

ESTE ES EL AÑO DE LA LUZ Y EL ARCO IRIS ES LUZ.

José Antonio Martínez Pons

I.E.S. Las Lagunas Rivas Vaciamadrid

Resumen: Con ser un fenómeno de la naturaleza de sobra conocido, el arco iris tiene una explicación compleja a la que se puede llegar por aproximaciones sucesivas y que no suele encontrarse en los libros de Física elemental. En este trabajo, pensado como apoyo del profesor no especialista, se hace un recorrido histórico de las sucesivas explicaciones del fenómeno se proponen algunas pautas de trabajo que faciliten la comprensión de sus aspectos físico y geométrico y el aprovechamiento didáctico del mismo.

Utilizando la hoja de cálculo se reproducen los cálculos de Descartes

“Ved aquí la señal del pacto que establezco entre mí y vosotros (...):pongo mi arco en las nubes para señal de mi pacto con la tierra (...). Estará el arco en las nubes y yo lo veré para acordarme de mi pacto eterno entre Dios y toda alma viviente y toda carne que hay en la tierra.” (Génesis VIII, 12-16).



INTRODUCCIÓN

Interesarse por la “Física” en abstracto, empieza por asombrarse ante por los fenómenos del mundo que nos rodea, y tratar de dar una explicación racional y coherente.

El arco iris ha asombrado desde antiguo al ser humano hasta el extremo de llegar a considerarlo como la “firma de Dios”, según se lee en el Génesis.

Si cuando enseñamos Física tratamos de despertar en nuestros estudiantes esta curiosidad y potenciarla hasta donde sea posible, no hay duda de que este hermoso fenómeno puede ser un punto de apoyo para profundas reflexiones, tantas que su completa explicación no se ha completado hasta hace pocos años, pero a ésta se puede llegar por pasos sucesivos.

En las líneas que siguen se trata de resumir los que según muchos autores es todo un tratado de física, sacando el máximo partido didáctico posible a este hermoso y singular fenómeno.

El trabajo se expone a un nivel medio a fin de darle su máxima utilidad a profesores de EE MM o de primeros años de carrera de ciencias y pretende recordar o incluso, dar una primera explicación al docente no especialista, el autor tampoco lo es, y proporcionarle algunas pautas de trabajo en clase.

Lo ideal es partir de la observación directa del arco iris, pero, como es evidente, esto no es posible cuando a uno le apetece, sino que cuando ocurre. Una buena forma es disponer de una serie de fotografías o diapositivas.

Hoy gracias a la fotografía digital de buena resolución es posible cuando se tiene la oportunidad hacer varias fotografías y seleccionar las mejores (Las del autor que acompañan el trabajo son analógicas.)



PRIMERAS OBSERVACIONES

El estudio del problema requiere una observación inicial, que puede guiarse con un serie de preguntas como

- ¿Cuántos arcos hay?
- ¿Qué colores y en qué orden aparecen en el arco iris?
- En caso de haber más de uno, ¿Cuál es su posición relativa: son concéntricos o se cruzan? ¿Aparecen los colores en el mismo orden?
- Si aparecen dos arcos concéntricos, ¿Cómo es el color de cielo en la región intermedia?

- Cuando aparece un solo arco, ¿qué color tiene el cielo de fondo en sus proximidades?.
- Si se mueve la cabeza, ¿Se mueve el arco con ella?
- ¿Cuál es la posición relativa entre el sol y el arco?.
- ¿Dónde empieza y donde termina?¹
- ¿Son siempre coloreados?.

Responder con precisión a estas cuestiones no es sencillo y requiere siempre una observación minuciosa del fenómeno, o mejor dicho de un serie de fenómenos en diferentes situaciones, lo que de por si ya es muy formativo.

Lo normal es que no aparezca más que un solo arco, sin embargo en algunos casos se dan dos arcos el más “bajo” sobre el horizonte algo más intenso que el más alto con una zona intermedia más oscura. Al arco más intenso se le suele llamar primario, mientras que al otro se le llama secundario. La zona oscura es la llamada “zona de Alejandro”, en honor a Alejandro de Afrodias (s. II d.J.C.) filósofo griego que fue el primero en describirlo. Esta zona oscura aparece más difusa aunque no exista el arco secundario.

Las observaciones pueden hacerse algo más cuantitativas si se dispone de algún instrumento destinado a medir la altura de los objetos estelares. Con él puede medirse la altura del arco iris, medida por primera vez por Roger Bacon, 1266. El arco primario se encuentra a una altura de unos 42° mientras que el secundario está a unos 50°, siempre con la horizontal como referencia. Entre ambos existe pues una separación de unos 8 °. Nosotros en siete observaciones diferentes y para el arco principal, apuntando a la banda violeta con un instrumento descrito hemos obtenido en promedio $41,6 \pm 1,6$, Tabla 1

El arco secundario, en condiciones de observación sólo lo hemos visto 3 veces, obteniendo resultados de 51°, 49 ° y 48°

Para el cálculo y gráficos se ha utilizado la Hoja de Calculo Excel, entre otras razones, debido a su amplia difusión, sencillez de uso y potencia operativa. Para el nivel hasta el que se ha llegado en este trabajo, es suficiente.

Tabla 1

Observación	Medida/(°)
1	42
2	44
3	40
4	42
5	41
6	43
7	39
Media	41,6
Desviación	1,6

Es de observar que la distribución de en el arco primario presenta el rojo en el lado más alto, mientras que el violeta está en el más bajo, en el secundario ocurre exactamente a la inversa, es decir, el violeta está en la posición más alta y el, rojo en la más baja, lado oscuro , además en el lado violeta del arco primario aparecen algunos arcos violeta-azul más o menos difusos, son los llamados arcos supernumerarios.(Fotografía 3)

Algunos autores han descrito “arcos blancos” Nosotros no los hemos observado nunca..

Más detalles observacionales.

Los arcos siempre se observan en dirección opuesta al Sol y en una posición fija para el observador respecto al sol.

¹ Para responder a esta cuestión puede ser necesaria una diapositiva de un arco iris sobre el mar.

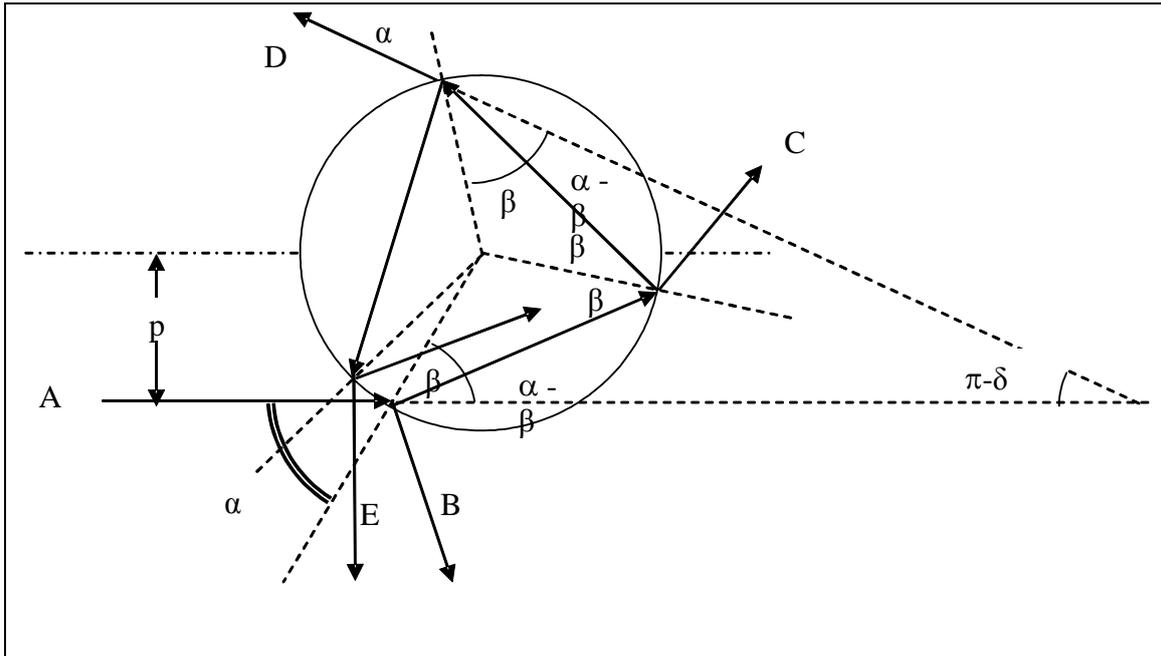


Figura 1: Marcha de los rayos en una gota de agua

Sobre el mar o sobre las aguas en general se reflejan.

1ª APROXIMACIÓN

Intentar dar una explicación racional del arco iris y sus propiedades viene de antiguo. Según Aristóteles el arco iris se debería a una especial reflexión de la luz en las nubes, según un ángulo fijo, lo que debería producir un arco, un cono circular de rayos de arco, que entonces no era un objeto, propiamente dicho, sino una serie de direcciones privilegiadas de reflexión de la luz hacia el observador. En 1301 Teodorico de Freiberg, expuso que el arco iris podía formarse con una sola gota de agua y lo verificó con un frasco esférico lleno de agua, que venía a ser una gran gota. También el obispo de Spalato Antonio de Dominis, dio alguna explicación en esta línea. René Descartes, ignorando los trabajos de Teodorico, postuló la misma explicación, mostrando que el arco iris se produce gracias a los rayos que sufren una reflexión interna en la gota, mientras que arco secundario sufre dos reflexiones, siendo el ángulo de salida de los distintos colores diferentes, de modo que si se observa en una sola dirección sólo se ve un color., por lo que concluyó que los distintos colores procedían de gotas diferentes.

Un primer nivel de explicación es precisamente el propuesto por Descartes, que es posible actualizar, gracias a los medios de que hoy se dispone.

Cuando los rayos solares alcanzan la superficie de una gota de agua en parte se reflejan y en parte se refractan, es decir penetran en el interior de la gota donde a su vez sufren nuevas reflexiones y refracciones, esquemáticamente

Un rayo incidente A, cuya distancia al diámetro en la dirección del Sol recibe el nombre de parámetro de impacto, p, incide sobre la gota. Parte de él se refleja, rayo B y parte se refracta, siguiendo las leyes de Snell. Para la refracción $\sin \alpha = n \sin \beta$, siendo como es sabido α y β los respectivos ángulos de incidencia y refracción y n el índice de refracción del agua, aproximadamente 1,33. (El del aire se toma como

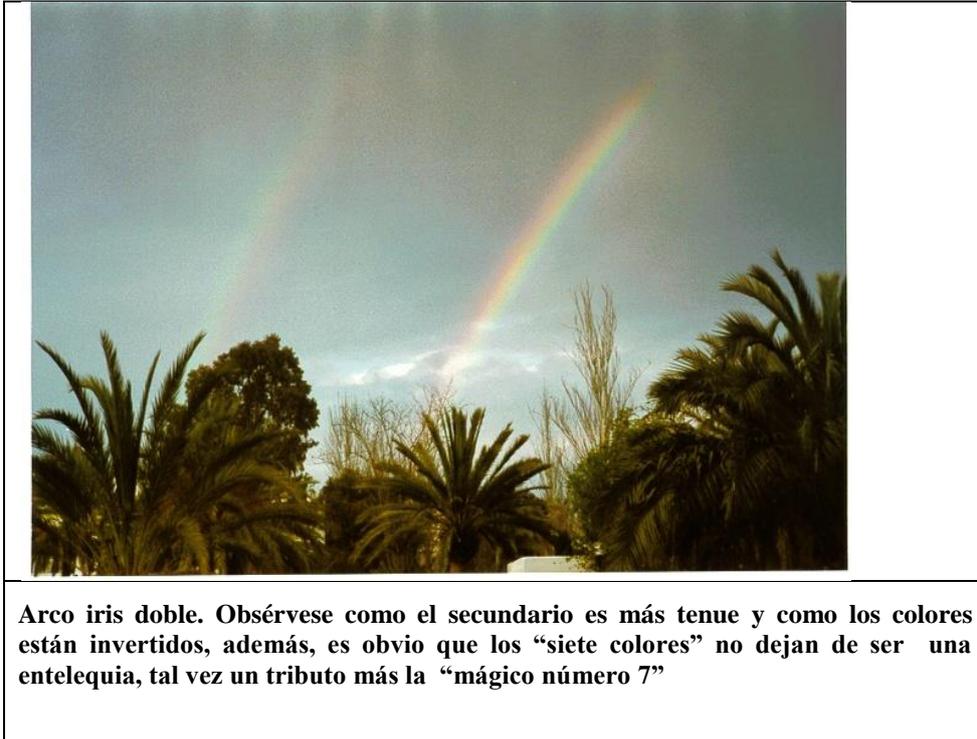
aproximadamente igual a 1) El rayo refractado incide sobre la cara correspondiente de la gota, parte se refracta y emerge de la gota y parte se vuelve a reflejar. Simples consideraciones geométricas y la aplicación de las leyes de Snell a la reflexión permiten establecer la igualdad de los ángulos marcados y en consecuencia del ángulo con el que emerge el rayo C, que se verá más adelante que es el responsable de la formación del arco primario, con el incidente, siempre en valor absoluto. Como consecuencia el ángulo de desviación δ vale $\delta = 180 - (360 - (2(\alpha - \beta) - (360 - 2\beta))) = 180 - (4\beta - 2\alpha)$.

Descartes calculó pacientemente las desviaciones de los rayos C en función del parámetro de impacto encontrando que presenta un mínimo para valor aproximado de $7r/8$, siendo r el radio de la gota. Hoy es posible remedar los cálculos de Descartes en unos minutos utilizando una hoja de cálculo, en la que se programa una serie de valores del parámetro p y se obtienen los correspondientes valores de α y β

Tabla 2

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I
parametro	alfa/rad	beta/rad	delta/rad	n	alfa grado	beta grado	delta	d min	
0	0	0	0	1,33	0	0	180	137,485219	
0,02	0,02000133	0,01503816	0,02014998		1,145992	0,86162314	178,845491		Parametro
0,04	0,04001067	0,03007972	0,04029755		2,29244278	1,72344122	177,691121		0,86
0,06	0,06003606	0,0451281	0,06044027		3,43981277	2,58664955	176,537027		
0,08	0,08008558	0,06018671	0,08057567		4,58856574	3,44844426	175,383354		
0,1	0,10016742	0,07525899	0,10070113		5,73917048	4,31202268	174,23025		
0,12	0,12028988	0,09034843	0,12081396		6,89210258	5,17658375	173,07787		
0,14	0,14046141	0,10545853	0,14091127		8,04784625	6,04232842	171,926379		
0,16	0,16069065	0,12059283	0,16099001		9,20689622	6,90946014	170,776952		
0,18	0,18098645	0,13575494	0,18104687		10,3697598	7,77818524	169,626779		
0,2	0,20135792	0,15094853	0,20107826		11,536959	8,64871344	168,479064		
0,22	0,22181447	0,16617731	0,22108029		12,709033	9,52125833	167,333033		
0,24	0,24236585	0,18144509	0,24104865		13,8865404	10,3960378	166,188929		
0,26	0,2630222	0,19675576	0,26097864		15,0700621	11,2732748	165,047025		
0,28	0,28379411	0,21211331	0,28086502		16,2602047	12,1531975	163,90762		
0,3	0,30469265	0,22752182	0,30070199		17,4576031	13,0360403	162,771045		
0,32	0,32572949	0,24298551	0,32048307		18,6629249	13,920443	161,637673		
0,34	0,3469169	0,25850871	0,34020104		19,8768741	14,811458	160,507916		
0,36	0,36826789	0,27409589	0,35984779		21,100196	15,7045379	159,38224		
0,38	0,3897963	0,2897517	0,37941421		22,3336827	16,6015496	158,261167		
0,4	0,41151685	0,30548094	0,39889005		23,5781785	17,5027683	157,145284		
0,42	0,43344532	0,32128859	0,41826372		24,8345875	18,4084802	156,035254		
0,44	0,45559667	0,33717986	0,43752209		26,1038811	19,3189828	154,931831		

En el gráfico se representa la evolución de los valores de α , β y δ observándose el mínimo que corresponde a un valor del parámetro de 0,86, con un ángulo de desviación de $138,5^\circ$ es decir, totalmente coincidente con el hallado por Descartes.



ARCO IRIS 1

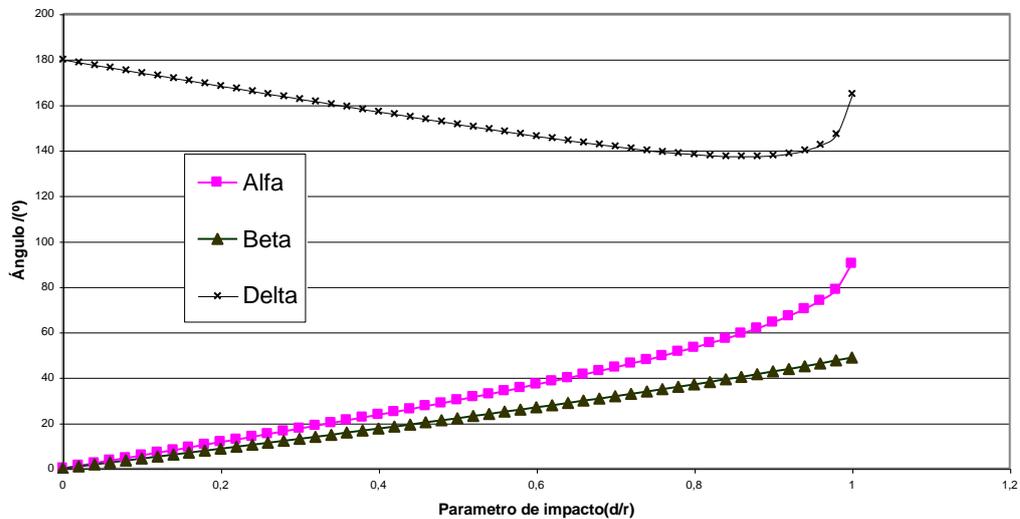


Figura 2.- Representación de los ángulos incidente, refractado y de desviación en función del parámetro de impacto

Jugando una vez más con la hoja de cálculo se puede observar como si el índice de refracción varía ligeramente, como realmente ocurre con la “luz blanca”² la desviación

² Realmente, como es bien sabido, la luz solar no es blanca estrictamente ya que el foco emisor es la corona solar que se puede considerar en primera aproximación como un cuerpo negro a unos 6000 K. También se considera en todo este trabajo que los rayos solares son paralelos, lo que en estricto rigor no deja de ser aproximación absolutamente aceptable.

de los rayos para el mismo parámetro es ligeramente diferente, como se puede observar en la figura 4, en la que se representa el ángulo de desviación para valores de índice de refracción 1,30; 1,32; 1,34 respectivamente frente al parámetro de impacto. También se incluye el ángulo incidente.

En cuanto al rayo procedente de la segunda reflexión, E, su desviación se puede calcular mediante sencillas consideraciones geométricas, $\delta' = 6\beta - 2\alpha$. Una vez más, recurriendo a la Hoja de cálculo se observa que su comportamiento es inverso a δ , es decir, crece y presenta un máximo también aproximadamente a 0,96r y con un valor de $129,87^\circ \cong 130^\circ$, como puede observarse en la Figura 5.

Como es obvio, podrían producirse y de hecho se producen más reflexiones internas, que podrían dar lugar a nuevos arcos, sin embargo, en cada paso se pierde energía de modo que las reflexiones de orden superior al segundo dan origen a rayos emergentes muy débiles, por tanto a arcos tan tenues, que resultan invisibles³.

En resumen, los resultados de ambas simulaciones confirman el resultado experimental dado que la altura del respectivo arco, suplementario del ángulo de desviación es el esperado. No obstante todavía quedan puntos por esclarecer, por ejemplo. Sólo se han tratado los rayos incidentes solares directos pero a la gota llegan, además de estos multitud de rayos dispersos procedentes de reflexiones con otras gotas o en general, como consecuencia del esparcimiento⁴ de la luz por la atmósfera

Los rayos que han sufrido las reflexiones internas se desvían en un campo muy amplio de direcciones, ¿por qué precisamente a aquellos situados en las vecindades de la máxima o mínima desviación intensifican su intensidad?.

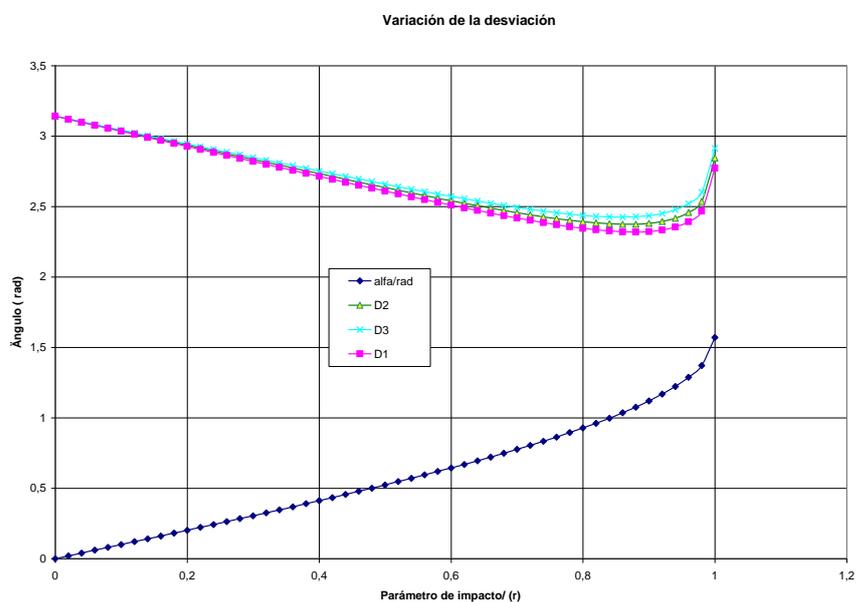


Figura 3.- Ángulos de desviación e incidencia para distintos valores del índice de refracción

³ En el laboratorio, con un poco de buena mano es posible conseguir varios arcos. Véase el artículo de Jearl. Walker en Investigación y Ciencia. Septiembre de 1977 "Como crear y observar una docena de arco iris en una sola gota de agua"

⁴ "scattering"

La primera cuestión puede resolverse pensando que los rayos dispersos son de muy baja intensidad, comparados con la luz directa y en consecuencia, los arcos que producirán serán muy tenues.

Respecto a la segunda cuestión, porqué sólo los rayos que llegan a la gota con un valor determinado del parámetro, o muy próximos a él⁵ producen el arco iris y precisamente después de por lo menos una reflexión interna se puede responder que el primer rayo reflejado B, no ha sufrido descomposición, en consecuencia no formará arcos.

El rayo C es el rayo refractado por la gota y se aleja del observador.

Respecto a los rayos C y E, la intensidad de estos se refuerza en las vecindades del rayo cartesiano ya que la gota está uniformemente iluminada en su cara enfrentada al Sol, el ángulo de desviación en principio disminuye (o aumenta) al aumentar el parámetro de impacto, sin embargo al aproximarse al valor extremo este aumento o disminución es cada vez más lento, de modo que en las proximidades de este valor se “acumulan” muchos más rayos que por los restantes valores, además superado el valor del extremo los rayos se desvía hacia atrás de la gota. En resumidas cuentas pues, en las direcciones de 130° y 138° hay una acumulación de rayos. Además en la zona comprendida entre los 130° y 138° (siempre en términos aproximados), no llegará ningún rayo después de la primera o segunda reflexiones,

De este modo se explican pues, por una parte la formación del rayo, su forma de arco.

Dado que debido a la simetría de la gota no existe un plano privilegiado, el observador recibirá los dos conos de luz, y la zona oscura que corresponderá precisamente a esta región de desviación entre 138° y 130° .

Obsérvese que el tamaño de la gota no interviene en la formación de la arco, incluso pues es posible reproducir la formación del arco, como ya lo hiciera en su momento Descartes, con una gran gota consistente en un balón de vidrio lleno de agua, que se puede improvisar con una vieja bombilla a la que se desprovisto de casquillo y sistema de filamentos. Incluso puede utilizarse un vaso cilíndrico⁶.

Queda por explicar la parte más espectacular del rayo, sus colores. Debido a la diferencia de los índices de refracción en el agua para los distintos colores, estos se desvían de modo diferente. El índice de refracción, que como es sabido es la relación entre la velocidad de la luz en el medio y en el vacío (\cong aire) en el agua es menor cuando menor es la longitud de onda, es decir, cuando más próxima al rojo es la luz, más lentamente se propaga en el agua, y una vez más la simulación en la hoja de cálculo, sólo con tres “colores” por obvias razones de claridad y sencillez, pone de manifiesto que la desviación es mayor o lo que es lo mismo, la altura sobre el horizonte, será menor cuando más próxima al violeta se halle la radiación, viceversa con el secundario. Newton había calculado que el ángulo de desviación para el rojo era de $137^\circ 58'$ para el rojo y $139^\circ 43'$ para el violeta, lo que da para el arco primario una amplitud de 1°

⁵ Se le llama “cartesiano”.

⁶ Por honestidad científica hay que decir que conseguir nos resultados aceptables, no es siempre fácil y que, en nuestro modesto entender, debe descartarse el experimento como “práctica de cátedra”

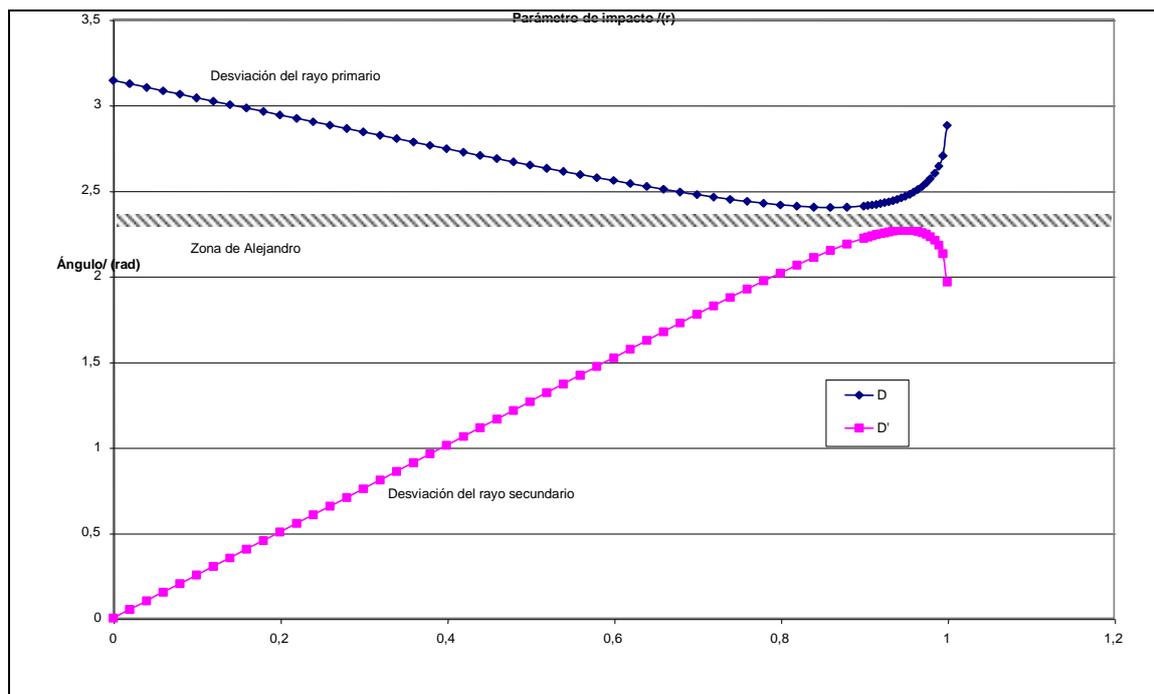


Figura 4 Desviaciones y zona de Alejandro

45', pero dado que el Sol no es un punto sino que tiene una amplitud de aproximadamente medio grado, la amplitud del arco primario será de unos 2° 15'. Con un "instrumento casero" es muy difícil estimar esta amplitud, pero trabajando con cuidado se obtienen amplitudes de entre 2° y 3°

Una última cuestión siguiendo en la misma línea. Evidentemente dada la simetría de la gota, aparecerán dos rayos cartesianos, uno a cada lado, precisamente el esquema de la figura 1 enviaría el rayo formador del arco "hacia arriba". Este arco no podría ser visto por el observador en el suelo pero ¿lo sería por alguien que volara por encima de la lluvia? En caso afirmativo ¿Qué forma tendría? Hemos interrogado a amigos pilotos no hemos obtenido respuesta experimental válida, sólo han visto arcos "con los cuernos hacia abajo". Sin embargo lo lógico es que se vea el círculo completo, ya que el arco en realidad es la sección de un cono, siempre y cuando el avión vuele a altura suficiente. Esta opinión está confirmada por un bonito dibujo en un viejo Signal, en el cual el artista alemán Hans Liska, especialista en temas militares y cuyos dibujos se caracterizan por un gran rigor, representa "el arco que ven los pilotos" y efectivamente dibuja la corona circular completa.

En resumen, he aquí una explicación, que no requiere conocimientos de física muy elevados, siempre dentro de lo exigible aun en los lamentables programas de física de las enseñanzas previas a la Universidad,⁷ es posible explicar de modo riguroso los aspectos fundamentales del arco iris, incluso con un cierto grado de cuantitatividad, quedan empero algunos aspectos más difíciles, como los arcos supernumerarios y los "arcos blancos" o el que el arco no se corte de modo brusco en la banda oscura. Según esta teoría ningún rayo, al menos de clase B o C, debería llegar a la zona de Alejandro, que debería además y en consecuencia ser muy oscura.

⁷ No está de más recordar que en el bachillerato actual los estudiantes solo tienen una asignatura de Física pura en 2º, cuatro horas semanales, no más de unas 60 anuales reales.



Figura 5. Arco ue ven los pilotos en realidad (Foto que me ha llegado a mi cuenta de FB, no sé desde donde)



Figura 6 . Dibujo de Hans Liska en que se representa “el arco que ven los pilotos”. Se observa la arco primario completo y una parte de secundario pefro el artista a equivocado el orden de los colores de este.

2º APROXIMACIÓN

Una primera explicación a los arcos supernumerarios se debe a Young (1803), que se basa en su propia teoría de la interferencia. Si se observa la figura 4, se ve como en las vecindades del rayo cartesiano, se encuentran siempre dos rayos que, pese a haber seguido caminos ópticos diferentes dentro de la gota, emergen con el mismo ángulo de desviación, uno a cada lado del cartesiano. Con los conocimientos actuales de mecánica ondulatoria se sabe que las intensidades de estos arcos no pueden sumarse algebraicamente, sino que es un fenómeno idéntico al conocido experimento de las dos ranuras del propio Young. Como es sabido cuando coinciden dos ondas se interfieren, esta interferencia puede reforzar la intensidad, interferencia constructiva, el máximo se da cuando la diferencia de caminos es un número par de semilongitudes de onda o debilitarla, incluso anularla, cuando la diferencia de caminos es un número

impar de longitudes, destructiva. Los alumnos pueden con facilidad simular las interferencias con la hoja de cálculo. Fig. 6, lo que puede ser altamente instructivo.

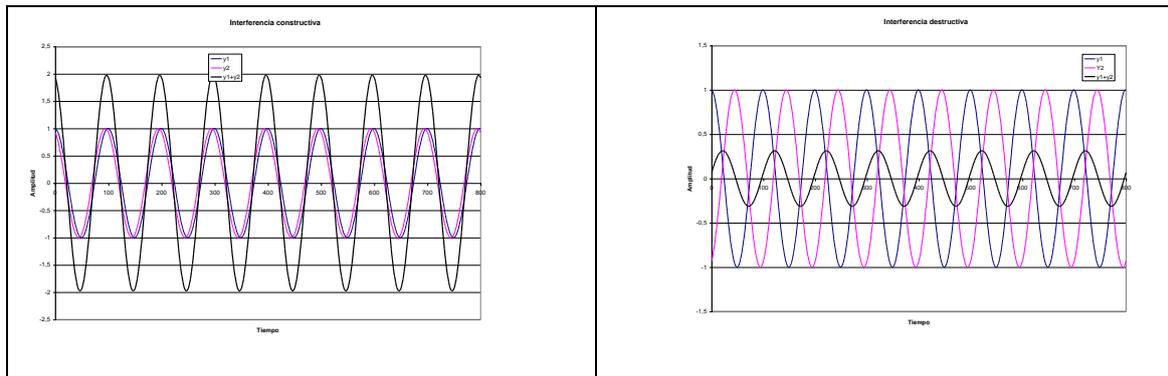


Figura 7.-Ilustración de interferencias constructiva y destructiva

En resumidas cuentas, cuando la diferencia de los ángulos es pequeña, los caminos ópticos en el interior de la gota son muy parecidos y la interferencia es constructiva.

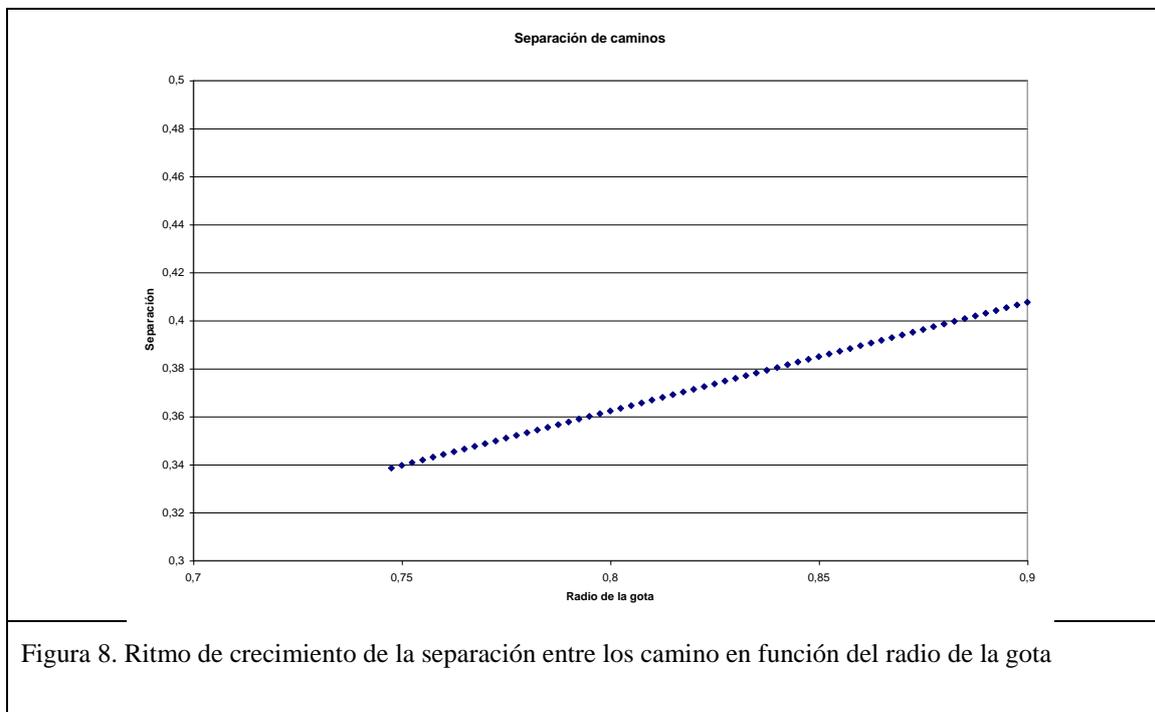


Figura 8. Ritmo de crecimiento de la separación entre los caminos en función del radio de la gota

El resultado de estas interferencias constructivas son precisamente los arcos supernumerarios. Evidentemente, aquí sí es importante el radio de la gota porque el camino óptico depende de él, una sencilla consideración geométrica pone de manifiesto que este camino es $e = 4r \cos \beta = \frac{4r}{n} \sqrt{n^2 - p^2}$, siendo r el radio de la gota, n el índice de refracción del agua para la radiación implicada y p el parámetro de impacto, como fracción del radio de la gota.

Por otra parte, para una misma gota la separación entre pares de rayos homólogos a su vez va creciendo de modo que inicialmente la interferencia es constructiva, con una intensidad muy grande, es el arco iris, pero la intensidad de la resultante va disminuyendo, hasta que se hace absolutamente destructiva, lo que correspondería a una banda oscura a partir de ahí vuelve a aumentar la intensidad de la interferencia,

hasta otro absolutamente constructiva, aun bastante intenso, este primer máximo corresponde al primer arco suplementario y así sucesivamente.

Por otra es fácil comprobar, y una vez más la Hoja de Cálculo es una excelente ayuda, que para pares de parámetros homólogos, la separación entre los caminos crece con el radio de la gota en consecuencia la secuencia de máximos y mínimos puede quedar muy próxima y los arcos no se distinguirán. (La frontera está aproximadamente en 1 mm). En consecuencia los arcos suplementarios se verán mejor en la parte alta del arco, donde las gotas son menores, que la baja donde son más grandes. Respecto al índice de refracción la separación aumenta más rápidamente para valores de índice de refracción menores, es decir, para aquellas radiaciones que tienden al violeta, de ahí la coloración rosada de los arcos supernumerarios. Cuando la separación entre los arcos supernumerarios sea muy pequeña, pueden “mezclarse” dando un color blanco, de hecho en general, son rosados, no rojos, o verdosos.

La teoría de Young explica la formación de arcos supernumerarios pero, en cierto sentido implica una contradicción en si misma ya que si las ondas se interfieren, también se difractan y como consecuencia la separación entre las distintas zonas del arco debe ser suavizada por la difracción.

Potter(1935) propuso una idea según la cual el cruce de varios conjuntos de rayos luminosos en una gota daba lugar a una curva cáustica, este tipo de curvas son las envolventes de un conjunto de rayos, una típica es la que se observa cuando el sol se refleja en una taza y da lugar a dos curvas brillantes que se unen en punta, con una intensidad creciente hasta la curva para entrara bruscamente en una zona oscura. En cualquier caso tanto la explicación de Descartes como las de Young y Potter predicen en el rayo cartesiano una intensidad infinita.

3º APROXIMACIÓN

Esta explicación se debe a Airy, allá por 1838, quien partiendo de los conocimientos que ya se tenía en su época de las propiedades de las ondas, especialmente del principio de Huygens, según el cual, todo punto alcanzado por una onda se convierte a su vez en foco emisor de ondas esféricas, siendo la envolvente de estas ondas el nuevo frente resultante. Si en un instante dado se conoce un frente de ondas y las amplitudes de las ondas secundarias a él asociadas, es posible predecir el comportamiento de la onda en cualquier punto. Sin embargo este análisis no es rigurosamente posible, sólo cabe estimar estas amplitudes. Airy propuso un frente de ondas en el interior de la gota, normal a todos los rayos clase C y con un punto de inflexión en su corte con el rayo cartesiano. Así pudo predecir la intensidad de la luz del arco iris por medio de una función, que hoy se conoce como función de Airy y que él llamó integral del arco iris. Esta función bastante compleja, aunque deducida de los conocimientos generales y clásicos de la teoría de las ondas, predice un máximo relativo correspondiente al arco primario y máximos menos fuertes para los arcos supernumerarios, pero también existe en la zona oscura, de modo que explica su atenuación gradual. Los máximos se desplazan ligeramente respecto a la teoría de Young y en ningún momento se predice una intensidad infinita.

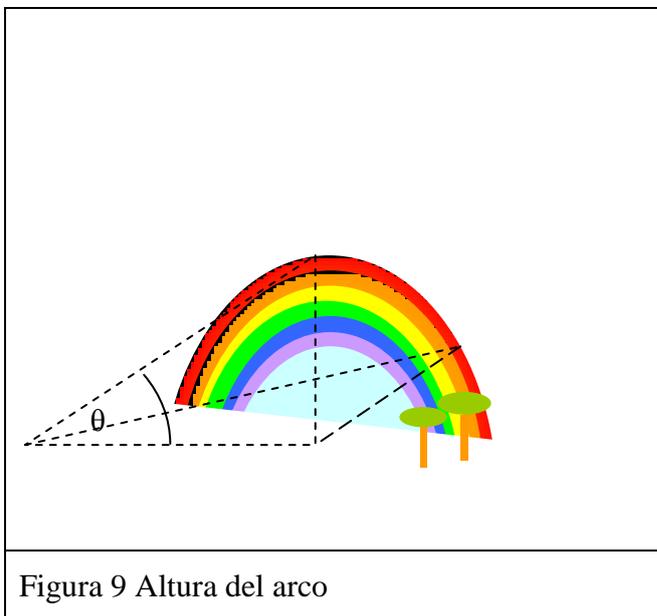
La teoría de Airy se aplica en rigor a un arco monocromático y puede verificarse experimentalmente con un láser de bolsillo y una gota de agua en la punta de una jeringa o una bureta. Los rayos policromos deberían considerarse como yuxtaposición de varios monocromáticos, ahí el tamaño de la gota es decisivo, gotas de unos cuantos milímetros producen arcos claros y brillantes, en gotas muy pequeñas ($\varnothing < 0,01$ mm) los arcos aparecen tan juntos que dan la sensación de “blancos”, no debe olvidarse que

la percepción del color traspasa la mera física para entrar en la fisiología, y que el sentido de la vista, al contrario del oído, es sintético, no analítico, aunque entrar en el campo del color es otro tema, como es bien sabido, complejo y a su vez puede ser objeto de una fructífera investigación en el aula.

Hasta ahora se ha visto como las explicaciones se van aproximando sucesivamente a una explicación definitiva. Esta desde luego existe, incluso llegando hasta el nivel molecular, lo que significaría arco "iris atómicos", pero incluso a nivel macroscópico, sin entrar en conceptos mecánico cuánticos, y utilizando las ecuaciones de Maxwell, es posible una explicación completa del fenómeno, ello no obstante dado el nivel a que va dirigido este trabajo, parece fuera de lugar puesto que requeriría el manejo de conceptos físicos con los cuales estudiantes de bachillerato o primer año de carrera no están familiarizados.

ANEXO.

OBSERVACIÓN DE LA ALTURA DEL ARCO (Fig 9)



Para ello puede usarse un goniómetro "casero" fabricado con una con un carton en el que se dibuja un cuadrante, una pajita de helados un tubito transparente y tres bolitas, pueden valer balines de pistola de aire comprimido, El problema está en determinar el centro del arco para ello puede prodecerse a base de varias observaciones y a distintos puntos del mismo arco y promediando luego. Trabajando con finura se consiguen buenos resultados. Se puede tambien improvisar el clinómetro con un semicirculo graduado, la consabida pajita y una

tuerca que actúa de plomada.

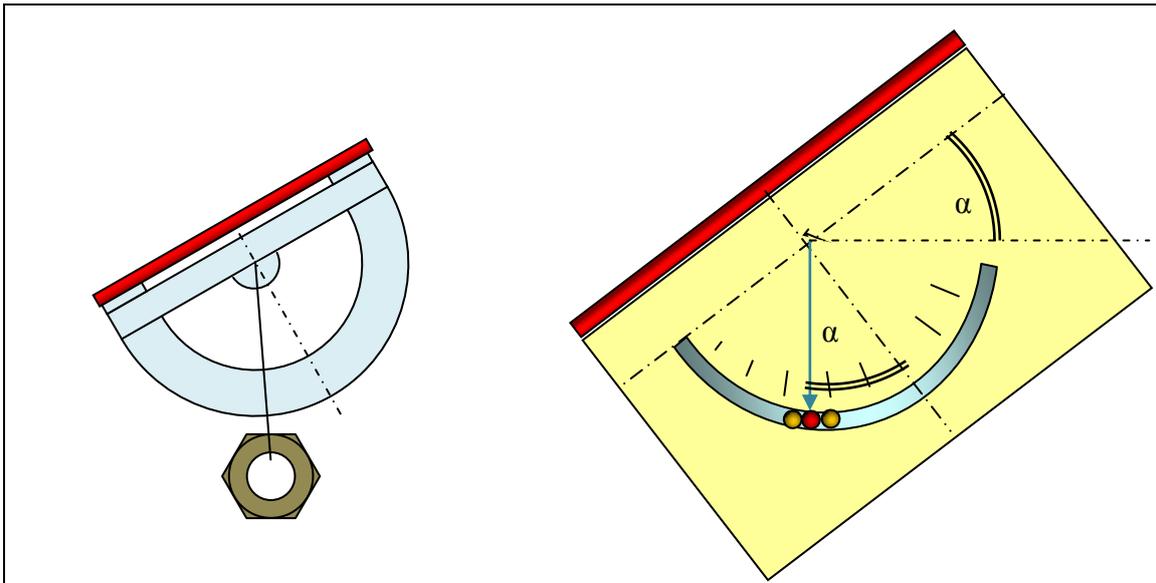


Figura 10 Clinómetros que puede servir también como acelerómetros. El primero se construye con un semicírculo graduado, una pajita de refresco que sirve de “mira” y una plomada.

El segundo se construye con un cartón sobre el que se pega una plantilla graduada y se abre un ranura en la que se inserta un tubo de plástico transparente y flexible en el que se han introducido tres bolitas, metálicas o de PVC. La lectura se hace sobre la volta central, las otras dos sirven para equilibrar mejor el sistema

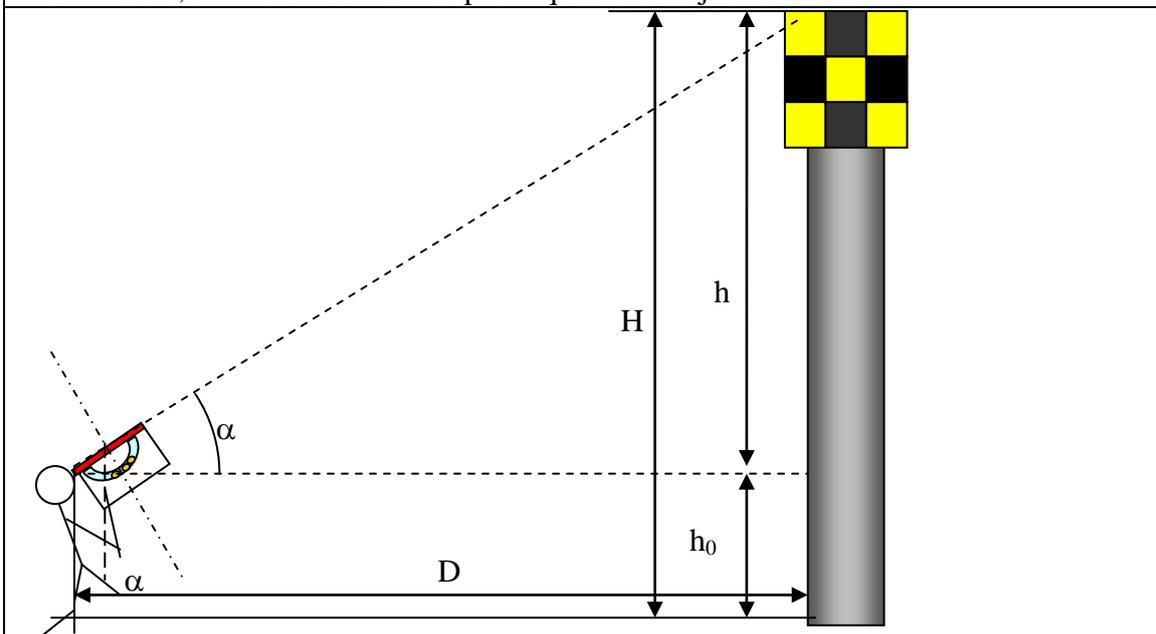


Figura 9 , Uso del clinómetro

BIBLIOGRAFÍA

Los hologramas de arco iris, a diferencia de los convencionales, se observan con luz ordinaria Walker, Jearl

Revista Investigación y Ciencia: 122 - NOVIEMBRE 1986

De los misterios del arco iris; en particular, sobre sus bellos arcos supernumerarios

Walker, JearRevista Investigación y Ciencia: 47 - AGOSTO 1980

Teoría del arco iris Nussenzveig, M. H.

Revista Investigación y Ciencia: 9 - JUNIO 1977

Temas Investigación y Ciencia: 6 - La ciencia de la luz