

El Atardecer: Sol en el Horizonte

Trabajo Personal presentado por:
Lorena Aragüeta Riesco
José Manuel Sánchez Fernández
Alumnos de Optica I, Grupo C, Curso Académico 2000/2001
e-mail: josema@bujias.net

Quién no se ha quedado al menos una vez fascinado por los colores que era capaz de observar, o quizás de intuir mientras veía un atardecer, o mientras veía los rojos anaranjados de un crepúsculo. Sea cual sea la parte de la Tierra en la que vivimos, montaña, mar...en el cielo se nos presentan a veces colores que van desde el azul marino ultramar hasta colores rosados. La variabilidad de la imagen es tan grande que nunca se reproduce exactamente.

"...

-Me gustan las puestas de sol, vamos a ver una puesta de sol...

-Pero tenemos que esperar ...

- ¿Esperar a qué?

-Esperar a que se ponga el sol.

Al principio pareciste muy sorprendido, y luego te reíste de ti mismo. Y me dijiste:

-¡Siempre me creo en mi tierra!

...

Pero a ti, en tu pequeño planeta, te bastaba correr tu silla unos pasos. Y mirabas el crepúsculo siempre que te apetecía ...

-¡Un día vi ponerse el sol cuarenta y tres veces!

Y un poco más tarde añadías:

-Sabes... cuando uno se encuentra tan triste, gustan las puestas de sol...

-¿Tan triste estabas el día de las cuarenta y tres veces?

Pero el principito no respondió."

"El Principito" de Antoine de Saint-Exupery

Introducción

La luz del cielo no es más que el resultado de la interacción de la luz del Sol con la atmósfera. Una cantidad de humedad, relativamente pequeña, acompañada de partículas de polvo y de ceniza es suficiente para provocar en el cielo las múltiples manifestaciones de color.

Nosotros vamos a analizar el que probablemente sea el fenómeno óptico más frecuente en la atmósfera (y no por ello menos espectacular): los colores del atardecer y el sol en el horizonte.

Primeramente debemos analizar que es lo que ocurre cuando la luz llega a la atmósfera, qué es lo que se observa. Después de analizar esto, pasaremos a la luz en el atardecer y presentaremos fotos en las que se evidencien los fenómenos.

Tras ello veremos las formas del sol al esconderse por el horizonte y explicaremos algún fenómeno de su geometría que comprobaremos con fotos tomadas.

Luz en el Cielo

El secreto del **color azul del cielo** está relacionado con la composición de la luz solar - integrada por los distintos colores del arco iris- y con la humedad de la atmósfera procurada por el Sol haciendo que parte del agua de la superficie terrestre se evapore.

Para explicar el color azul del cielo, imaginemos que dejamos pasar un rayo de sol por un prisma de vidrio. La luz se dispersa por refracción y como resultado de esta dispersión vemos una gama de colores: violeta, azul, verde, amarillo y rojo. El rayo violeta es el que se ha separado más de la dirección del rayo blanco y ahí está precisamente la explicación del color del cielo. La desviación es máxima para los rayos de longitud de onda corta (violeta y azul), y mínima para los de longitud de onda larga (amarillos y rojos), que casi no son desviados. Los rayos violetas y azules, una vez desviados, chocan con otras partículas de aire y nuevamente varían su trayectoria, y así sucesivamente: realizan, un zigzag en el aire antes de alcanzar el suelo terrestre. Cuando, al fin, llegan a nuestros ojos, no parecen venir directamente del Sol, sino que nos llegan de todas las regiones del cielo, como en forma de fina lluvia. De ahí que el cielo nos parezca azul, mientras el Sol aparece de color amarillo, pues los rayos amarillos y rojos son poco desviados y van casi directamente en línea recta desde el Sol hasta nuestros ojos.

Pero puede buscarse una explicación un poco más profunda. La luz es una onda electromagnética y las piezas fundamentales de la materia en su estado más frecuente en la Tierra, son los átomos.

Cuando un haz luminoso interactúa con la materia su propagación puede quedar afectada por dos modos diferentes. Se produce una disminución de la intensidad, relacionada con procesos de absorción y difusión, que depende directamente de la longitud de la **Difusión debida a pequeñas partículas**.

La difusión es un caso especial de difracción (o viceversa). La onda difundida por un objeto o partícula que tiene dimensiones mucho menores que una longitud de onda, será esférica, ya que las ondas secundarias emitidas por distintos puntos de la superficie de la

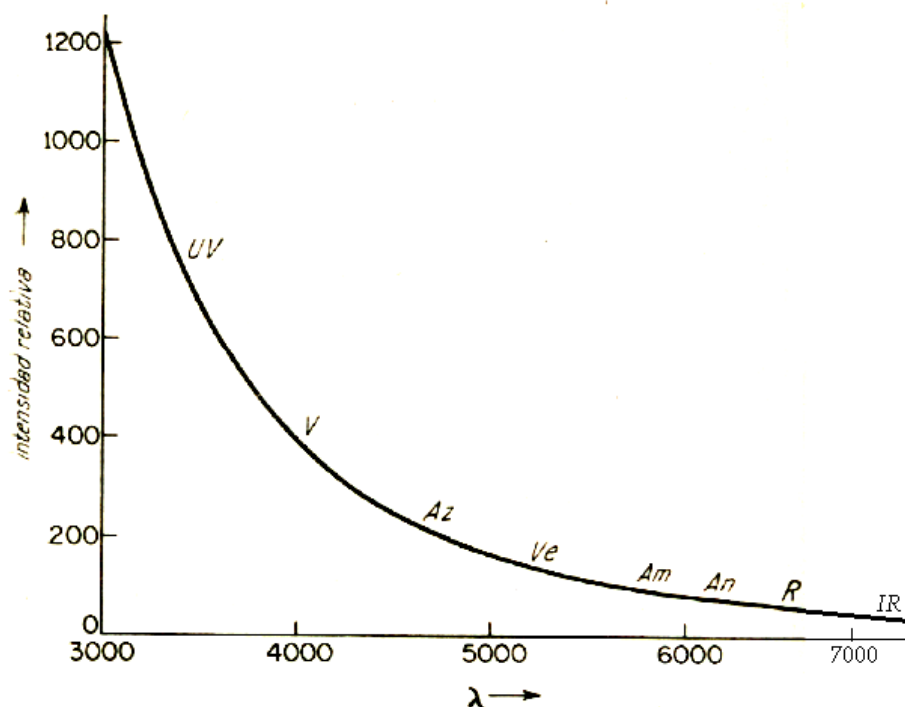
partícula no pueden interferir porque los puntos extremos están separados por una distancia mucho menor que una longitud de onda λ .

Si las partículas existentes en la atmósfera, tienen un tamaño igual o inferior al de la longitud de onda de la luz incidente (átomos aislados o pequeñas moléculas), la onda cede parte de su energía a la corteza atómica que comienza a oscilar, de manera que un primer efecto de la interacción de la luz con las partículas pequeñas del aire es que la radiación incidente se debilita al ceder parte de su energía, lo que le sucede a la luz del Sol cuando atraviesa la atmósfera. Evidentemente esta energía no se queda almacenada en el aire, pues cualquier átomo o partícula pequeña cuya corteza se agita, acaba radiando toda su energía en forma de onda electromagnética al entorno en cualquier dirección.

El proceso completo de cesión y remisión de energía por *partículas de tamaño atómico* se denomina **difusión de RAYLEIGH¹**, en honor del físico inglés Lord Rayleigh que fue el primero en darle explicación en 1871.

Como es de esperar la intensidad difundida es proporcional a la incidente y al cuadrado del volumen de la partícula difusora, sin embargo es mucho más interesante y da mucho más juego considerar la dependencia de la intensidad con la longitud de onda incidente. Para partículas definidas, esto es, con unas dimensiones dadas, es razonable pensar que las λ más largas sean menos difundidas que las cortas ya que el tamaño del "obstáculo" será en comparación con ellas mucho menor. De hecho la intensidad de la luz difundida es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. La difusión será mayor, por tanto, para las ondas más cortas: por ejemplo, la luz roja $\lambda=7200\text{\AA}$ tiene una longitud de onda 1.8 veces mayor que la violeta de 4000\AA ; la ley predice una difusión $(1.8)^4 \approx 10.5$ veces mayor para la violeta, siendo las partículas difusoras menores que cualquier λ . Así pues, gráficamente podemos mostrar la siguiente relación:

¹ COMENTARIO DEL PROFESOR: Se denomina también *esparcimiento* de Rayleigh, según término aceptado por la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, en su Vocabulario Científico-Técnico. Este término corresponde a la traducción del término inglés *scattering*.



El resultado neto es que parte de la luz que nos llega desde el Sol en línea recta, al alcanzar la atmósfera se difunde en todas direcciones y llena todo el cielo.

El color del cielo debería ser violeta por ser ésta la longitud de onda más corta, pero no lo es por dos razones fundamentalmente: porque la luz solar contiene más luz azul que violeta y porque el ojo humano, es más sensible a la luz azul que a la violeta.

El color azul del cielo se debe por tanto a la mayor difusión de las ondas cortas².

El color del sol es amarillo-rojizo y no blanco, porque si a la luz blanca procedente del Sol -que es suma de todos los colores- se le quita el color azul, se obtiene una luz de color amarillo-rojo.

La difusión, y en especial la difusión lateral, producida por los gases es muy débil, sin embargo, cuando el espesor de gas es muy grande, como sucede en la atmósfera, fácilmente se puede observar la luz difundida. Rayleigh demostró que, prácticamente, casi toda la luz que vemos en un cielo despejado se debe a la difusión por las moléculas del aire. La difusión molecular hace que al observador le llegue una cantidad considerable de luz en direcciones que forman ángulo con la luz solar directa, por lo que nos aparece el cielo brillante.

Si la luz interactúa con una partícula grande, no funciona el mecanismo de Rayleigh, ocurre un proceso mucho más sencillo: la partícula simplemente absorbe parte de la luz y la otra parte la refleja. Cada partícula se comporta como un espejo pequeño que reflejará más o menos luz según su composición química y que alterará el color de la luz reflejada si la partícula está formada por sustancias coloreadas. Si la luz se encuentra con una distribución

² COMENTARIO DEL PROFESOR: Nótese que el cielo azul, aún el más intenso, contiene todos los colores del espectro visible.

de partículas grandes, parte de la luz se esparce y, además, puede cambiar de color. Este proceso se conoce como **difusión de Mie**, y el ejemplo más sencillo lo tenemos en las nubes, donde las gotas de agua incoloras, esparcen la luz en todas las direcciones pero sin alterar su color. (El cielo del planeta Marte es otro ejemplo de difusión de Mie, provocado por partículas coloreadas de tamaño grande, por eso no es azul, porque el tamaño de las partículas no permite la difusión de Rayleigh).

Cuando la difusión de Mie actúa de forma masiva, si las partículas difusoras no son coloreadas, el resultado es la atenuación de la luz blanca hacia "grises" cada vez más oscuros. Esta es la causa de que en los días muy nublados, cuando las nubes son muy gruesas, el cielo aparezca mas o menos gris, y a veces casi negro.

El Color del Cielo en el Atardecer

Si el horizonte es amplio, los efectos se multiplican y el espectáculo es digno de verse.

Si volvemos a considerar la difusión, es éste fenómeno el que elimina la luz azul del haz directo con más efectividad que la roja originando el color rojo del sol y del cielo circundante en el crepúsculo.

Al atardecer, el camino que la luz solar recorre dentro de la atmósfera es más largo, los rebotes sucesivos en unas partículas y otras hacen crecer la probabilidad de que la luz acabe chocando con una partícula absorbente y desaparezca, de manera que incluso la parte amarilla es afectada y difundida y solo los rayos rojos, los más direccionales, siguen un camino casi rectilíneo.

Los colores que exhibe el cielo en estos casos, se originan también, como ya mencionamos anteriormente, gracias a la intervención de las moléculas existentes en el aire y de las partículas que éste tiene en suspensión, que constituyen el llamado "**aerosol atmosférico**", que dispersan y desdoblán la luz solar de múltiples modos.

Ya antes de que el Sol se hunda en el horizonte, vemos cómo el colorido del cielo se vuelve más intenso, más saturado. Mientras la luz que aparece en los alrededores del disco solar vira hacia el amarillo-rojizo y en el horizonte resulta verde-amarillenta, el azul del cielo se vuelve más intenso en el cenit.

Cuando el Sol se halla a una distancia angular del horizonte de 1° ó 2° , la luz crepuscular derrama sobre el borde del cielo su mágica luminosidad. Poco a poco, el resplandor amarillo se transforma en una luz rojo-anaranjada, y, finalmente, en una luminosidad centelleante color fuego, que, algunas veces, llega a presentar el rojo color de la sangre. Cuando ya el astro diurno ha desaparecido bajo el horizonte, se observa en el oeste del cielo un resplandor purpúreo, que alcanza su máxima intensidad cuando el Sol ha descendido unos 5° por debajo del horizonte. Encima del lugar en donde se ha puesto el Sol, separado del horizonte por una estrecha franja rojo-parda, suele verse un semicírculo cuyo color varía entre el púrpura y el rosa. Esta coloración se debe en esencia a la refracción de la luz solar en las partículas que enturbian el aire situado entre 10 y 20 km. de altura, y desaparece cuando ya el Sol ha llegado a los 7° por debajo del horizonte.

Cuando existe una cantidad anormalmente elevada de polvo atmosférico, la luz del amanecer y del atardecer es especialmente roja. Sucede generalmente cuando existen presiones atmosféricas elevadas (anticiclón) ya que la concentración de partículas de polvo en el aire es mayor a altas presiones.

FOTOGRAFÍAS:

Ahora mostraremos y comentaremos las fotos tomadas sobre todos estos fenómenos anteriormente explicados:



Foto 1



Foto 2

Estas fotografías fueron realizadas desde Alto del Arenal en Madrid a mediados de Mayo. La película utilizada fue una Kodak Gold de sensibilidad 100 ISO, tirada con una cámara Canon EOS 300. El fotómetro utilizado fue el propio de la cámara el cual realiza una medición promediada con preponderancia en el centro de la imagen. El carrete fue revelado con un proceso normal C-41 y ampliado de forma habitual.

Nos pareció interesante visualizar una imagen de fondo y una imagen general para así de esta forma visualizar todos los efectos mencionados. Elegimos un día ligeramente nublado ya que así se observan fácilmente los fenómenos de dispersión.

FOTOGRAFIA 1:

La fotografía superior fue tirada con un objetivo de 28-80 mm con la longitud focal media (aprox. 50 mm). Para obtener los tonos rosados los cuales son muy tenues y debido a la oscuridad del cielo sobre expusimos dos puntos la configuración dada como adecuada por el fotómetro de la cámara. Así tiramos con un diafragma $f\ 4.5$ y una velocidad de obturación de $1/3$ de segundo.

La luz rosada a la que nos referimos es luz que llega a nosotros a través de la dispersión que las moléculas de agua de la nube, por lo tanto se trata de un fenómeno de **dispersión Mie**³. Como hemos visto, la dispersión Mie, al tratarse de moléculas de agua⁴, no produce ningún fenómeno cromático, sino que lo único que produce (ya que se trata de una nube y hay muchas moléculas de agua) es una leve atenuación de la intensidad de la luz que vemos "reflejada". Esto quiere decir que la luz que llega a ese punto llega es más roja que la luz dispersada más lejos, lo cual se explica en la teoría presentada anteriormente: al haber atravesado la luz más recorrido dentro de la atmósfera, la luz de menor longitud de onda ha sido **dispersada** por procesos **Rayleigh** masivamente y la luz de mayor longitud de onda (púrpuras y rojos) ha seguido su trayectoria prácticamente sin dispersión Rayleigh, hasta encontrarse con la nube. La nube, por dispersión Mie, nos ha evidenciado el color de la luz que está llegando a ella.

³ COMENTARIO DEL PROFESOR: El color rosáceo de las nubes se forma por interacción de la luz solar que ha atravesado una importante cantidad de masa atmosférica. En general, se produce en nubes situadas a poca altura con respecto al horizonte. Este fenómeno también está mezclado con el *scattering* de luz azul, formado por la parte del aire que no contiene nubes. Esta fotografía es por tanto un buen ejemplo de este fenómeno, parecido al que se produce en la puesta del sol en el horizonte (a otra altura).

⁴ NOTA. Las dimensiones de una molécula de agua son mucho más pequeñas que la longitud de onda en el visible.

Todo esto evidencia también que a medida que el Sol desciende con respecto al horizonte, la luz cada vez es más dispersa por fenómenos Rayleigh, y la vemos cada vez más roja.

FOTRAFÍA 2

La fotografía inferior fue tirada con un objetivo zoom 70-300 mm adaptando un duplicador de focal, con lo que la distancia focal equivalente a la que fue tirada fue de 600 mm. Esta fue tirada acorde con los parámetros sugeridos por el fotómetro, f 4.5 y 1/10 de segundo.

Nos parecía interesante como las nubes de fondo, por dispersión Mie, hacen efecto de "freno" a la luz que reciben, atenuando su intensidad sin modificar su cromaticidad, es decir, el color sigue siendo amarillo-anaranjado, pero se ven más oscuras las zonas de nubes. Esto viene a aclarar que las nubes no producen apenas dispersión tipo Rayleigh. Al ser fotos tan lejanas, parece que en los bordes de las zonas oscuras se distinga un color más tendente al rojo. Este hecho puede indicar que la composición en la nube no sea solo agua y, aunque masivamente haya dispersión Mie, también exista una parte de las partículas en las que se den procesos Rayleigh visibles sólo en donde la densidad de partículas es menor, es decir, en los bordes de la nube.

La Forma del Sol en el Horizonte

Cuando el sol está a baja altura con respecto al horizonte no sólo experimenta cambios cromáticos la luz que de él procede. También existen fenómenos de refracción debido al índice que la atmósfera presenta. Estos fenómenos se traducen en cambios ópticos en la forma del disco solar.

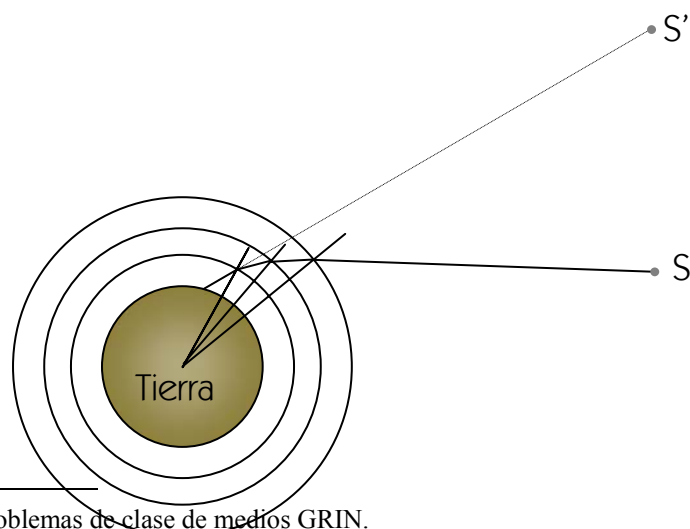
Lo cierto es que es muy difícil conocer la forma exacta del Sol que pudiera verse un día cualquiera, debido a que el índice de refracción de la atmósfera no sólo no es constante sino que depende de la temperatura, parámetro tan variable y difícil de estudiar como las circunstancias meteorológicas del momento. Sin embargo se puede estudiar la temperatura de capas o estratos (*layers*) en la atmósfera por la forma del Sol.

Como es de suponer los fenómenos de deformación del disco solar dependerán mucho del lugar de observación, ya que en alturas cercanas al nivel del mar las capas de atmósfera que un rayo atraviesa hasta el observador son mayores que en alturas superiores. Por otro lado también depende de lo que tengamos delante como "horizonte" ... no es por ejemplo un "horizonte bueno" para la observación un sistema montañoso. Como anteriormente, se multiplican los efectos cuanto más bajos estemos observando el disco solar. También ayuda a la observación que el horizonte sea el límite de la superficie del mar.

Nuestro estudio se basará en la forma del disco solar y las deformaciones que se producen en sus bordes.

La forma del disco solar:

La forma del disco solar a medida que se acerca al horizonte va cambiando de una circunferencia a una forma elipsoidal de un tamaño mayor. Esto no solo ocurre con el sol, también la imagen de la Luna y las estrellas sufren deformaciones de este tipo. Esto es debido a que, en rasgos generales, el índice de refracción de la atmósfera decrece con la altura⁵. Si consideramos una distribución discreta de capas de índice de refracción diferentes decrecientes con la altura, como en la figura:



⁵ Se recomienda ver los problemas de clase de medios GRIN.

Lo que obtenemos es que para posiciones altas en el cielo los rayos procedentes del Sol son prácticamente perpendiculares a las capas y apenas tenemos desviación, pero a medida que atardece, los rayos del Sol entran oblicuos a la superficie de la atmósfera desviándose hacia la perpendicular de la tierra de las capas a medida que penetra en la atmósfera el rayo. Esta es la causa de la deformación observada.

Este efecto también es causa de que el Sol que vemos ocultarse por el horizonte está por debajo del horizonte real como se puede apreciar en el gráfico simplificado. Si no tuviéramos atmósfera, o ésta no fuera refractora, el Sol ya estaría oculto en ese momento por debajo del horizonte.



Deformaciones del Disco Solar en el Horizonte:

El disco solar en el horizonte presenta, además de la forma anteriormente explicada, múltiples deformaciones de su contorno debido a la inhomogeneidad en el gradiente de temperaturas presentes en la atmósfera que atraviesa la luz. Como se puede ver, estos efectos, por su origen, están directamente relacionados con los **espejismos** aunque no es el objetivo de esta exposición tratar todo tipo de espejismos.

Como la dependencia de lo observado respecto de donde se observa es tan fuerte, nosotros explicaremos lo que ocurre cuando estamos a pocos metros sobre el nivel del mar y la observación se hace teniendo como horizonte el mar.

Hay que dejar claro aquí que lo que observamos es la puesta aparente de Sol en el horizonte. Esto se llama la puesta de Sol en el "horizonte aparente".

Capas de Inversión:

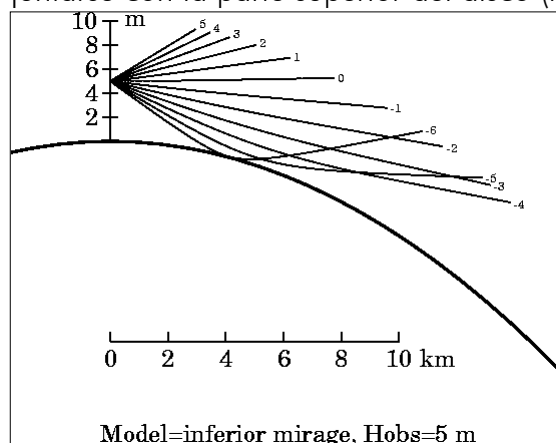
En ocasiones se ve como el borde del disco solar se distorsiona formando un borde irregular. Se dice en estos casos que en el camino óptico los rayos del sol han atravesado una capa de inversión (*inversion layer*). Estas capas de atmósfera son capas en las que la temperatura es menor que las capas que la rodean. Estas capas de inversión, por su origen, al observar el Sol con filtros solares veríamos que se mueven en movimiento ascendente y descendente (a veces muy rápido), lo que indica la evolución de esa capa de aire frío y las de aire caliente de alrededor. En las fotos realizadas se ven capas de este tipo que deforman el borde del disco solar; a medida que el sol está más bajo mayores son sus efectos debido a la trayectoria más larga de los rayos.

El sol ocultándose en el horizonte marino:

Esta sea quizá la parte más espectacular de los efectos. Para explicar las formas obtenidas, con esas fuertes deformaciones en la forma del disco, seguiremos un razonamiento deductivo.

A medida que se va ocultando vemos que hay fuertes deformaciones en el disco, que prácticamente lo dividen en partes. Si observamos el color de las partes inferiores de la segunda y tercera de las fotos vemos que toman una tonalidad fuertemente rojiza. Esto evidencia que han seguido un camino por el aerosol atmosférico más largo que la zona superior. Podemos incluso distinguir en las fotografías como la parte inferior más rojiza tiene su propia forma elíptica diferente de la parte superior.

Pues bien, esto es lo que realmente está ocurriendo. Hay dos partes en la imagen obtenida, la superior y la inferior de tonalidad más roja. Esta parte inferior es en realidad un **espejismo inferior** de la parte baja del disco solar. Se puede ver como esa parte inferior es un nuevo disco, "reflejo" invertido de la parte inferior del Sol, que asciende aparentemente para juntarse con la parte superior del disco (más amarilla).



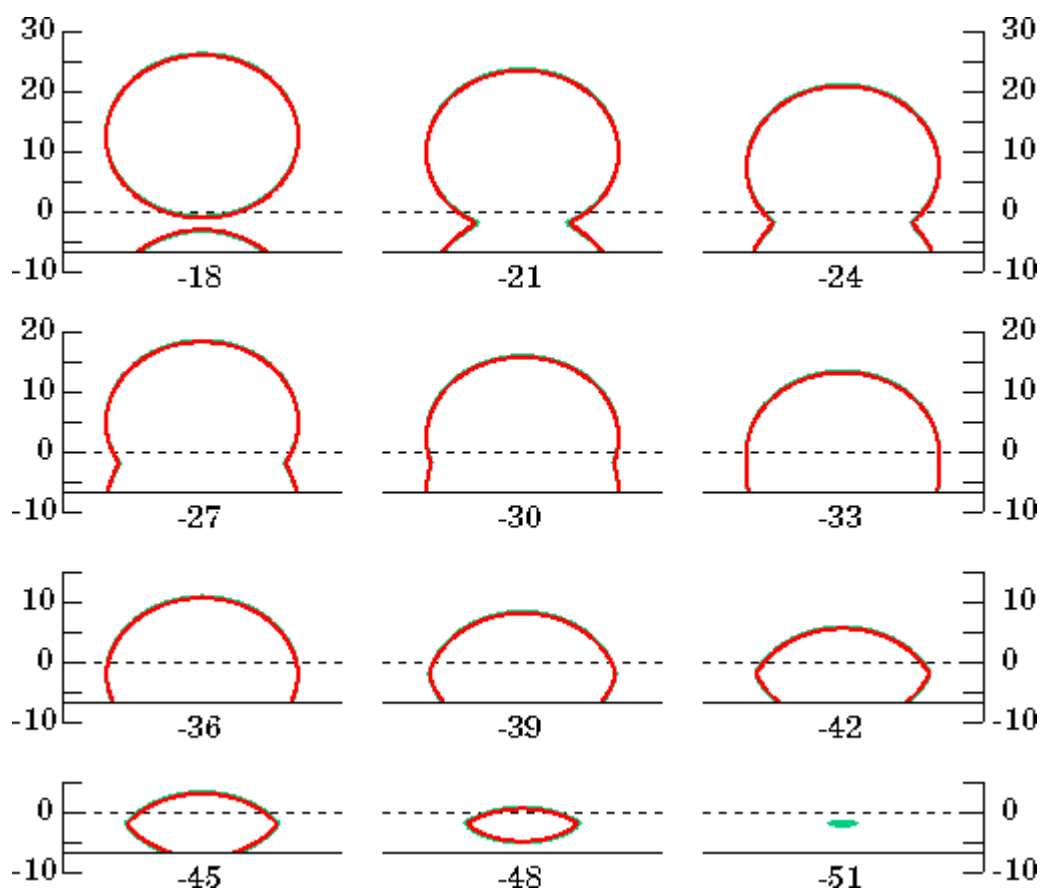
El trazado de rayos de un espejismo inferior a pequeña escala (es decir, escala de objetos superficie terrestre) puede ser aproximadamente el mostrado en la simulación de la figura, donde HOBs indica la altura del observador, y el número al lado de cada rayo la altura aparente en grados para el observador

Con respecto a las distancias al sol, los rayos que entran por la parte inferior del observador no están tan curvados. Sólo queremos que esto sirva de

explicación ilustrativa de lo que es un espejismo inferior, y mostrar que lo observado en la ocultación del Sol también es un espejismo inferior.

Este espejismo inferior de la parte oculta lo vemos por otro lado por debajo del horizonte aparente en el cual se estaba introduciendo el Sol, es decir, lo vemos como si estuviera dentro del agua. Para ilustrar este efecto y dar apoyo a las fotografías realizadas incluimos una simulación de cada etapa de lo que sería una ocultación del Sol en el horizonte del mar (altura 0) y la formación del espejismo inferior para un observador cerca del nivel del mar.

En cada figura del diagrama se representa: en los ejes verticales la altura de arco en grados medida por el observador, y debajo de cada figura la altura de arco real del Sol en grados (como si no hubiera atmósfera. Como hemos dicho antes el cero de altura corresponde al nivel de altura del horizonte marino. Como vemos el horizonte aparente esta por debajo del horizonte del mar:



Hay que hacer notar que esta última fase quiere representar la formación del “rayo verde”. Este “punto” residual no siempre se tiñe de verde. Nosotros lo observamos, y en la serie de fotos lo tenemos registrado, pero no observamos el tono verde. Suponemos que puede deberse a que no se daban las condiciones necesarias⁶.

FOTOGRAFÍAS:

Estas tres fotografías (véanse fotografías 3, 4 y 5), fueron tiradas con la misma cámara que las anteriores. El objetivo utilizado fue un 70-300 mm con duplicador, de forma que la distancia focal equivalente era de 600 mm. La película utilizada fue diapositiva Kodak Elite 100 S, de 100 ISO de sensibilidad. Las tres fotos fueron tiradas subexponiendo entre 3 y 4 puntos la configuración dada por el fotómetro. Esto era necesario para obtener un borde del disco solar nítido, para lo cual también elegimos un diafragma muy cerrado (f 45) para corregir posibles efectos de desenfoque en distancias largas. Por supuesto, todo esto ayudados de un trípode.

Como las condiciones de luminosidad varían mucho de una foto a otra y de la misma forma las configuraciones de obturación-diafragma:

- Para la primera fue f 45 de diafragma y una velocidad de 1/1000 de segundo.

⁶ COMENTARIO DEL PROFESOR: Es difícil observar “el rayo verde” ya que no puede predecirse con exactitud el punto del horizonte en el que se va a formar. La inclinación del rayo con respecto al horizonte es inferior a 1’ minarc.

- Para la segunda, $f\ 45$ y $1/250$ de segundo.
- Para la tercera, $f\ 45$ y $1/125$ de segundo.

El lugar elegido fue un lugar cercano al pueblo de Molino en el Concello de Oia, Pontevedra. La altura sobre el nivel del mar Atlántico sería de entorno a 5 metros. La fecha en que fueron realizadas fue el 23 de Junio del 2001.

En las fotos se observa la combinación de las capas de inversión junto con el espejismo inferior. Todo esto da lugar a deformaciones muy espectaculares y dignas de observar evolucionar. Algunas eran sorprendentemente rápidas (duraban segundos).

En la serie realizada se pueden observar más o menos bien todas las fases del gráfico anterior. Las dos últimas fases son muy rápidas, de entorno a 25 segundos, y en la serie no nos salieron del todo bien en cuanto a exposición, casi no daba tiempo a elegir tiempo de exposición y apertura de diafragma.



Foto 3



Foto 4



Foto 5