ÍNDICE

1. **La Luz: una ventana al Universo**
    a. Introducción
    b. La luz y su naturaleza
    c. Espectro electromagnético
        i. Introducción. Otras ondas.
        ii. Características de las ondas electromagnéticas.
        iii. Espectro electromagnético.
        iv. Reflexión y refracción.
        v. Difracción.
        vi. Descomposición de la luz. Dispersión cromática.
        vii. Espectros de emisión y absorción.
        viii. Efecto Doppler.
        ix. Temperatura de las estrellas. Cuerpo negro.
    d. Nuestra atmósfera
        i. Opacidad atmosférica. Ventana óptica.
        ii. Esparcimiento de Rayleigh.
        iii. Titilación de las estrellas. Seeing y transparencia.
        iv. Óptica adaptativa.
        v. El Universo con otros ojos. Telescopios espaciales.
2. **El ojo y la visión**
    a. Introducción
    b. Anatomía del ojo. Acomodación. Enfermedades
    c. Fotorreceptores
        i. Aspecto de los fotorreceptores. Distribución. Punto ciego. Resolución.
        ii. Conos. Visión fotópica.
        iii. Bastones. Visión escotópica y mesópica.
        iv. Visión logarítmica.
        v. Visión periférica.
        vi. Adaptación a la oscuridad/claridad.
    d. Punteros láseres.

1. La Luz: una ventana al Universo.

a. Introducción

A lo largo de la Historia de la Humanidad, el ser humano ha sentido curiosidad por conocer el firmamento que tenía sobre su cabeza. Al observar esos puntos luminosos se preguntaba de dónde procedían, vinculaba esos puntos que hoy conocemos como estrellas y planetas a los dioses, y la vida cotidiana estaba influenciada por los astros. Durante mucho tiempo, astrología y astronomía iban unidas de la mano, se pensaba que lo que acontecía en el cielo estaba relacionado directamente con el destino de las personas.

El ser humano se hacía miles de preguntas, sobre el origen de los astros, sobre el movimiento de los planetas, sobre nuestra posición en el Universo, sobre la naturaleza de la luz y de los colores… Y hasta el siglo XVII, el único instrumento del que disponía era aquel con el que había nacido: el ojo humano. Sin embargo y al llegar a tal fecha, el ojo humano no podía responder a todas las preguntas que se nos abrían por delante. En el siglo XVII, el astrónomo italiano **Galileo Galilei** usó el primer telescopio astronómico, naciendo así la **astronomía telescópica**.

La astronomía comenzó una **revolución imparable**, el telescopio se convirtió en un instrumento de un valor incalculable para los astrónomos profesionales, que fueron escudriñando todos los rincones del espacio. Esta revolución, si ya era bien importante, se disparó cuando comenzamos a observar el Universo en zonas distintas a la luz visible: ondas de radio, rayos X, infrarrojo, etc.

Al mismo tiempo, fuimos descubriendo que nuestra atmósfera nos limita la visión que teníamos, y se vio la necesidad de colocar en el espacio exterior telescopios espaciales que nos ayudaran a estudiar el Universo.

Hemos aprendido multitud de cosas. Hemos aprendido cómo es la luz que vemos y cómo se comporta. Hemos analizado nuestra atmósfera y hemos conseguido incluso evitar sus defectos, aun teniendo los telescopios en tierra.

Durante esta primera parte de la charla, estudiaremos la luz y su naturaleza, estudiaremos las demás manifestaciones de la luz que nuestros ojos no pueden captar. Y estudiaremos, por último, la esfera gaseosa que recubre nuestro planeta, llamada atmósfera, antes de adentrarnos en el ojo humano.

b. La luz y su naturaleza.

Los científicos han indagado durante mucho tiempo sobre la **naturaleza y composición de la luz**. A pesar de que ha habido muchos intentos para tratar de responder a tal enigma, las respuestas más coherentes han aparecido a partir del siglo XVII.

Una de las primeras ideas acerca de la luz partió del filósofo **Platón**, que en el siglo V a.C. teorizó que la luz provenía de partículas que se originaban en nuestros ojos y que rebotaban en los objetos, permitiendo reconocer dichas formas. Es una idea que se mantuvo vigente durante muchos años, pero que no explicaba por ejemplo las diferencias de iluminación entre el día y la noche.

Todo esto se basaba en la idea de que las partículas viajaban en línea recta, y es la base de lo que actualmente conocemos como **teoría corpuscular**.

La teoría corpuscular viene a decirnos que la luz está formada por partículas denominadas **fotones**, que no poseen ni masa ni carga.

La teoría corpuscular fue apoyada por científicos de renombre, como **Descartes** y **Newton** en el siglo XVII. Esta teoría permitía explicar lo más básico acerca de la luz: la **propagación rectilínea** y la ley de la **reflexión**. Newton además pudo explicar la descomposición de la luz cuando pasa a través de un prisma. Sin embargo, la teoría corpuscular no lograba explicar fenómenos más complejos. Por ello, aparecieron críticas a dicha teoría, y un tiempo después se comenzó a hablar de una naturaleza distinta para la luz, tratándola como una onda (**teoría ondulatoria**). Una de las personas que mejor contribuyeron con la teoría ondulatoria fue el holandés Huygens, que demostró las leyes de la **reflexión** y **refracción** tratando a la luz como ondas. Young hizo grandes avances en el campo de la **interferencia**. Otro de los fenómenos que no se puede explicar mediante la teoría corpuscular es el de la **difracción**. No hay que olvidar tampoco a otra serie de científicos que lograron que esta teoría fuese adquiriendo cada vez mayor coherencia: **Hook, Fresnel, Maxwell** y **Kirchoff**. En este documento hablaremos con más detalle de la reflexión, refracción y difracción, que son tres de los fenómenos fundamentales en la óptica.

A partir de ese momento, la óptica fue encaminada hacia la teoría ondulatoria, pero a principios del siglo XX se vio que ni una ni la otra podían explicar todos los fenómenos, siendo el efecto fotoeléctrico el detonante de la disputa. La explicación de **Albert Einstein** del efecto fotoeléctrico – por el que al incidir radiación electromagnética sobre una superficie se emiten electrones a partir de ella – le sirvió para lograr el Premio Nobel de Física de 1921. Había que recurrir a las dos teorías para que se complementaran la una con la otra. Esto quiere decir que la luz para ciertos fenómenos parece comportarse como una partícula, y para otros se comporta como una onda. Es lo que conocemos como **dualidad onda-corpúsculo**.

c. Espectro electromagnético

i. Introducción

La luz de las más distantes galaxias, de las nebulosas de nuestra Vía Láctea, la de los cúmulos abiertos y globulares que inundan nuestro cielo… la luz de todos estos objetos es **radiación electromagnética**. Toda la información que recibimos del Universo nos llega en forma de esa radiación.

A pesar de lo que podamos pensar, la radiación electromagnética de los objetos como el Sol o la estrella más cercana no nos llega de manera instantánea, sino que tarda un tiempo en llegar que depende de la velocidad de la luz en el vacío (aproximadamente **300.000 km/s**). La velocidad se ha calculado tanto en la teoría como en la práctica.

Para hacernos a la idea de lo que representa esta velocidad, la luz del Sol tarda 8 minutos en llegar a la Tierra, estando nuestro planeta a 150.000.000 de km del Sol, de ahí que en ocasiones digamos los astrónomos aficionados que nuestro astro se encuentra a 8 minutos-luz de nosotros. Si ahora ponemos el caso de la siguiente estrella más cercana a la Tierra – Próxima Centauri – entonces en lugar de minutos-luz debemos hablar de años luz, estando esa estrella a aproximadamente 4 años luz de nosotros.

Por este motivo, cuando miramos al cielo estamos viendo el pasado. La galaxia de Andrómeda, una aglomeración de numerosas estrellas y otros objetos, más grande que la Vía Láctea, se halla a 2 millones de años luz de nosotros. Si ahora explotara una estrella como supernova en dicha galaxia, un telescopio astronómico captaría la explosión dentro de 2 millones de años.

Y ciertamente no hay nada más rápido que la luz, a pesar de que las películas puedan contarnos otras historias.

Hemos hablado de que la luz se puede transmitir mediante ondas. ¿Qué son esas ondas? Imaginemos un caso sencillo. Lanzamos una piedra a un lago, o al mar, y nada más caer la piedra, veremos cómo a partir de ese punto salen círculos concéntricos que se van alejando a la misma velocidad. Conforme avanzan esos círculos, se van atenuando hasta que pasados una distancia parecen desaparecer. Esos círculos son perturbaciones que se crean en el agua y que nosotros conocemos como ondas. Llamamos **frente de onda** a los puntos de un medio que son alcanzados al mismo tiempo por la onda. En este caso son los círculos concéntricos que se forman, pero los frentes de ondas pueden adoptar formas de esferas, cilindros, etc.

Ondulación en el agua

Existen muchos **tipos de ondas**. El **sonido**, por ejemplo, se crea cuando el aire se comprime y expande repetidas veces. Son ondas de presión y necesitan un medio material para transmitirse. Por ello, esto significa que en el espacio no hay sonido alguno, a pesar de que en la ficción lo veamos constantemente.

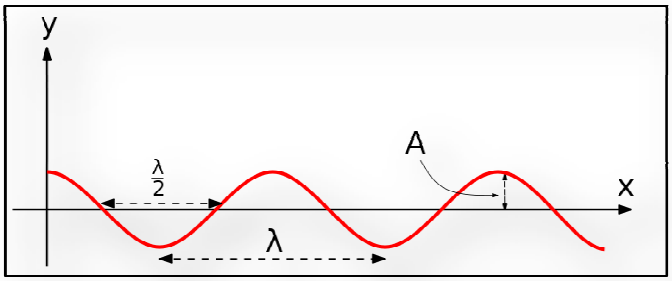
Otros tipos de ondas son las **sísmicas** y las **gravitacionales**. Estas últimas no son tan conocidas como las primeras porque no son tan intuitivas, y fueron predichas por Einstein en su teoría general de la relatividad. En cambio, las sísmicas las sufrimos todos los días en nuestro planeta, a veces con más intensidad creando catástrofes considerables.

Dividimos las ondas en dos grupos:

- **Materiales**: necesitan un medio material para transmitirse. Por ejemplo el sonido, las ondas sísmicas, las oscilaciones en una cuerda, etc.
- **No materiales**: pueden transmitirse por el vacío. Un par de ejemplos son las ondas electromagnéticas y las gravitacionales.

ii. Características de las ondas electromagnéticas

Al hablar de las ondas, tenemos que saber las características básicas que las describen: amplitud, frecuencia y longitud de onda. La señal que vemos a continuación es sinuidal, y podemos ver claramente que se va repitiendo la misma señal con el tiempo. La mejor analogía que podemos hacer es imaginarnos el movimiento que le proporcionamos a una cuerda desde un extremo. En este caso, el eje x se corresponde con la posición desde nuestro brazo, y el eje y se corresponde con la posición vertical de cada punto de la cuerda. La **amplitud** de la cuerda es por tanto la mitad de toda la variación vertical que ha sufrido la cuerda. La **longitud de onda**, medida en metros y descrita por la letra griega lambda (λ) es la distancia que hay entre dos puntos en los que la posición vertical es máxima o mínima. Y la **frecuencia** es el número de oscilaciones que se producen cada segundo, medida en hertzios. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia.



De todas las ondas mencionadas, las que realmente nos interesan aquí son las electromagnéticas. Repasando lo que hemos comentado, no necesitan ningún medio para transmitirse y se desplazan por el vacío a una velocidad de 300.000 km/s. Cuando tratamos con medios que no son el vacío, la velocidad disminuye siempre. Por ejemplo, la velocidad de la luz en el aire no llega a ser la que tiene en el vacío, pero son prácticamente iguales; y la velocidad que adquiere en el agua se reduce a 225.000 km/s. El parámetro que hace variar la velocidad de estas ondas es el **índice**

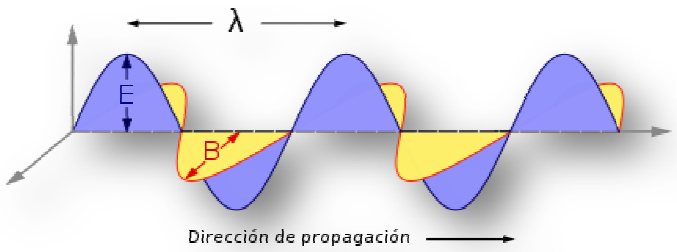
de refracción del medio, un número siempre igual o menor que la unidad. La velocidad de las ondas electromagnéticas en cualquier medio viene determinada por la siguiente ecuación:

$$v = \frac{c}{n}$$

donde:

- **c** es la velocidad de la luz en el vacío (300.000 km/s),
- **n** es el índice de refracción,
- y **v** es la velocidad de las ondas electromagnéticas en el medio en cuestión.

Puesto que las ondas electromagnéticas pueden viajar por el vacío, no pueden transportar **materia**, en cambio sí que transportan **energía**. Si nos fijamos más detalladamente, una onda electromagnética está compuesta por dos campos eléctrico y magnético perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación de la onda:



En el gráfico superior:

λ = longitud de onda
E = amplitud del campo eléctrico
B = amplitud del campo magnético

La diferencia fundamental entre las diversas longitudes de onda es precisamente la **energía** de cada onda:

$$E = \frac{h\,c}{\lambda}$$

donde:

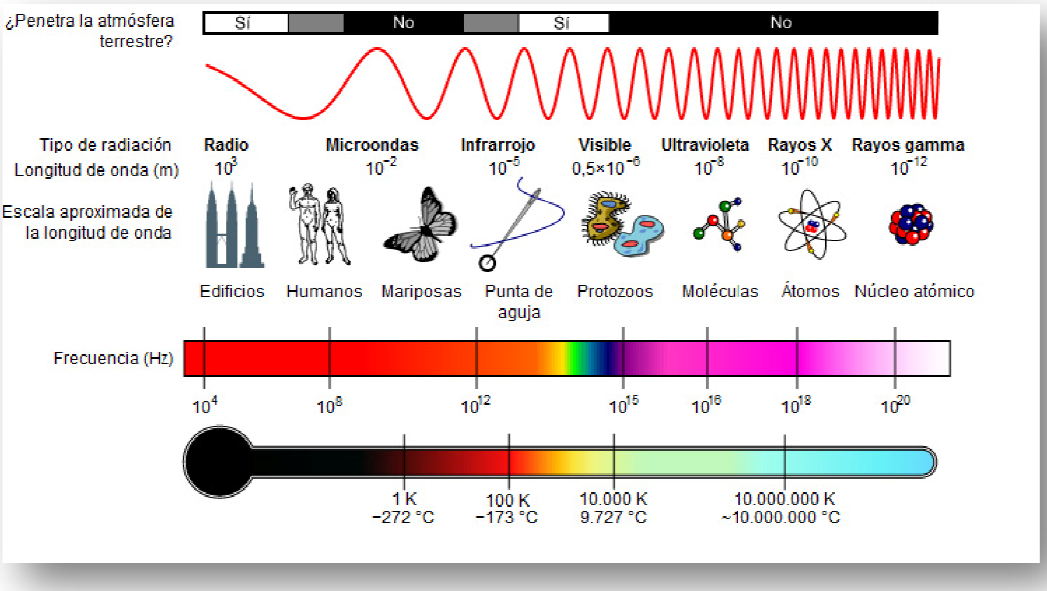
- **E** es la energía de la onda, medida en julios,
- **h** es la constante de Plack ($6{,}636 \cdot 10^{-34}$ J·s),
- **c** es la velocidad de la luz en el vacío (300.000 km/s)
- y **λ** es la longitud de onda

Como podemos comprobar, h y c son dos constantes, y en conclusión, la energía de la onda depende solamente de su longitud de onda.

Según dicha fórmula, las ondas más energéticas son aquellas con menor longitud de onda, o lo que es lo mismo, aquellas con mayor frecuencia (rayos gamma y rayos X).

iii. Espectro electromagnético

Se denomina **espectro electromagnético** a todo el rango de frecuencias que puede adquirir la radiación electromagnética. En el espectro, las ondas están ordenadas por longitud de onda o frecuencia.

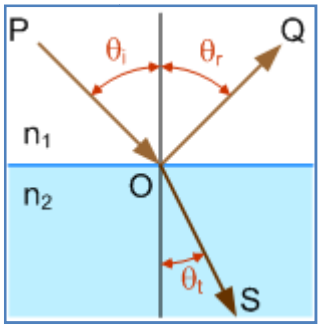


En la figura superior tenemos el espectro electromagnético ordenado desde las bajas frecuencias a la izquierda hasta las altas frecuencias a la derecha. La radiación electromagnética recibe distintos nombres atendiendo a la banda espectral donde se sitúe.

De menor a mayor frecuencia, tenemos: ondas de radio, microondas, infrarrojo, luz visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma, aunque cada una se puede subdividir en sub-bandas.

iv. Reflexión y refracción

Dos fenómenos muy habituales en óptica son los de **reflexión** y **refracción**. Estos fenómenos suceden cuando una onda electromagnética se encuentra con una superficie de separación de entre dos medios. Si ambos medios tienen diferentes índices



de refracción, parte de la onda se podrá reflejar y quedarse en el mismo medio (fenómeno de **reflexión**) mientras que otra parte de esa onda puede pasar al otro medio, y desviarse en un cierto ángulo (fenómeno de **refracción**).

En el caso de la reflexión, el ángulo (θ_i) que forma la onda incidente (viene representado por **P** en la figura adjunta) y el ángulo (θ_r) de la reflejada (**Q**) con la normal a la superficie de separación es exactamente el mismo. La onda reflejada tiene las mismas propiedades que la incidente.

En el caso de la refractada no se conserva el mismo ángulo (θ_t) con respecto a la vertical, sino que varía dependiendo del índice de refracción de ambos medios (n_1 y n_2) de la siguiente manera:

$$n_1 * \sin\theta_1 = n_2 * \sin\theta_2$$

Donde:

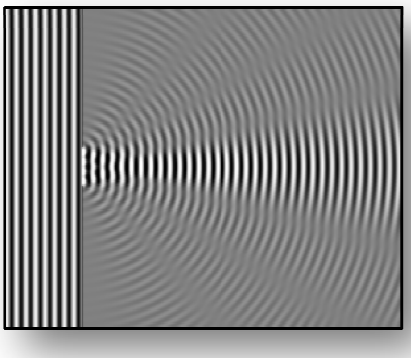
- n_1 es el índice de refracción del primer medio, y
- n_2 es el del segundo medio
- θ_1 es el ángulo de incidencia y
- θ_2 es el ángulo refractado

Además de cambiar de dirección, la onda también variará su velocidad, pues como vimos en el anterior capítulo, la velocidad es distinta para medios con distinto índice de refracción.

Mencionemos por último en este apartado la propiedad de **reversibilidad óptica**, por el cual, si incidimos un rayo sobre un punto P, sufriendo varias reflexiones y refracciones consecutivas hasta llegar a otro punto Q, al realizar el experimento en la forma inversa (desde Q) el camino que recorrerá la luz será el mismo.

v. Difracción

Además de los fenómenos que acabamos de describir, existe otro muy importante conocido como difracción, que deberemos conocer.

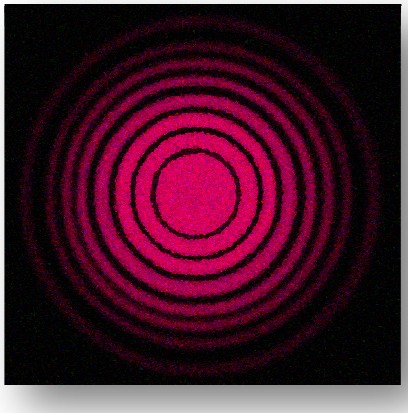


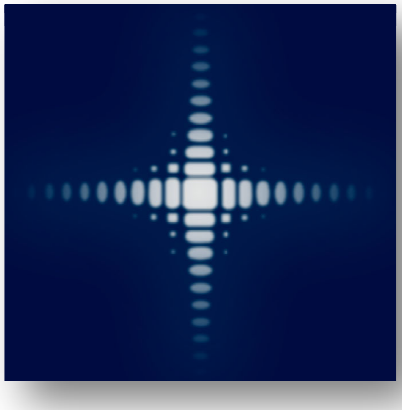
Lo tenemos representado a la derecha, donde un frente de ondas de radiación electromagnética incide en una superficie que tiene un hueco en una parte. Cuando según la teoría corpuscular los rayos solo deberían verse en una pequeña franja con la misma altura que la longitud del hueco, en la figura vemos que no pasa así, y que hay zonas oscuras y claras. Para explicar cómo funciona la difracción, tenemos que pensar que cuando avanza el frente de ondas, se vuelven

a crear ondas secundarias en cada punto del frente. Estas ondas secundarias, a su vez, continuarán avanzando, e interferirán constructiva o destructivamente sobra las ondas que se encuentren. Cuando decimos que interfieren nos referimos a que las ondas se suman. En el caso de interferencia constructiva, las ondas secundarias se encuentran ambas en sus máximos o en sus mínimos, entonces se suman y la resultante tiene el doble de amplitud. Si las ondas secundarias, al sumarse resultan formar una onda con menor amplitud que antes, entonces interfieren destructivamente.

Este fenómeno de la difracción hace que las sombras de los objetos y personas no sean completamente definidas, creando sombras "paralelas". No hay que confundir esto con que el foco emisor de luz sea más grande que un punto. Sobre estas líneas vemos el ejemplo de un foco emisor de luz situado cerca de una mano. La luz, a través de la difracción, crea esas sombras duplicadas proyectadas en la pared de al lado.

Cuando la luz pasa por aberturas circulares, obtenemos la figura de la izquierda, y cuando pasa por aberturas cuadradas, obtendremos la de la derecha. La figura de la derecha se conoce como **disco de Airy**, y lo veremos más adelante.

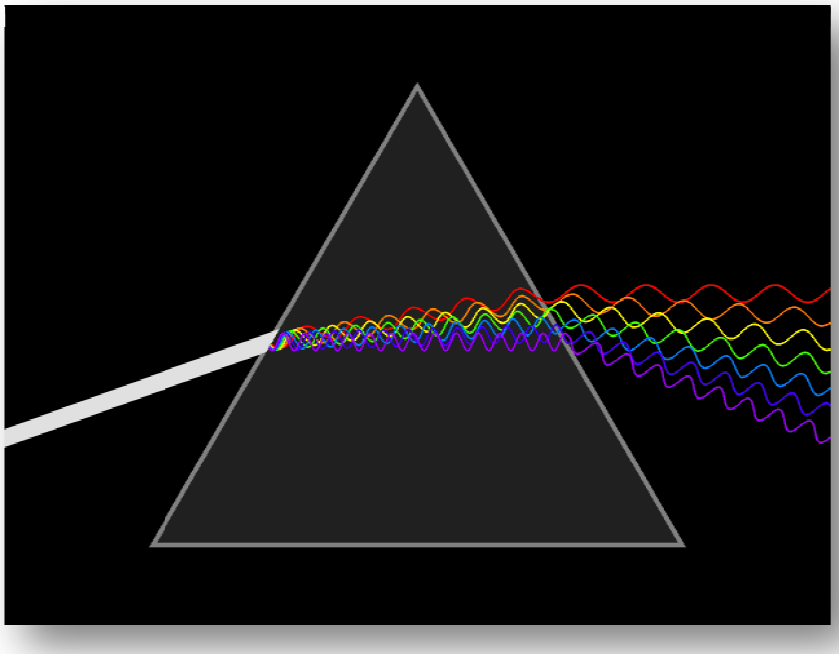




vi. Descomposición de la luz. Dispersión cromática.

El índice de refracción no solo depende del material por el que esté pasando la onda, sino también de la longitud de onda de la misma. De este modo las frecuencias más altas se refractan más. Si cogemos un prisma y hacemos pasar un rayo de luz de Sol

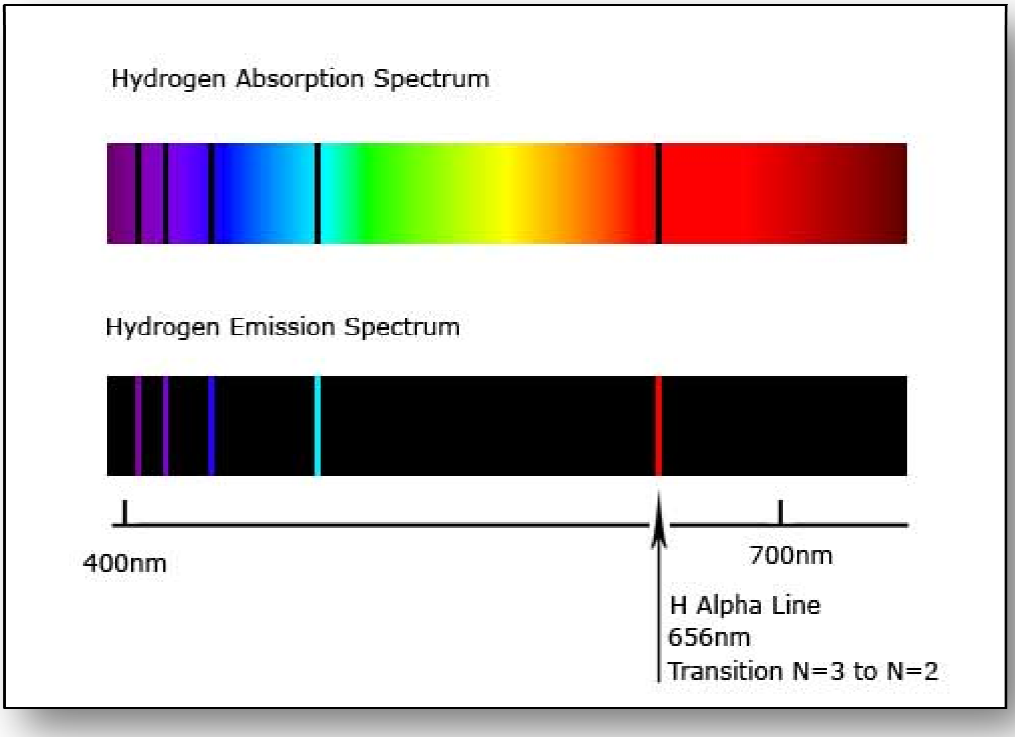
por él, notaremos cómo el haz aparentemente blanco incidente se refracta formando los colores del arco iris. El rojo es el color que menos se refracta, por lo que se desviará menos del rayo incidente, y el violeta es el más perjudicado. A esto se le llama **dispersión cromática**, porque la luz blanca (que contiene todos los colores) al atravesar la primera superficie de separación del prisma, hace que los colores se separen, cada uno en un ángulo diferente. Lo podemos ver más claramente en la figura siguiente:



vii. Espectros de emisión y absorción

Cuando hacemos pasar la luz blanca por el prisma, obtenemos todos los colores del arco-iris.

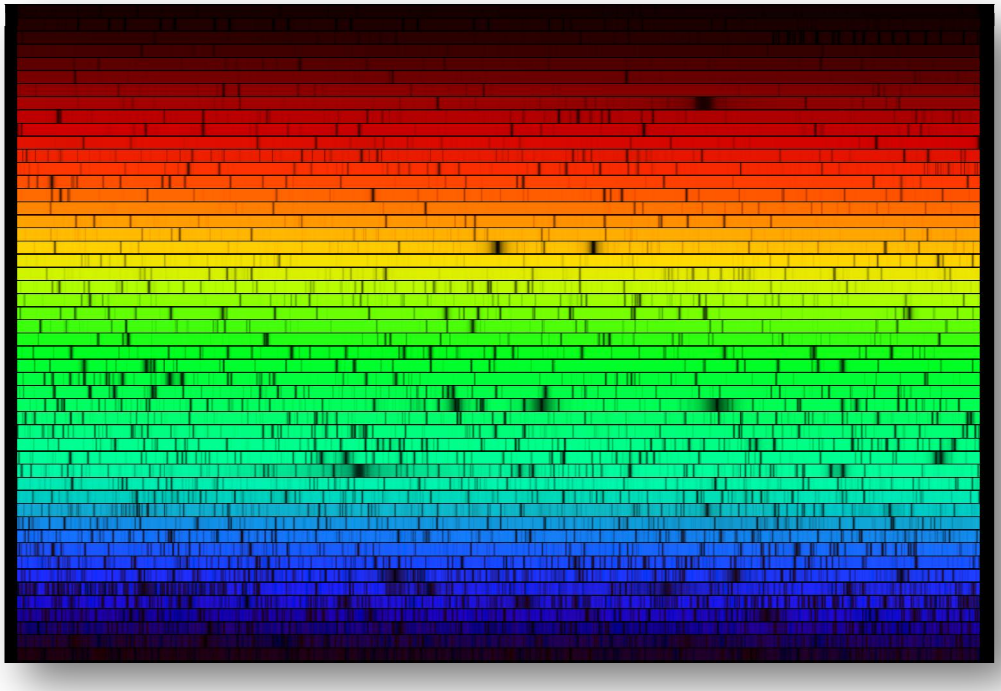
Introduzcamos ahora los conceptos de espectros de emisión y absorción. Si cogemos un foco emisor de luz blanca apuntando hacia un gas frío (por ejemplo, hidrógeno) y ese haz atraviesa de nuevo el prisma, ya no obtendremos el mismo arco-iris de antes, sino que en ese mismo espectro aparecerán líneas verticales oscuras. A este espectro lo llamamos **espectro de absorción**. Se llama así porque el hidrógeno ha absorbido unas determinadas longitudes de onda no aleatorias. En la figura inferior, el espectro de absorción se muestra arriba. Cada elemento de la tabla periódica tiene sus líneas de absorción siempre en las mismas partes del espectro (en las mismas longitudes de onda), y si combinamos en una misma nube de gases varios elementos, las líneas de absorción se sumarán. A menudo se suele decir que cada espectro de absorción es como un código de barras.



Ahora bien, estamos en otro caso en el que calentamos un gas, de manera que este gas comienza a radiar ondas electromagnéticas. Curiosamente, si cogemos un espectrógrafo, la figura que veremos será la opuesta a la de antes, donde ahora el gas emite en las longitudes de onda que antes absorbía. Estamos en el caso de la parte inferior de la figura adjunta. Es el **espectro de emisión**.

Mediante el estudio de los espectros de los objetos celestes, podemos abarcar una rama de la astronomía muy interesante: la **espectroscopia astronómica**. Gracias a esta rama, en el siglo XIX se descubrieron elementos en las estrellas que antes no se habían visto en la Tierra, como el helio.

A continuación presentamos el espectro de absorción solar visto desde la superficie terrestre. No solo están presentes las líneas de absorción debido al propio Sol, sino además por la propia atmósfera terrestre, que absorbe parte de esa luz, bloqueando su llegada a nosotros.

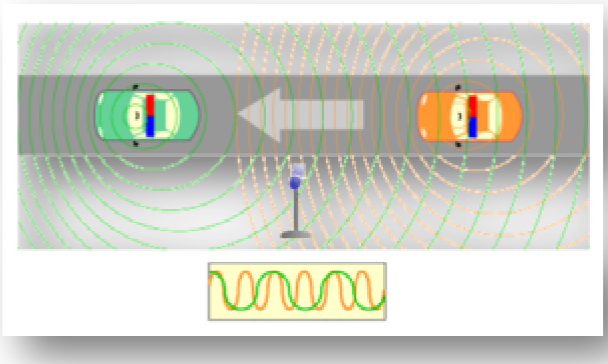


Cuando estudiamos las estrellas mediante el espectro de absorción, nos damos cuenta de que emiten en casi todas las longitudes de onda (**espectro continuo**) con varias líneas de absorción discretas. El estudio de multitud de estrellas llevó a la división de las mismas en tipos espectrales (O, B, A, F, G, K, M).

Hoy en día se usa esta ciencia para estudiar diversas propiedades estelares: distancia, edad, luminosidad, etc. También podemos estudiar las atmósferas de los planetas que hay más allá del sistema solar (planetas extrasolares) o estudiar las propias nubes moleculares.

viii. Efecto Doppler

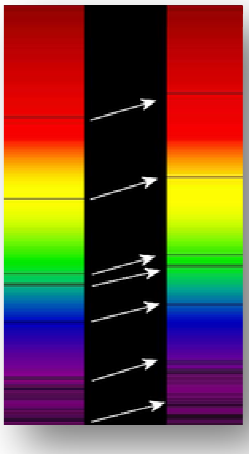
Una aplicación importante de la espectroscopia astronómica es el **efecto Doppler**. Antes de explicar dicho efecto en la radiación electromagnética, pensemos en el efecto Doppler aplicado al sonido.



Cuando vemos acercarse un coche de policía, el sonido nos va pareciendo cada vez más grave. Lo percibimos de esta manera porque las ondas en primer lugar se comprimen mientras se va acercando el coche, y al pasar por nuestro lado se van

separando cada vez más. Al comprimirse las ondas, el sonido se hace más agudo, y al separarse, se hace más grave.

Algo parecido pasa con la luz, aunque no es un fenómeno que podamos visualizar en casos normales. Por ello, tenemos que alzar la vista a las estrellas para poder ver ejemplos prácticos. Cuando una estrella se acerca mucho a nosotros, las ondas electromagnéticas esféricas se comprimen mucho más que si la estrella estuviera detenida. Y cuando se aleja esa estrella, las ondas se separan más desde nuestro punto de vista. En el caso del acercamiento, la luz de la estrella pasa a tener una longitud de onda más corta, por lo que su luz se hace más azul. Y cuando se aleja, la luz se hace más roja (**corrimiento al rojo**, o desplazamiento al rojo).



Recordemos el concepto de espectro del anterior capítulo y juntémoslo ahora con el otro concepto de efecto Doppler. Observamos una estrella que gira en torno a otra. Cuando dicha estrella se está acercando a nosotros, sus líneas de absorción se desplazan hacia el azul, mientras que cuando se aleja de nosotros, se desplazarán hacia el rojo. En la figura de la izquierda podemos verlo más claramente.

Los astrónomos han estudiado muchísimas galaxias, y han comprobado cómo mientras nos vamos alejando de la Vía Láctea, las galaxias tienen espectros más desplazados al rojo. Por ello, llegamos a la conclusión de que por lo general, todas las galaxias se alejan de la nuestra (sin embargo en nuestro Grupo Local de Galaxias no ocurre esto, ya que domina la gravedad). Y no solo eso, sino que además las galaxias, cuanto más alejadas están de la nuestra, más rápido se alejan de nosotros. Por este motivo, los científicos pensaron que las galaxias provenían de un mismo lugar, y dicho lugar sería el punto de inicio de todo lo que hay en el Universo, el resultado del **Big Bang**.

ix. Temperatura de las estrellas

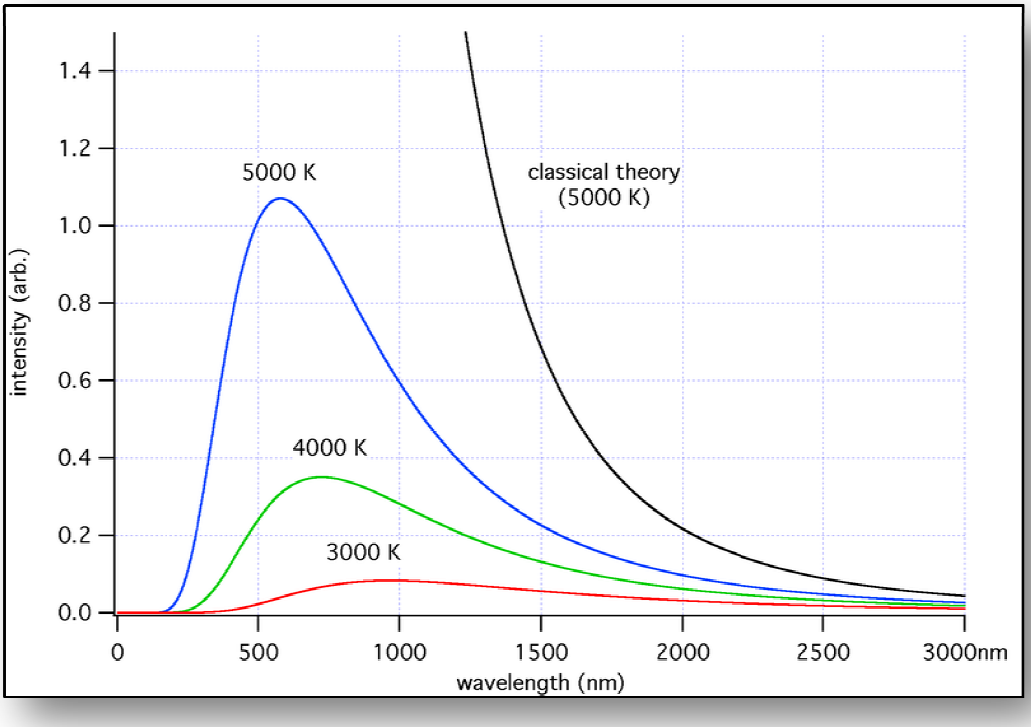
No podemos salir al espacio para medir la temperatura de las estrellas. Entonces ¿cómo lo hacemos?

Cuando calentamos un objeto, las partículas que lo forman se moverán más deprisa, emitiendo más radiación. Si lo enfriamos haremos justamente lo contrario, y emitirá menos radiación electromagnética.

Por esta razón, solo tenemos que estudiar la distribución de radiación en el espectro para conocer la temperatura del objeto. Porque todos los objetos emiten radiación.

A menudo los físicos hablan de **cuerpo negro** para referirse a un objeto que absorbe toda la radiación que le llega y después emite un espectro de radiación dependiente de la temperatura del cuerpo. En este concepto de cuerpo negro, obviamos por lo

tanto las líneas de absorción. Y el modo en el que vuelve a emitir esta energía a lo largo del espectro es lo que se denomina como **radiación del cuerpo negro**. El cuerpo negro es un objeto inexistente en la naturaleza, pero lo usamos de modelo para describir las estrellas. El pico de la radiación del cuerpo negro se desplaza hacia frecuencias más altas (o hacia longitudes de onda más cortas) cuanto más caliente esté el cuerpo. El siguiente gráfico nos ayudará a entenderlo, vemos como para un cuerpo de 3000 K (0 kelvin equivale a -273,15ºC, y 273,15 K equivalen a 0ºC; en este caso, 3000 K son 2727ºC) el espectro emitido lo percibimos más rojizo (adentrándose una buena parte en el infrarrojo y más allá), mientras que para el caso de un cuerpo de al menos 6000 K (5727ºC) la radiación se hace más azulada.



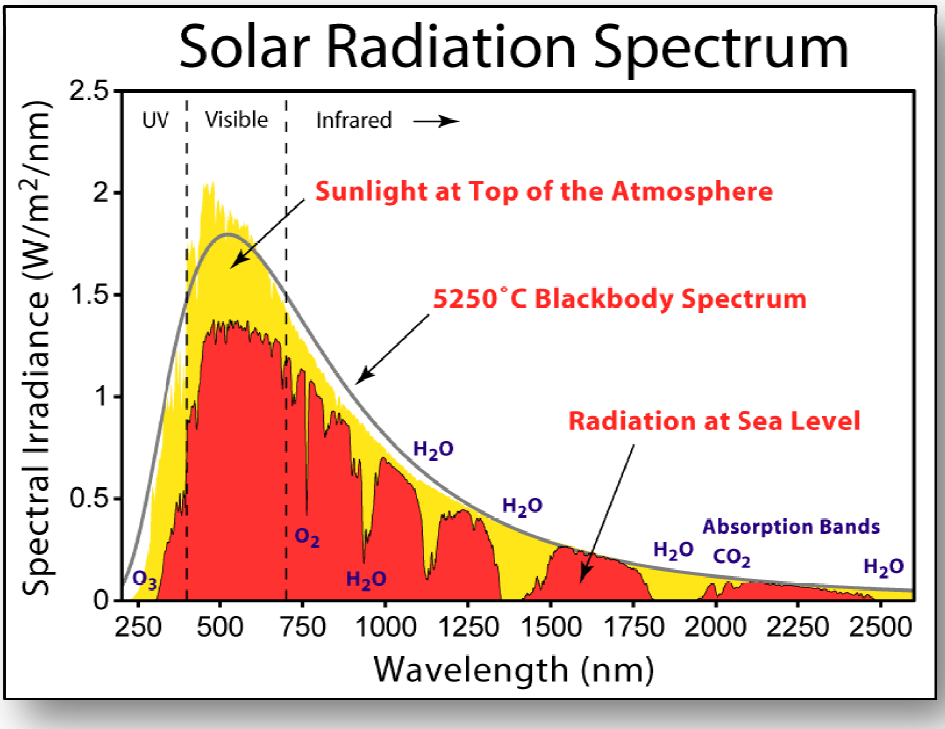
Las **estrellas** se pueden modelar como cuerpos negros, y de esta manera podemos determinar la temperatura de cada una de ellas. Al igual que para estrellas de en torno a 3000 K el espectro toma valores considerables en el infrarrojo, para estrellas mucho más caliente de alrededor de 30000 K, la radiación emitida es en gran parte del ultravioleta.

d. Nuestra atmósfera

i. Opacidad atmosférica. Ventana óptica.

Nuestra atmósfera actúa como un filtro sobre la radiación electromagnética que nos llega del espacio, debido a que las partículas que forman la atmósfera actúan sobre dicha radiación, absorbiéndola. Se han hecho estimaciones acerca de la absorción a diferentes niveles de altura, y en la siguiente gráfica podemos ver cómo varía la

medición del espectro de radiación solar dependiendo de la altura (en el límite superior de la atmósfera y a nivel de mar):



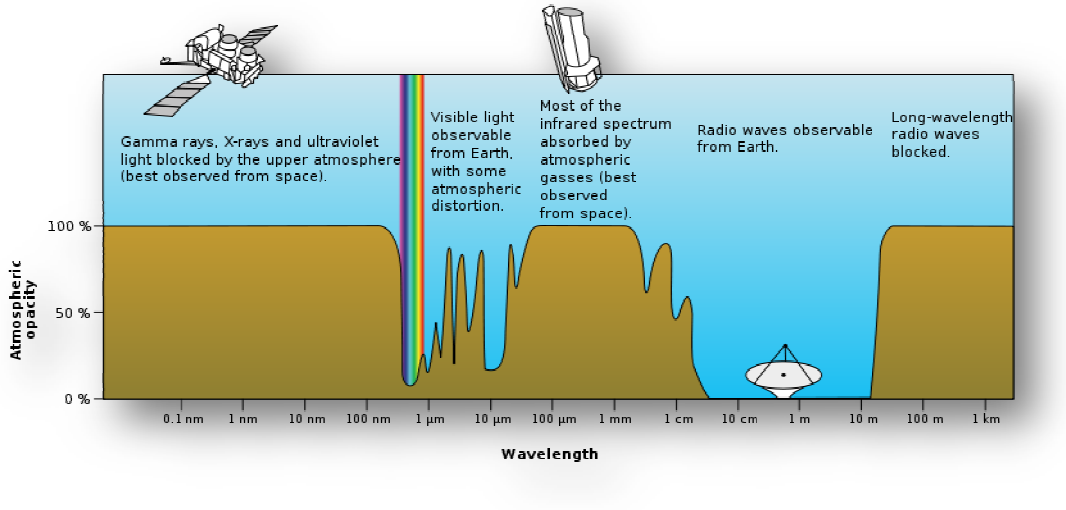
Este gráfico representa la **radiación solar** en amarillo, la línea gris es la de un cuerpo negro de 5778 K [5505ºC] (la temperatura superficial del Sol) y la parte roja corresponde a la radiación solar a nivel del mar. Observamos que en determinadas frecuencias se ha producido una absorción casi total de la radiación solar, y se debe precisamente a los compuestos etiquetados en la foto: agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) y ozono (O_3).

El Sol emite en más partes del espectro, sin embargo la energía se concentra entre 0,15µm y 4µm, donde agrupa un 99% de toda la radiación solar. Esta parte del espectro se corresponde con el ultravioleta, luz visible e infrarrojo.

La **radiación ultravioleta** es perjudicial para nuestra salud. Gracias a la absorción producida por el ozono y el oxígeno a tales frecuencias, llega muy atenuada a la superficie de la Tierra. Pero aun así no debemos bajar la guardia, sobre todo al permanecer durante largos periodos de tiempo en la montaña. En la playa, por ejemplo, aun estando debajo de una sombrilla, el riesgo es muy importante debido a que el ultravioleta se dispersa mucho en la atmósfera (lo veremos más adelante en el apartado del esparcimiento de Rayleigh).

Cuando hablamos de radiación electromagnética, tratamos a la atmósfera como si de un gran muro entre la Tierra y el espacio se tratara. Y en ese muro hay determinadas zonas del espectro que atraviesan la atmósfera. A dichas zonas las llamamos

"**ventanas atmosféricas**". Por ejemplo, la "**ventana óptica**" es la zona del espectro donde la luz visible pasa casi sin atenuarse. Otras zonas, en cambio, no dejan pasar nada de radiación, en este caso hablamos de zonas opacas. A continuación tenemos un gráfico donde podemos ver las ventanas que ofrece nuestra atmósfera a todo el espectro electromagnético:



En astrofísica, no solo la luz visible es importante, sino cualquier otro tipo de radiación electromagnética. Como se desprende de la gráfica anterior, a la Tierra solo nos llega la luz visible, parte del infrarrojo y las ondas de radio. Todo lo demás lo absorbe la atmósfera. Por tanto, la solución para el estudio de los objetos celestes pasa por lanzar telescopios espaciales que puedan escudriñar el firmamento sin ningún tipo de impedimento óptico.

Esto quiere decir que si observamos en lugares altos, estaremos evitando parte de la absorción atmosférica, y podremos captar la radiación electromagnética con más claridad que a nivel de mar.

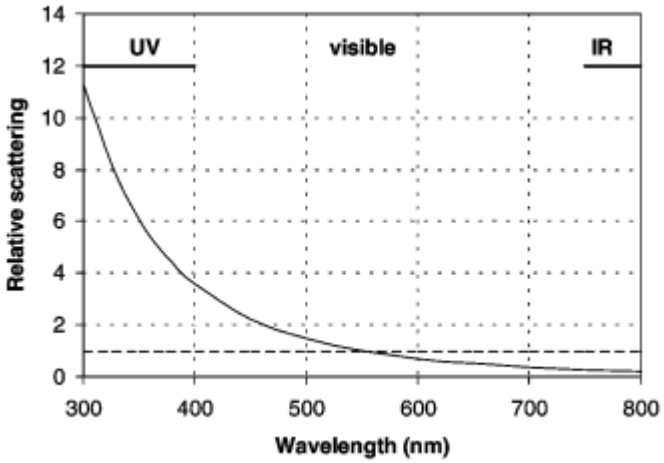
ii. Esparcimiento de Rayleigh

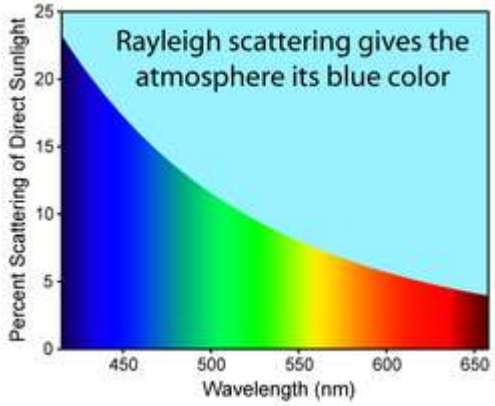
El esparcimiento de Rayleigh se trata de la dispersión de la radiación electromagnética por partículas menores que la longitud de onda de los fotones dispersados.

En la siguiente gráfica se muestra el nivel de dispersión relativo en la parte del espectro visible. Conforme pasamos a longitudes de onda mayores, la dispersión se va atenuando cada vez más.

En la gráfica, el valor de la dispersión es relativo a la longitud de onda en el que el ojo humano tiene su mayor sensibilidad: el verde.

El nivel de esparcimiento de Rayleigh es proporcional a la potencia cuarta de la longitud de onda de la luz.





Esta dispersión es la responsable de que el **cielo** lo veamos **azul**, pues las frecuencias que más se dispersan son las más cercanas al azul, tiñendo el cielo de ese color, mientras que el Sol nos llega con un tono más rojizo, al haberle eliminado sus componentes espectrales cercanas al azul.

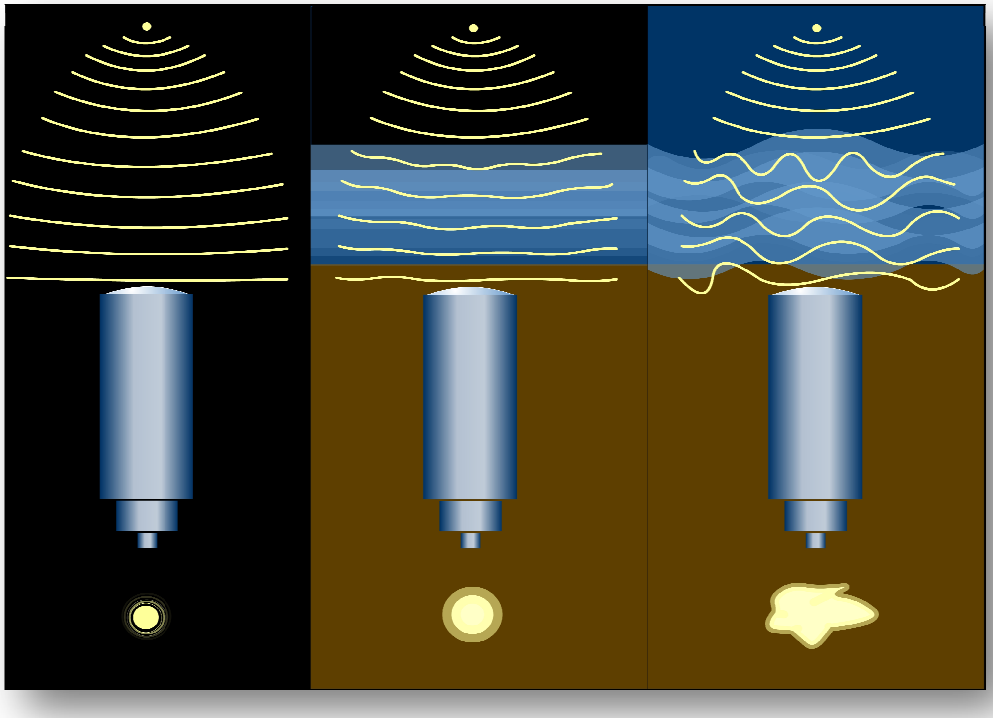
Si lanzamos dos haces lásers desde el espacio apuntando hacia nosotros, y cada uno de ellos de un color distinto, por ejemplo rojo y azul, veremos cómo el haz rojo la atraviesa sin mayores complicaciones, mientras que el haz azul habrá sufrido bastante dispersión y llegará debilitado.

Esto se usa en astronomía infrarroja, aprovechando una parte del espectro electromagnético que apenas se ve alterado por la dispersión atmosférica.

iii. Titilación de las estrellas. Seeing y transparencia.

Acabamos de ver que la atmósfera actúa como un filtro que nos obstaculiza en demasiados aspectos. Diversos fenómenos se dan en la atmósfera que impiden que obtengamos una visión clara del espacio. Y a todo esto hay que añadir un fenómeno más: la **titilación** de las estrellas, que se traduce como el parpadeo de esos puntos brillantes en el cielo.

¿Por qué parpadean las estrellas? Los cambios bruscos del viento en las capas atmosféricas, conocidos como **turbulencias**, provocan que la imagen de las estrellas no llegue siempre al mismo lugar, ya que se refracta por diversos caminos al estar las capas atmosféricas en constante movimiento. Este fenómeno se conoce como ***seeing***, y hace que en lugar de un punto fijo veamos un punto que baile ante nuestros ojos. Lo vemos ilustrado a continuación:



A la izquierda tenemos el caso ideal en el que la atmósfera está completamente estable, y el rayo de luz pasa sin perturbarse hasta llegar a un telescopio. Si las condiciones son como las descritas, por el ocular observaremos un **disco de Airy**; en el peor de los casos (a la derecha), en lugar de un disco de Airy observaremos una mancha que irá cambiando de forma constantemente.

Pero, ¿por qué las estrellas parecen parpadear y los planetas no? Este comportamiento se debe a la enorme diferencia en la distancia a la cual se encuentran los objetos: las estrellas atraviesan la atmósfera como simples puntos (exceptuando el Sol, por supuesto) mientras que los planetas, al estar mucho más cerca de la Tierra, lo hacen como pequeños discos. Las perturbaciones de la atmósfera en las estrellas será mucho más evidente que en los planetas.

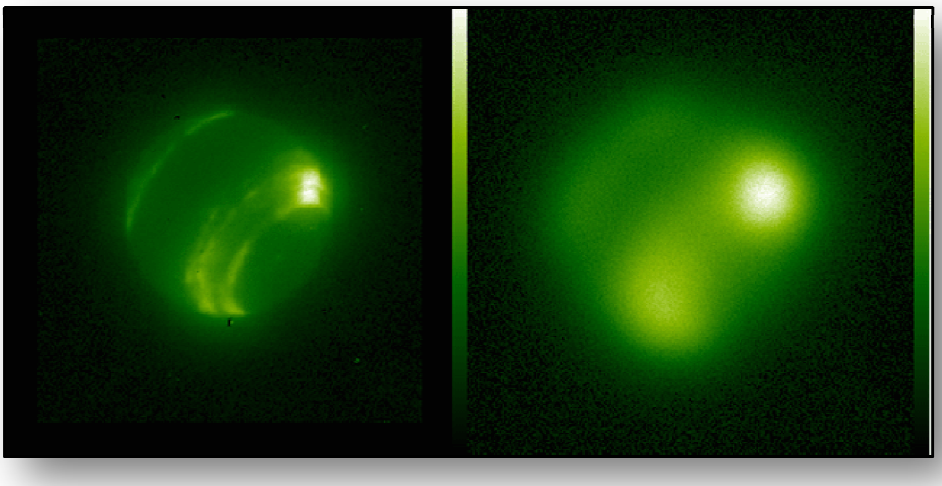
Si hemos hablado ahora de *seeing* (significa "visión" en castellano), debemos hablar de otro parámetro conocido como **transparencia**. Éste nos dice lo oscuro que tenemos el cielo que estamos contemplando. Influyen las nubes, la contaminación lumínica, la altura a la que observamos, etc. Se puede dar el caso de que tengamos una buena transparencia y muy mal *seeing*, y viceversa.

iv. Óptica adaptativa

Recientemente se ha introducido en la óptica de los telescopios una novedosa técnica conocida como **óptica adaptativa**. Esta técnica consiste en corregir los defectos de la atmósfera mediante la utilización de un espejo deformable que "imite" la atmósfera para obtener imágenes más nítidas y mejorar la resolución espacial.

Y más recientemente se ha incorporado esta técnica a la astronomía amateur.

A continuación se muestra el planeta Neptuno observado con el telescopio Keck en la banda de metano. A la izquierda, la imagen obtenida con el sistema de óptica adaptativa. A la derecha, la imagen sin corregir. Como se puede apreciar, los resultados son excepcionales.



v. El Universo con otros ojos. Telescopios espaciales

El Universo está siendo estudiado en la actualidad en todas las partes del espectro, ya que cualquier información que llegue tanto a los telescopios terrestres como a los espaciales es de vital importancia para comprender los procesos que se dan lugar en el Universo. Aunque la luz visible ha sido la protagonista a la hora de contemplar la maquinaria del Universo, a continuación exponemos las razones por las que resulta conveniente analizar el cielo en otras longitudes de onda:

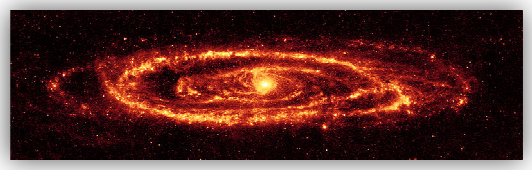
En las **ondas de radio**, por ejemplo, podemos estudiar las radiogalaxias, o los púlsares (cadáveres de estrellas). En el estudio de las **microondas** hemos podido dar pasos de gigantes en cosmología. El **infrarrojo** nos permite entre otras cosas estudiar las protoestrellas (estrellas de nueva formación). Saltando al **ultravioleta**, estas longitudes de onda son importantes para determinar la composición del medio interestelar, así como de la evolución de las galaxias. Seguimos por los **rayos X**, que es el lugar del espectro emitido por unas fuentes muy energéticas: los agujeros negros. Y ya por último, en el extremo tenemos los **rayos gamma**, las emisiones más poderosas de todo el Universo, que se da en los Estallidos de Rayos Gamma (GRB).

Todas estas cosas son solo una pequeña parte de lo que podemos estudiar de los objetos celestes.

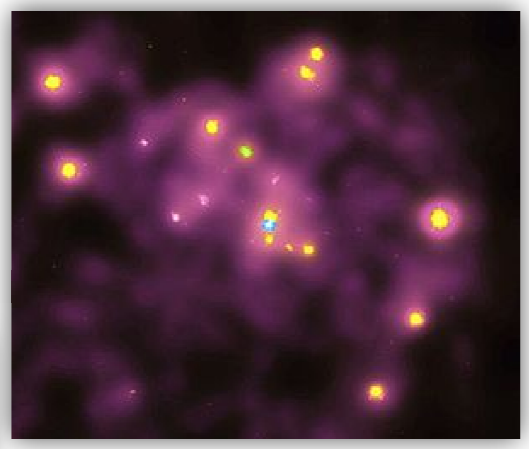
Para poder estudiar todo eso y mucho más, hacemos uso de grandes telescopios terrestres cuando la absorción de la atmósfera nos lo permite, y cuando no, el ser humano lanza telescopios espaciales para estudiar esas radiaciones. Estos telescopios espaciales son, por ejemplo, el Hubble, Chandra, SOHO, Spitzer, Kepler, etc.

Como muestra del estudio del Universo en diferentes partes del espectro electromagnético, presentamos a continuación la **galaxia de Andrómeda** vista en el infrarrojo, en luz visible, ultravioleta y rayos X (aunque solamente el núcleo galáctico):

Galaxia de Andrómeda en luz ultravioleta



Galaxia de Andrómeda en infrarrojo



Núcleo de la galaxia de Andrómeda en rayos X

Galaxia de Andrómeda en luz visible

2. El ojo y la visión

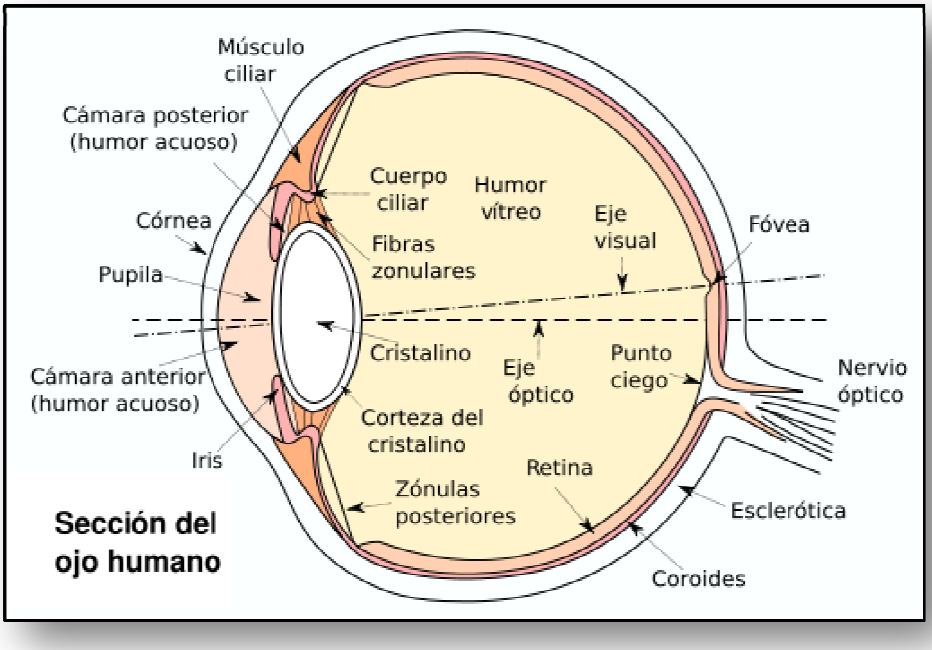
a. Introducción

Ahora que hemos analizado la atmósfera terrestre y de sus inconvenientes para la astronomía, toca hablar del instrumento de observación por excelencia: el ojo humano. Entraremos en profundidad para conocer los detalles más interesantes del ojo, la respuesta del mismo ante condiciones de oscuridad y claridad, ante las variaciones de iluminación. Veremos también algunas de las enfermedades presentes en el ojo.

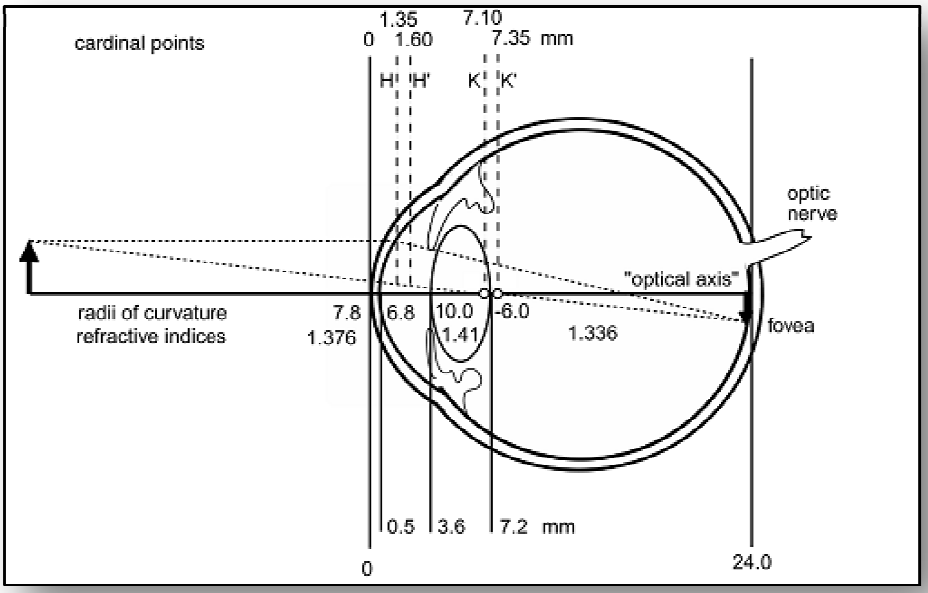
También hablaremos de los punteros láseres cada vez más extendidos en la actualidad. Es imprescindible conocer el ojo para poder conocer la instrumentación astronómica, pues al fin y al cabo todo se ha diseñado atendiendo a las características y necesidades de este órgano humano.

b. Anatomía del ojo. Acomodación. Enfermedades.

Para conocer el funcionamiento del ojo humano, antes tenemos que estudiar su anatomía. Echemos un primer vistazo a su estructura:



En la siguiente figura tenemos el recorrido de la luz a través del ojo. Tanto esta figura como la siguiente nos ayudarán a asimilar todos los conceptos que vayamos a recoger.



Si observamos un objeto situado a una distancia determinada del ojo, la luz que nos llegue pasará a través de la **córnea**, después atravesará el **cristalino**, y se enfocará en la **retina** del ojo humano, la superficie interior de dicho órgano. En la retina estimulará a los **fotorreceptores**, convirtiendo la señal luminosa del mundo exterior en impulsos nervioso, que los nervios se encargarán de enviar al cerebro para descifrar el objeto visualizado.

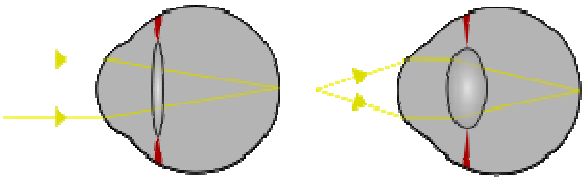
Vayamos paso por paso:

La **córnea** es la superficie transparente exterior del ojo humano, y tiene forma esférica. Sirve para proteger al iris y al cristalino.

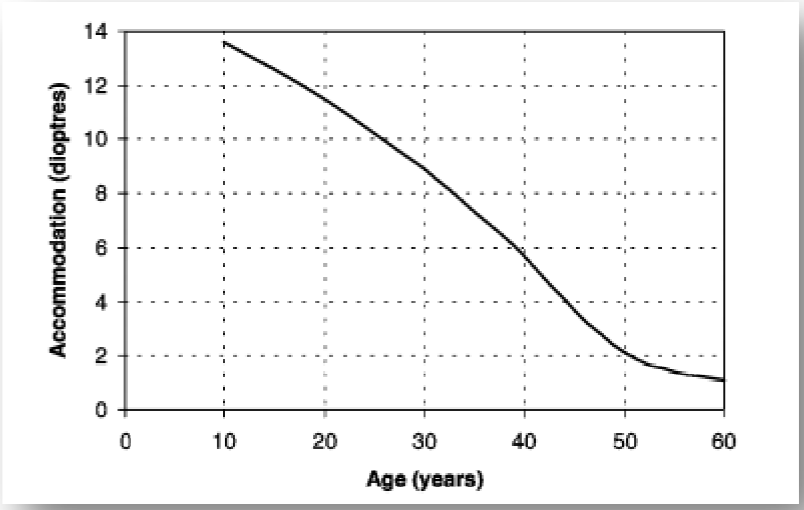
Cuando atraviesa la córnea, la luz pasa por la **pupila**, que es el hueco situado en el centro del iris. El **iris** actúa como regulador de la cantidad de luz que nos entra en el ojo, contrayéndose y dilatándose. En las cámaras fotográficas el equivalente al iris es el diafragma.

Tras pasar por la pupila, el siguiente elemento visual es el **cristalino**, una lente biconvexa que dependiendo de la distancia a la cual estén los objetos, trata de enfocarlos en la retina. En el enfoque no solo contribuye el cristalino, sino también la córnea recién mencionada. El cristalino está unido al músculo ciliar, este músculo se contrae para permitir enfocar los objetos situados más cerca de nosotros (**acomodación**).

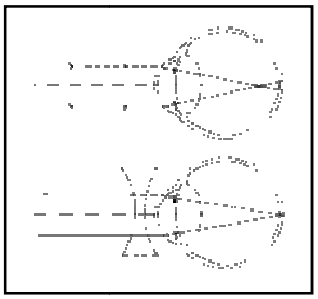
En el momento de máxima contracción, el cristalino presenta una forma más esférica. Lo vemos más claramente en la figura siguiente:



Con la edad, el cristalino pierde flexibilidad, y le cuesta enfocar los objetos, perdiendo su acomodación (ver gráfico inferior). Esto es lo denominado como **vista cansada**, o **presbicia**. No es el único inconveniente de la edad, pues además de perder flexibilidad, el cristalino también pierde transparencia que hace disminuir el poder de transmisión del ojo humano (**catarata**).

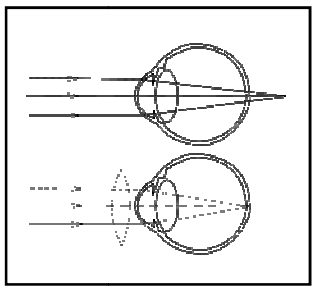


Cuando la luz pasa por el cristalino, los rayos llegan a la retina, donde los diferentes tipos de fotorreceptores (**conos** y **bastones**) captarán la luz para transmitir impulsos nerviosos al cerebro. Aunque la luz del objeto llega a la retina invertida, el cerebro se encarga de enderezar la imagen.



Ojo con miopía y su corrección

Otro problema que se presenta a menudo en la visión humana es que el cristalino no consiga enfocar la imagen justo en la retina, sino que lo haga justo antes (**miopía**) o justo después (**hipermetropía**). La condición ideal del ojo en ausencia de miopía e hipermetropía se conoce como **emetropía**. En esta condición ideal, los objetos situados en el infinito se enfocan en la retina sin ayuda de gafas y sin que el músculo ciliar tenga que hacer ninguna



Ojo con hipermetropía y su corrección

contracción.

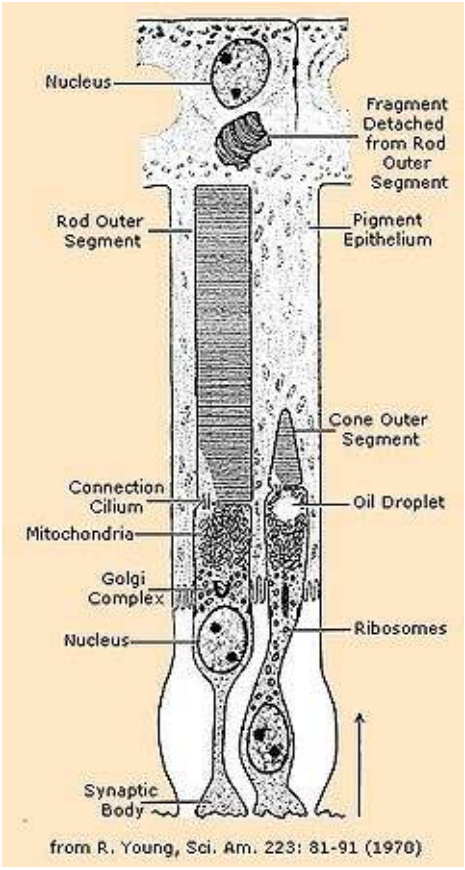
La exposición a la luz ultravioleta es perjudicial para el ojo, pues puede ocasionar daños a la córnea, cristalino y retina. Los efectos acumulativos de la radiación ultravioleta en el cristalino potencian la formación de catarata en el ojo humano.

c. Fotorreceptores

i. Aspecto de los fotorreceptores. Distribución. Punto ciego. Resolución.

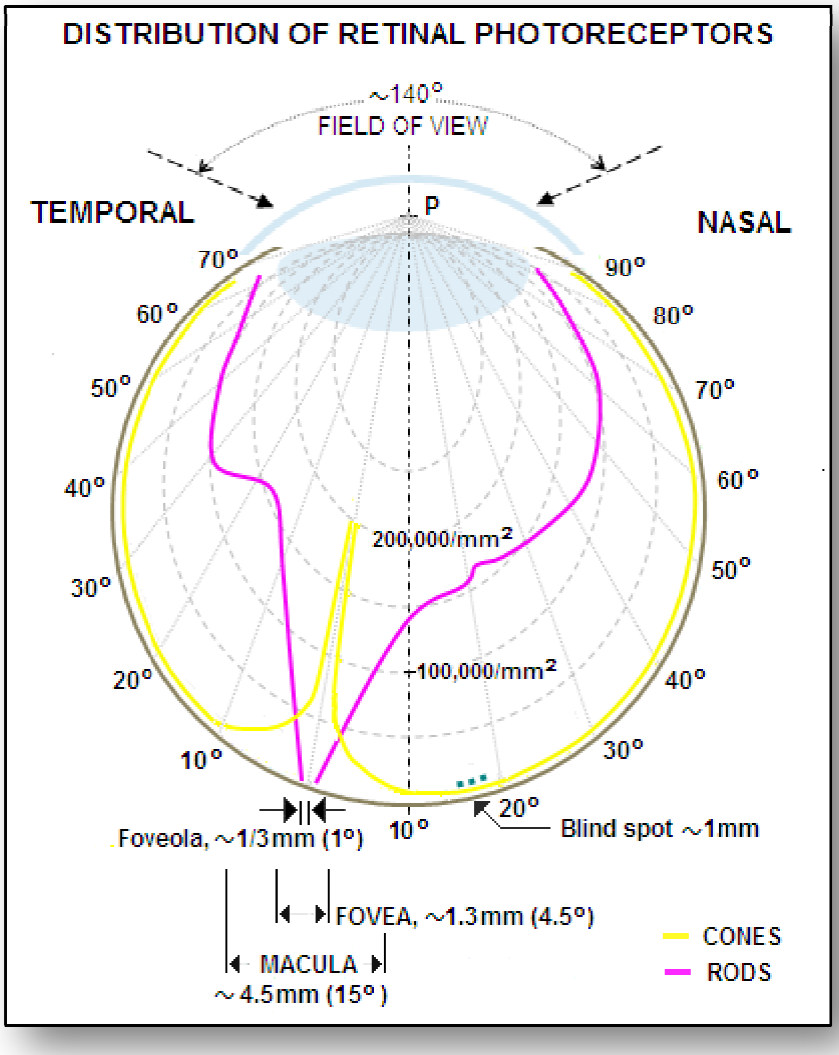
En la retina de nuestro ojo se sitúan los fotorreceptores, que son los encargados de captar la luz y transmitir la señal al cerebro, para que se nos forme una imagen en él de lo que estamos visualizando. Constituyen una parte fundamental del sistema visual humano, y cualquier defecto en los fotorreceptores se traduce en una imagen distorsionada de la realidad percibida por los humanos.

Hay dos tipos de fotorreceptores: los **conos** y los **bastones**, que se denominan así por el aspecto que presentan. En la figura siguiente lo podemos ver, la flecha indica el sentido de entrada de la luz en la retina.



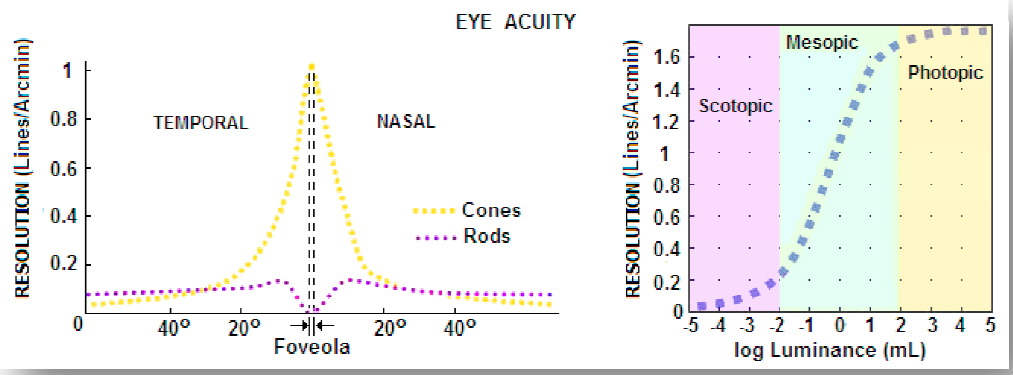
El tamaño de los fotorreceptores se incrementa conforme nos vamos alejando del centro de la **fóvea**. En la fóvea se concentran la mayor parte de los **conos**, mientras que al alejarnos de la misma, la concentración va menguando rápidamente. En cambio, con los **bastones** ocurre lo opuesto. En la fóvea la concentración de bastones es casi nula, y al alejarnos encontramos un pico de concentración de bastones en torno a los 18º de la

fóvea. Para ver más claramente la distribución de conos y bastones, debemos fijarnos en el siguiente gráfico:



En la retina tenemos un **punto ciego** creado por la papila óptica, que es por donde sale el nervio óptico, o por decirlo de alguna manera, por donde van todos los "cables" con la información visual en forma de impulsos eléctricos al cerebro. El punto ciego mide en la retina aproximadamente 1 mm, y aunque nos impide ver una determinada región de nuestra visión, nuestro cerebro se encarga de arreglar el defecto integrando las zonas cercanas de visión, es decir, el cerebro se inventa la parte que no ve.

Hemos visto la distribución de fotorreceptores en la retina, pero no conocemos su resolución. Aquí también diferenciamos el caso de los conos de los bastones, al comportarse ambos de distinta manera. Veamos el siguiente dibujo:



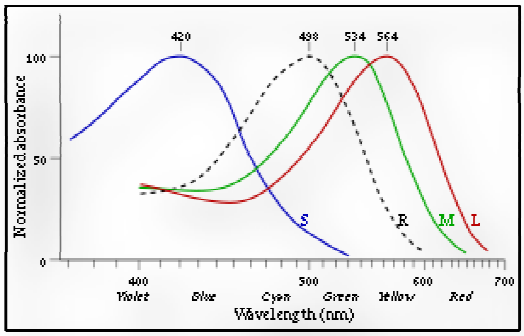
Hemos comentado antes un par de aspectos. Por un lugar que los conos se concentran sobre todo en torno a la fóvea, y que a medida que nos alejamos de ella disminuye su número. Por otro lado, también hemos dicho que el tamaño de estos aumenta al alejarnos de la fóvea. ¿Qué quiere decir? Que al alejarnos de ella, al ser más grandes y menos numerosos, la resolución que tenemos de la visión gracias a los conos va disminuyendo, lo que se corresponde con la línea discontinua amarilla de la gráfica.

Ahora vamos con el caso de los bastones. La resolución es muchísimo más pequeña que la de los conos. ¿A qué se debe esto? Pues mientras que los conos pueden enviar individualmente una señal luminosa, varios bastones comparten esas señales entre sí, así que tanto si excitamos un bastón como otro que se encuentra muy próximo a ese otro, es bastante probable que el cerebro lo interprete de la misma manera. Por esta razón, la **resolución** de los bastones es mucho menor que la de los conos, y en la zona de mayor concentración de bastones no hay ninguna subida apreciable en su resolución.

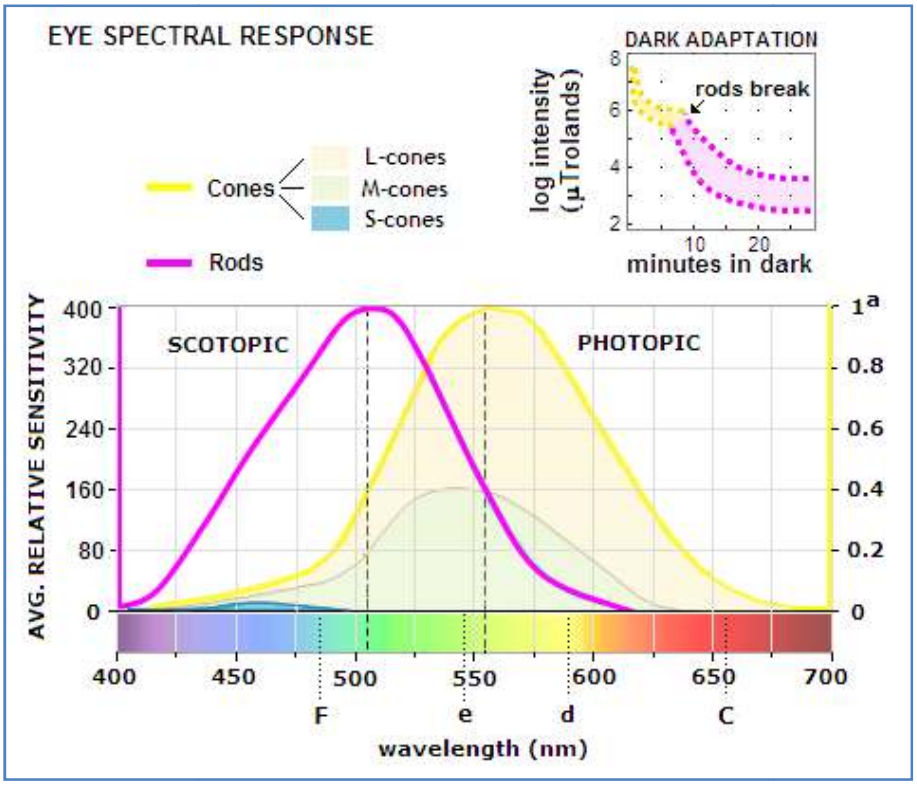
ii. Conos. Visión fotópica.

En condiciones de iluminación diurna, la pupila está contraída, y la luz le llega a los conos principalmente. Hay tres tipos de conos: S, M y L. La diferencia se debe al tipo de opsina [es un tipo de proteína] del que esté compuesto cada cono. S (Short-wavelengths sensitive = sensibles a longitudes de onda cortas), M (Medium-wavelengths sensitive = sensibles a longitudes de onda medias) y L (Large-wavelengths sensitive = sensibles a longitudes de onda largas) hacen referencia a las longitudes de onda que pueden captar.

Los conos S son más sensibles al azul, los M al verde, y los L al rojo. La absorción relativa de cada cono la podemos ver en la siguiente gráfica:



Si sumamos la respuesta de cada tipo de cono, obtendremos en este caso la curva amarilla de la siguiente gráfica. La visión en este caso se llama **fotópica**.



iii. Bastones. Visión escotópica y mesópica.

Cuando las condiciones de iluminación son escasas, la pupila se dilata, permitiendo el paso de más luz hacia más partes de la retina. Esto permite llegar la luz a las zonas de máxima concentración de bastones, que son células que necesitan menos luz para activarse. En estas condiciones (**visión escotópica**) los conos no llegan a activarse, y solamente funcionan los bastones.

Los bastones son todos del mismo tipo, al tener el mismo pigmento. Al ser del mismo tipo, el cerebro no tiene la opción de "construir" los colores de la escena, y estamos viendo en blanco y negro. En la figura anterior teníamos la curva de sensibilidad de

los bastones, que difiere de la visión fotópica en que está desplazada hacia el violeta y posee mayor sensibilidad.

Este es el motivo por el que al estar situados en un lugar muy oscuro, somos incapaces de reconocer los colores. Si miramos la Nebulosa de Orión, por ejemplo, la veremos visualmente como de un color grisáceo. Sin embargo, solo hace falta un breve periodo de exposición fotográfico para poder captar su color rosáceo. El ojo es poco sensible al color en condiciones nocturnas, pero las cámaras fotográficas no. Otro aspecto a destacar es que el ojo humano no ve por el telescopio lo que observamos en las fotografías de libros de astronomía y webs de esta temática, algo que suele decepcionar bastante a la hora de mirar por el ocular. Detrás de cada foto hay un trabajo de posiblemente horas, tanto en la captación de imágenes como en el procesado.

En condiciones intermedias de iluminación, hablamos de visión mesópica.

iv. Visión logarítmica

Al tratar con las matemáticas, podemos hablar de sistemas lineales o sistemas logarítmicos. Para asimilar esto mejor, pongamos una analogía que nos ayude a comprenderlo. Un día vamos a una frutería, y vemos que junto a ella han abierto otra en la que el sistema de venta es distinto. Una de ellas ofrece manzanas a un único precio: 20 céntimos cada una. Sin embargo, en la otra frutería nos dicen que una sola manzana cuesta 40 céntimos, y que si compramos más, el precio unitario cambiará de la siguiente manera: 10 manzanas tienen un precio unitario de 30 céntimos, 100 manzanas valen 20 céntimos individualmente, y 1000 manzanas tienen un precio individual de 10 céntimos. En la primera frutería, decimos que el precio y la cantidad de manzanas que compramos se comportan **linealmente**, y en el segundo caso se comporta **logarítmicamente**. Matemáticamente viene descrito por esta función:

$$n = \log a$$

Cuando hablamos del **sonido** ocurre algo similar, las pequeñas variaciones de volumen se notan más cuando la canción está más floja, y conforme aumentamos la potencia eléctrica, la diferencia de nivel la percibimos más débilmente. Y con la luz pasa lo mismo.

Cuando le llegan pocos fotones a los fotorreceptores, las pequeñas variaciones son muy evidentes. Pero al aumentar el número de fotones en grandes proporciones, la diferencia de iluminación es cada vez menor para nuestra retina, de modo que para lograr una misma diferencia necesitamos aportar muchos más fotones.

Es decir, al haber poca iluminación (en la oscuridad) percibimos las pequeñas variaciones de brillo de un objeto. Sin embargo, al haber una gran iluminación (escenas diurnas) las pequeñas variaciones pasan completamente desapercibidas.

v. Visión periférica

Es importante hablar de la visión periférica por su importancia en la astronomía observacional. Imaginemos que miramos por el ocular de un telescopio un objeto como Saturno. Si miramos fijamente al planeta, podremos ver de reojo 5 ó 6 lunas débiles alrededor. En cambio, si queremos ver directamente esas lunas, es muy posible que alguna de ellas no las veamos. Entonces, volvemos la vista al planeta, y ahí vuelve a estar. ¿A qué se debe esto?

Al tratar de verlos directamente, lo estamos haciendo con la parte de la fóvea, donde se concentran los conos de la retina. Hemos dicho que estos conos no son sensibles en condiciones de luz escasas, sino que deben llegarles muchos fotones para que la señal luminosa llegue al cerebro. Al ver el satélite, los conos no llegan a excitarse lo suficiente, y no lo visualizamos. En cambio, los bastones sí que son mucho más sensibles en condiciones de iluminación escasas, y si tratamos de hacerles llegar la luz del satélite a esos fotorreceptores, sí que visualizará el cerebro esa imagen. Como están situados lejos de la fóvea, la manera de lograr el objetivo es usando la **visión periférica**, o como decimos habitualmente, “mirar de reojo”.

De esta manera los astrónomos amateurs consigues en ocasiones ver objetos que directamente les es imposible.

vi. Adaptación a la oscuridad/claridad

En astronomía, a la hora de observar el cielo necesitamos que nuestros ojos estén completamente adaptados a la oscuridad, para poder discernir los detalles más débiles del firmamento.

Hemos hablado de conos y bastones, de visión fotópica y escotópica. Y hemos visto que la sensibilidad a la luz es mucho mayor en la visión escotópica, en la que participan los bastones. Un aspecto fundamental en la observación astronómica es el periodo de adaptación a la oscuridad que necesitamos para que los bastones puedan rendir al máximo.

¿Qué tiempo necesitamos para ello? Se han hecho varios estudios para poder calcular dicho tiempo. En estos estudios, el resultado se puede aproximar a la gráfica que tenemos a continuación:

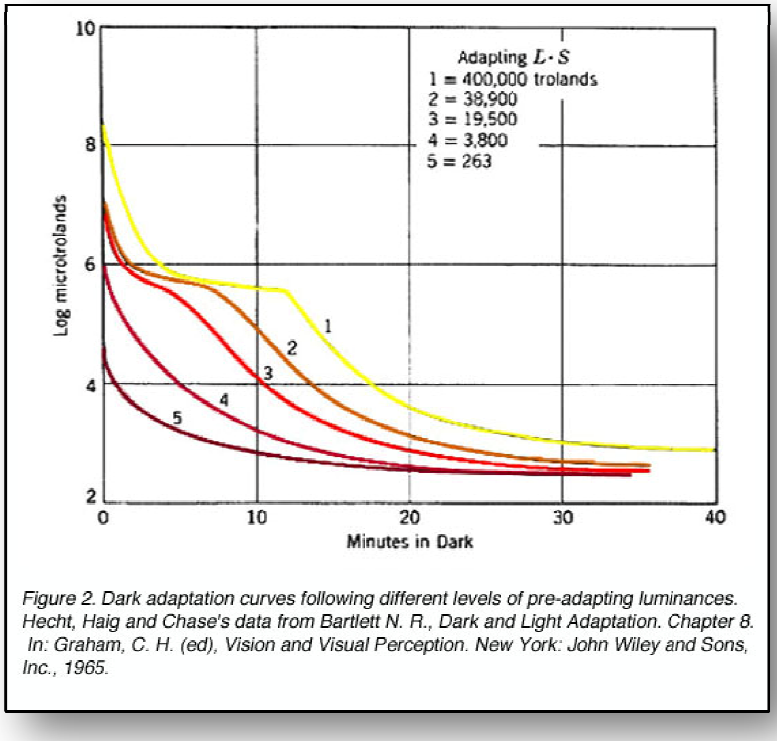


Figure 2. Dark adaptation curves following different levels of pre-adapting luminances. Hecht, Haig and Chase's data from Bartlett N. R., Dark and Light Adaptation. Chapter 8. In: Graham, C. H. (ed), Vision and Visual Perception. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1965.

Abajo en la gráfica tenemos los minutos transcurridos desde que hemos pasado desde una situación con cierta iluminación (mostrada a la izquierda) a otra situación en la que la oscuridad es absoluta. Las cinco curvas representan diversos lugares. En el primero partimos de uno en el que hay bastante iluminación y en el número cinco tenemos una situación opuesta, donde hay poca iluminación. Los casos del 2 al 4 son intermedios.

Observemos el caso 1: estamos usando los conos, y al pasar a la situación de oscuridad absoluta, la sensibilidad de los conos va decreciendo exponencialmente, hasta que pasados 5 minutos los conos ya no nos pueden ofrecer un mejor rendimiento. Desde los 5 minutos hasta los 12, los conos no varían su comportamiento. Es en este momento, pasados 12 minutos aproximadamente, cuando los bastones se activan y comienzan a recibir la información visual del mundo exterior. En este momento la sensibilidad de los bastones es mínima, y debemos esperar otros 10 minutos más para poder sacarles el máximo aprovechamiento.

Ahora observemos el caso 2: partimos de una situación de menor iluminación, y los conos alcanzan su máxima sensibilidad mucho antes que en el caso 1, al pasar solo unos 4 minutos. Los bastones se activan antes, a los 7 u 8 minutos, y el periodo de adaptación a la oscuridad se consigue unos 5 minutos antes que en el peor de los casos.

Para la situación 3 tenemos el mismo comportamiento. Y para la situación 4 y 5, los conos no están activos desde un primer momento, por lo que solo actúan los bastones. Estos se adaptan a la oscuridad total en torno a los 10 minutos.

Cabe destacar que el **periodo de adaptación a la claridad** es mucho menor que a la inversa (**adaptación a la claridad**), resultando ser de tan solo 8 minutos aproximadamente. De ahí la importancia de mantener el periodo de adaptación a la oscuridad, evitando la exposición del ojo a situaciones de mucha claridad, como pueden ser los faros de los coches, las linternas de luz blanca, etc.

Al irnos a observar al campo, los astrónomos aficionados se llevan linternas de luz roja, que se consigue o bien directamente o bien colocando a una linterna normal un papel de celofán rojo. La luz roja solo excita a un tipo de cono, y no nos saca de ese periodo que tanto trabajo nos ha costado encontrar. De esta manera disfrutamos de una observación astronómica cómoda y sin molestias para el ojo humano.

d. Punteros láseres

En los últimos años se ha popularizado el uso de lásers verdes en muchos países. Uno de sus atractivos es sin lugar a dudas el precio: por unos 10€ se pueden adquirir por Internet en tiendas de China y Hong Kong.

En astronomía se usan fundamentalmente por dos motivos. En primer lugar, resulta muy tedioso tener que explicar las formas de las constelaciones a dedo, y con un simple láser verde la tarea se abrevia bastante. Por tanto, en **divulgación astronómica** es una herramienta muy útil.

Además, se puede usar como **buscador** en un telescopio. Por lo general el buscador es un pequeño telescopio que se acopla al tubo principal en paralelo, y que nos da una visión poco aumentada del cielo, para poder encuadrar el objeto que buscamos en ese campo de visión, y con el ocular que tengamos puesto afinaremos después nuestra puntería. El láser vendría a sustituir al buscador, se coloca en el mismo lugar y nos evita tener que mirar por él, pues el haz del láser es visible en el cielo.

Usamos los punteros de color verde por dos motivos: en primer lugar porque el ojo es muy sensible en esas longitudes de onda, y la potencia eléctrica necesaria para el puntero será menor que para otros colores. En segundo lugar, el esparcimiento **de Rayleigh** es más fuerte en longitudes de onda menores. Así pues, un puntero verde sufrirá mayor esparcimiento en el cielo que un puntero rojo. Para que un puntero rojo fuera tan visible como otro verde, necesitaríamos aumentar su potencia en un factor de 50 veces. El esparcimiento en la atmósfera hace que el haz pueda verse.

Y aquí acaban los beneficios de los punteros. Ahora pasemos a los inconvenientes. El principal problema es la salud ocular. Hay láseres de muy diversas potencias de salida, a pesar de que los más populares son los de 5mw, se venden de 10, 20, 50mw, e incluso de 200mw. Una breve exposición directa de un láser de 20mw al ojo puede provocar daños irreversibles. Se produce cuando el haz entra en el ojo y sobrecalienta la retina, quemándola.

Es un tema que está siendo regulado en multitud de países, por el peligro que entraña. Se acepta que los láseres de menos de 5mw son seguros para su utilización, y los de más

de 5mw están prohibiéndose ya. Este límite se debe a que si apuntamos uno de estos punteros al ojo, la persona afectada podrá cerrar sus ojos en un espacio de tiempo de 0,25 segundos, y no sufrirá daños en la retina, siempre y cuando la potencia sea menor de 5mw (aproximadamente). Para potencias mayores, la persona sufrirá daños que podrán ser o no permanentes. Además, los láseres baratos no suelen llevar protección de radiación infrarroja, por lo que estamos añadiendo otro nuevo inconveniente.

Por ello, cuando usemos un láser, debemos hacerlo siempre y cuando sea necesario, no debemos prestárselo a personas irresponsables, incluso nosotros mismos podemos darle un mal uso en un momento determinado, debido a algún despiste. Hay que tener cuidado con ventanas y superficies y objetos reflectantes, como collares, pulseras y metales. Y, a ser posible, nunca apuntar el haz por debajo de nuestras cabezas, sino solamente hacia el firmamento.

No solo tenemos el problema de nuestras retinas, sino también el inconveniente de usarlo en observaciones astronómicas donde nuestros compañeros estén realizando fotografías del cielo, porque al fin y al cabo, los láseres son otro tipo de contaminación lumínica. Hay fotografías con exposiciones muy prolongadas, de hasta 60 minutos por ejemplo. Evitando los punteros les estaremos haciendo un gran favor. No debemos usarlos como juguete sino como herramienta auxiliar en contadas ocasiones destinadas a la divulgación.

BIBLIOGRAFÍA

- Ian Overington, B.Sc., A.R.P.S., M.Inst.P. Vision and Acquisition. Fundamentals of human visual Pprformance, environmental influences and applications in instrumental optics. Pentech Press, 1976.
- Alexander Hornberg. Handbook of Machine Vision, 2006.
- David Greene. Light and dark: an exploration in science, nature, art and technology. 2003.
- TelescopeΘptics.net. Amateur Telescope Optics. 2006. (http://www.telescope-optics.net/)
- Enciclopedia Wikipedia.
- Pedro A. Bernaola Galván y Pedro J. Carpena Sánchez. Introducción a la óptica. Universidad de Málaga. 2005.
- Instituto de Astrofísica de Canarias. Óptica Adaptativa en el GTC. (http://www.iac.es/gabinete/iacnoticias/2-99/gtc/gtc3.htm).
- Webvision. The Organization of the Retina and Visual System. (http://webvision.med.utah.edu/).
- Instituto Nacional de Consumo. Información sobre punteros láseres (http://www.consumo-inc.es/Seguridad/informacion/informes/laser.htm)

ACLARACIÓN

Este documento lo ha realizado Isaac Lozano Rey en marzo de 2010 para el primer Taller de Iniciación a la Astronomía, organizado por la Agrupación Astronómica de Málaga Sirio y el Centro de Ciencia Principia. Está permitida la modificación de dicho documento, así como su copia y transmisión, siempre y cuando se cite el nombre del autor.