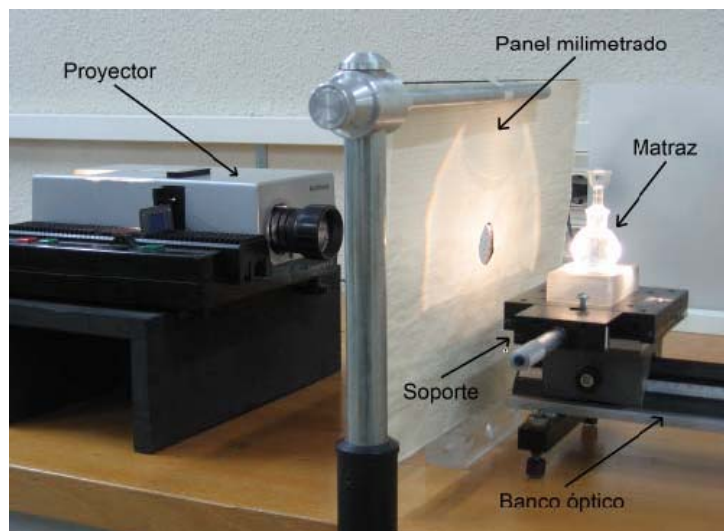


Fig. 13. Montaje experimental para el estudio de la retroreflexión de luz blanca por una única esfera.

Si en este montaje queremos realizar medidas del ángulo de desviación mínima para un determinado color debemos determinar la posición respecto a la cartulina del vértice del cono de luz retroreflejada. El hecho de montar el matraz sobre un banco óptico se debe a que dicho punto es virtual y a que, por tanto, no tenemos acceso físico a él (ver Fig. 14). Sin embargo, si rea-

lizamos un ajuste lineal de los radios de los arcos medidos para distintas posiciones del matraz sobre el banco óptico se puede obtener el ángulo de desviación mínima a partir de la pendiente.

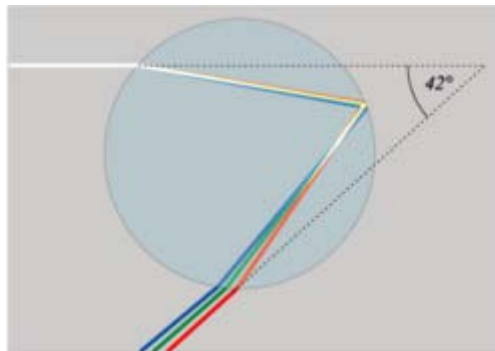


Fig. 14 Representación en la que se observa la posición del foco virtual del que proviene el cono de luz retrorreflejada.

3.2 Fenómeno colectivo

Para simular la observación del Arco Iris se ha preparado un panel de fieltro mate con microesferas de vidrio adheridas con pegamento en aerosol, de modo que emulan una cortina de "gotas". Es de gran importancia seleccionar un fondo mate sobre el que se depositan las microesferas debido a que el contraste con el que vemos el arco iris depende de varios factores:

a) La diferencia de índices aire-vidrio es mayor que la diferencia de índices aire-agua, por lo que la cantidad de luz que por reflexión directa llega al observador es mayor que con el agua. Debe existir por tanto un equilibrio a la hora de decidir la densidad de microesferas que se deposita en la tela, ya que a mayor densidad de microesferas, mayor es la luz retrorreflejada y mayor es la intensidad de los colores del arco iris, pero a su vez la luz que por reflexión directa las microesferas lanzan hacia el observador aumenta y por tanto, disminuye el contraste.

b) En la naturaleza, la cortina de agua en la que se produce la retrorreflexión tiene un espesor bastante grande. Todas las gotas que se encuentren en la línea de visión a cuyo ángulo corresponda el ángulo de desviación mínima para una determinada longitud de onda, se verán brillar con el color asociado a dicha longitud de onda. En el experimento tan sólo disponemos de un espesor muy limitado debido a que sólo contribuye la capa de esferas que queda adherida en la tela.

El panel se coloca lo más alejado posible del proyector de manera que los rayos de luz que inciden sobre la superficie se pueden considerar paralelos. En el panel se observa un Arco Iris completo formado por el conjunto de microesferas. Debido a que el índice de refracción del vidrio es mayor que el del agua, el tamaño angular del arco iris será menor que el observado en la naturaleza. Se puede medir el ángulo en el que aparece dicho arco iris respecto al observador si se mide la anchura del arco sobre el panel y la distancia a la que está situado el observador del mismo. Para ello disponemos de una mentonera en la que el observador sitúa la cabeza fijando la posición de observación. Fijada la distancia a la que se coloca la mentonera de la cortina, el observador indica a una segunda persona la posición en la que está visualizando el arco iris sobre el panel. Midiendo la distancia d entre la mentonera y la pared y el diámetro del arco completo se puede obtener experimentalmente el ángulo en el que aparece el Arco Iris.

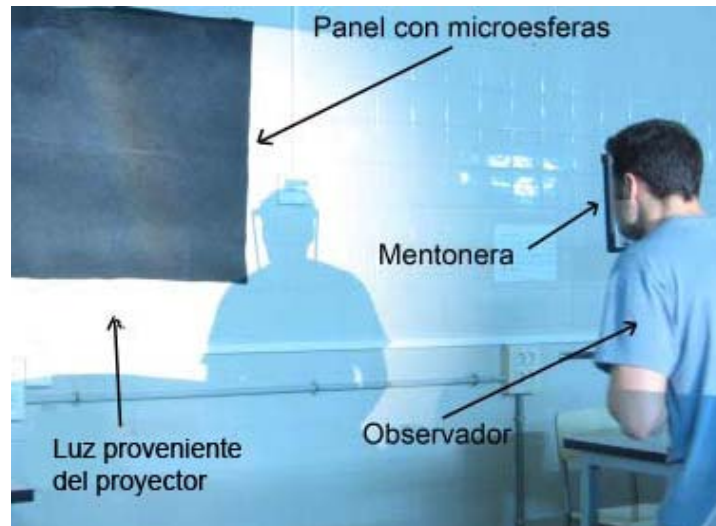


Fig. 15. Montaje empleado para la demostrar la formación de un Arco Iris con un conjunto de esferas de vidrio.

4. Resultados

A continuación se presentarán distintos ejemplos de los resultados típicos obtenidos a lo largo de esta propuesta.

4.1 Fenómeno individual

4.1.1 Medida del ángulo de desviación mínima para el arco primario y el secundario y de la posición de los máximos supernumerarios para el primario

Tabla 1. Ángulos de desviación mínima del arco primario y el secundario obtenidos para el láser verde ($\lambda=532\text{nm}$) y el láser rojo ($\lambda=632,8\text{nm}$), para gotas de agua de distintos radios (r).

Láser verde			Láser rojo		
$r(\text{mm}) \pm 0,0007$	$\theta_{1\text{min}} (^{\circ}) \pm 0,14$	$\theta_{2\text{max}} (^{\circ}) \pm 0,14$	$r(\text{mm}) \pm 0,0007$	$\theta_{1\text{min}} (^{\circ}) \pm 0,14$	$\theta_{2\text{max}} (^{\circ}) \pm 0,14$
1,2353	138,2	128,733	1,28825	137,683	129,616
1,25625	138,166	128,75	1,20275	137,6	129,55
1,22125	138,1	128,75	1,24225	137,7	129,6

Tabla 2. Valores experimentales obtenidos para los ángulos de desviación mínima de los arcos primario y secundario y valor teórico predicho por el modelo geométrico para el caso de gotas de agua.

Láser verde		Láser rojo	
$\theta_{1\text{min}} (^{\circ})$	$\theta_{1\text{min}} \text{teórico.} (^{\circ})$	$\theta_{1\text{min}} (^{\circ})$	$\theta_{1\text{min}} \text{teórico.} (^{\circ})$
$138,16 \pm 0,14$	$138,21 \pm 0,09$	$137,66 \pm 0,14$	$137,737 \pm 0,007$
Láser verde		Láser rojo	
$\theta_{2\text{max}} (^{\circ})$	$\theta_{2\text{max}} \text{teórico.} (^{\circ})$	$\theta_{2\text{max}} (^{\circ})$	$\theta_{2\text{max}} \text{teórico.} (^{\circ})$
$128,74 \pm 0,14$	$128,59 \pm 0,12$	$129,60 \pm 0,14$	$129,443 \pm 0,009$

Tabla 3. Medida de la posición de los máximos supernumerarios del arco primario en el caso de una esfera de vidrio de 2mm de radio iluminada con el láser verde (533nm).

Máximos	1°	2°	3°	4°	5°	6°
$\theta_{N \text{ experimental}} \pm 0,14(^{\circ})$	158,53	158,75	158,97	159,05	159,17	159,25
$\theta_{N \text{ teórico}} \pm 0,004(^{\circ})$	158,605	158,816	158,969	159,101	159,220	159,330

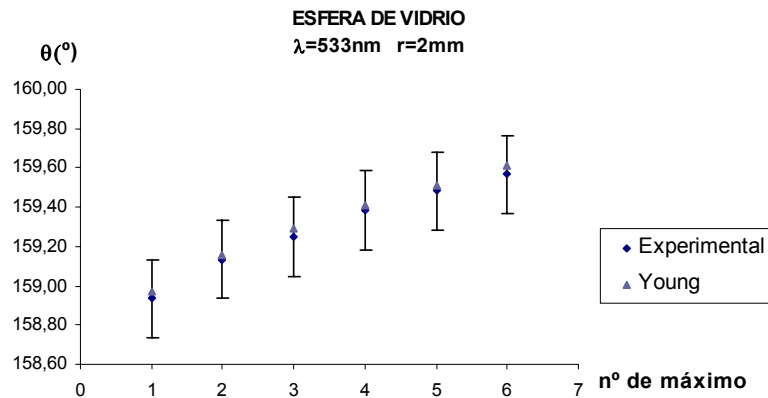


Fig. 16. Representación gráfica de los valores de la tabla 3 en la que se muestra la concordancia entre el valor experimental y el predicho por el modelo de Young.

4.1.2 Comprobación de la dispersión cromática a través de una esfera iluminada con luz blanca.

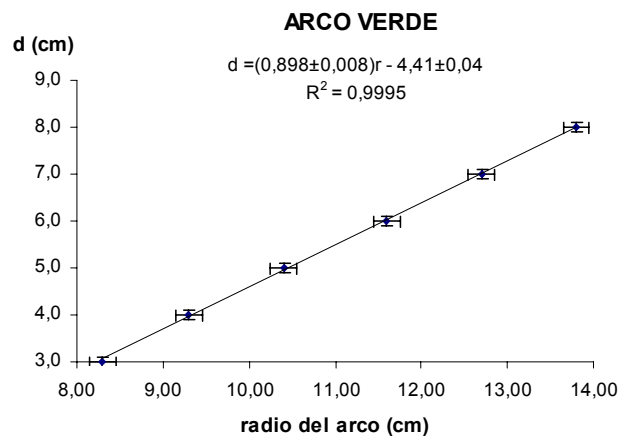


Fig. 17. Ajuste realizado para la obtención del ángulo de desviación mínima del arco primario para el color verde en el caso de una esfera iluminada con luz blanca.

Tabla 4. Resultados obtenidos a partir del ajuste para el caso de color rojo y el verde y valor teórico predicho por el modelo geométrico de Descartes.

	$\theta_{1\text{min}} (^{\circ})$	$\theta_{1\text{min teóric}} (^{\circ})$
Verde ($\lambda=533\text{nm}$)	$138,0 \pm 0,3$	$138,21 \pm 0,09$
Rojo ($\lambda=632,8\text{nm}$)	$137,8 \pm 0,5$	$137,737 \pm 0,007$

4.2 Fenómeno colectivo

Tabla 5. Comparación de las medias de los ángulos de desviación del rojo del arco iris primario observado en el panel de microesferas frente al valor teórico del ángulo de desviación mínima para la longitud de onda del láser rojo (632,8 nm).

$\theta_{1\text{min}} (^{\circ})$	$\theta_{1\text{min}} \text{teórico} (^{\circ})$
157,2±0,2	157,158

5. Conclusiones

En esta comunicación, hemos demostrado la posibilidad de estudiar de forma controlada la formación del Arco Iris. Las propuestas aquí presentadas pueden ser adaptadas a diferentes niveles universitarios dependiendo de la profundidad con la que se desee estudiar el fenómeno. El modelo geométrico de Descartes, con un tratamiento matemático muy sencillo nos ha permitido comprender los aspectos más relevantes de la formación del Arco Iris, mientras que el modelo de Young, teniendo en cuenta el carácter ondulatorio de la luz, permite profundizar en su descripción. Para las comprobaciones experimentales se ha hecho uso de materiales presentes en la mayoría de los laboratorios de óptica o fáciles de conseguir, por lo que de una forma sencilla y económica es posible reproducir las experiencias aquí presentadas.

6. Referencias

- [1] JACKSON, J.D. "From Alexander to Young and Airy". *Physics Reports*. Vol. 320, 1999, pp. 27-36.
- [2] VAN DE HULST, H.C. *Light Scattering by Small Particles*. New York: Courier Dover, 1981.
- [3] MOYSÉS NUSSENZVEIG, H. "Teoría del Arco Iris". Col. *Temas (Investigación y Ciencia)*. Vol. 6.
- [4] CRAWFORD, F.S. "Rainbow dust," *Am. J. Phys.* Vol. 56, 1988, pp. 1006–1009.
- [5] LEE, R.L. "The Rainbow Bridge," http://www.usna.edu/Users/oceano/raylee/RainbowBridge/Chapter_8.html
- [6] T. ARNY, "Rainbow Demonstration," <http://www.unidata.ucar.edu/staff/blynds/RnbwEx.html>