

2

EL color de las estrellas

Guillermo Sánchez (<http://diarium.usal.es/guillermo>)

Última actualización: 2013-06-10

2.0. Sobre la elaboración es este artículo.

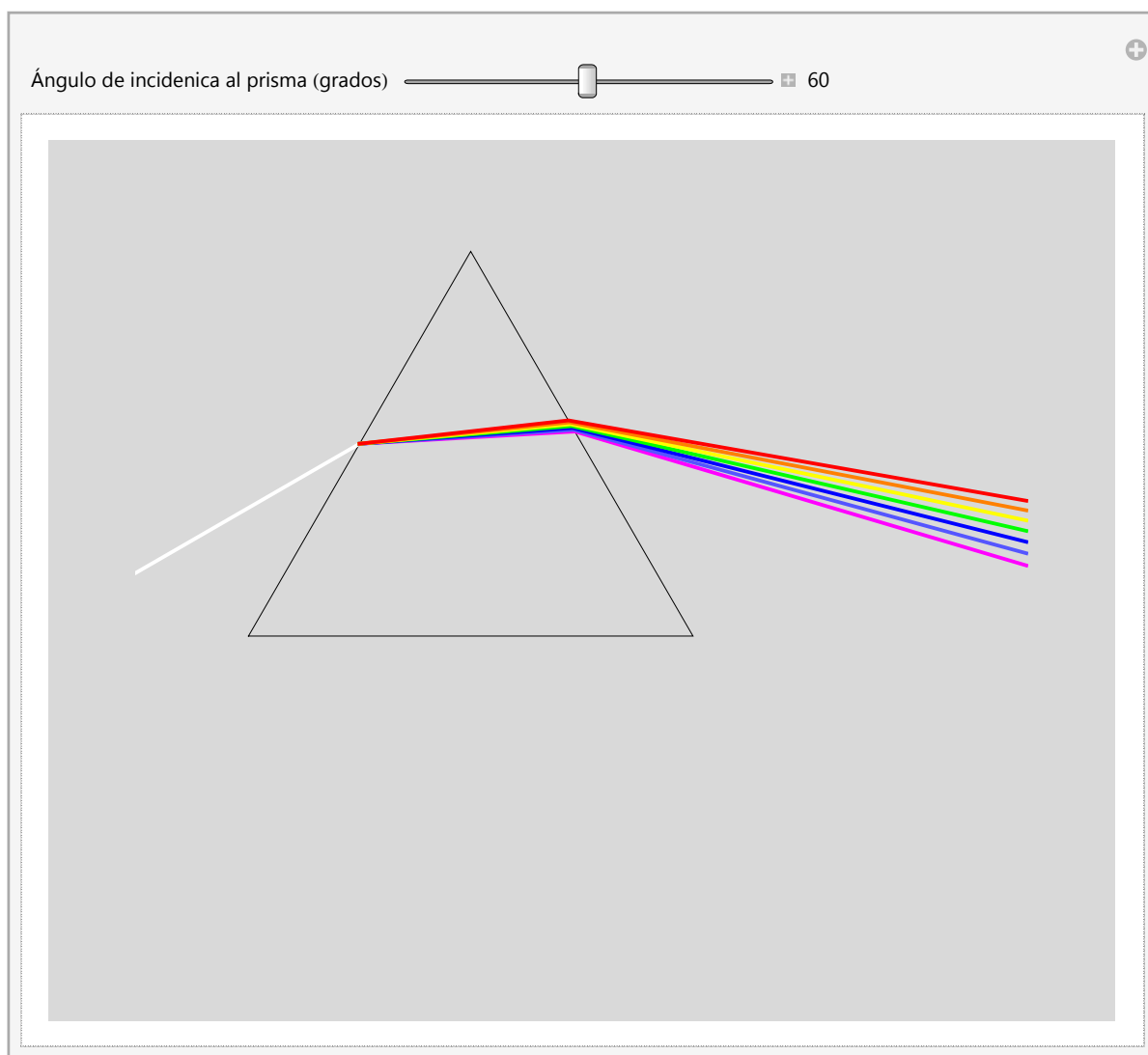
Todos los cálculos realizados para elaborar este artículo están realizados con el programa *Mathematica*, sin embargo Ud no los verá. A veces observará que algún texto aparece en inglés esto es debido a que se muestra directamente el resultado de la salida del programa. Si está interesado en el uso de este programa en cálculos astronómicos y otros muchos campos puede visitar: <http://diarium.usal.es/guillermo/mathematica/>.

2.1. ¿Son las estrellas de colores?

A simple vista las estrellas parecen puntos de luz blanco que titilan. En raras ocasiones conseguimos distinguir algún de color (normalmente rojizo o anaranjado). Sin embargo si con una buena cámara fotografiamos el cielo nocturno sin necesidad de utilizar ningún telescopio ni otros medios de amplificar las imágenes este se nos muestra de colores. Particularmente llamativo es fotografiar la Vía Láctea como se muestra en la siguiente imagen. Realmente nosotros estamos dentro de la Vía Láctea. Esta podemos imaginarla como un plato y nosotros vivimos en un punto del plato alejado del centro. Lo que vulgarmente llamamos Vía Láctea es nuestra visión de ella cuando miramos hacia su centro. En ese caso lo que observamos es una concentración enorme de estrellas que la percibimos como si fuese una nube iluminada (de aspecto lechoso, de ahí el nombre de láctea).



Pero si el cielo es de colores ¿por qué no lo percibimos así? Para responder a esta pregunta lo primero que tenemos que tener claro es que la luz la forman particulitas que se denominan fotones que se desplazan a 300 000 km/s siguiendo ondas de distinta frecuencias. Los fotones de frecuencias bajas los percibimos como rojo y los de frecuencias altas como azul-violeta. La luz blanca y cualquier tipo de luz usualmente es un conjunto de colores mezclados. Así nos lo demostró Newton con un genial y sencillo experimento. Encerrado en un cuarto oscuro a través de una ranura hizo incidir un rayo de luz solar sobre un prisma transparente y comprobó que está se descomponía en varios colores. Por eso cuando seleccionamos para meter en la lavadora ropa blanca y ropa de colores debemos saber que la ropa que refleja más colores es la ropa blanca. A veces la física está reñida con los usos habituales del lenguaje.



Nuestras retinas contienen detectores de fotones (fotoreceptores) que se conocen como: bastones y conos. Los bastones son muy sensibles a la luz pero solo ven en blanco y negro (realmente verde azulada aunque no es necesario entrar en demasiada precisión). En cambio los conos hay de tres tipos (dos o menos en los daltónicos), cada tipo de cono está especializado en un color, en concreto: rojo, verde y azul. La composición de estos colores da lugar a toda una enorme gama de colores intermedios que es como percibimos lo que nos rodea. En ambientes de baja luminosidad, como ocurre con el cielo nocturno, los conos no se activan pues le llega un número de fotones insuficientes y por tanto no percibimos el color. Sin embargo si cogemos unos prismáticos y miramos a las estrellas veremos que algunas las percibimos con colores. Es así pues los prismáticos, y mucho más los telescopios, son concentradores de fotones.

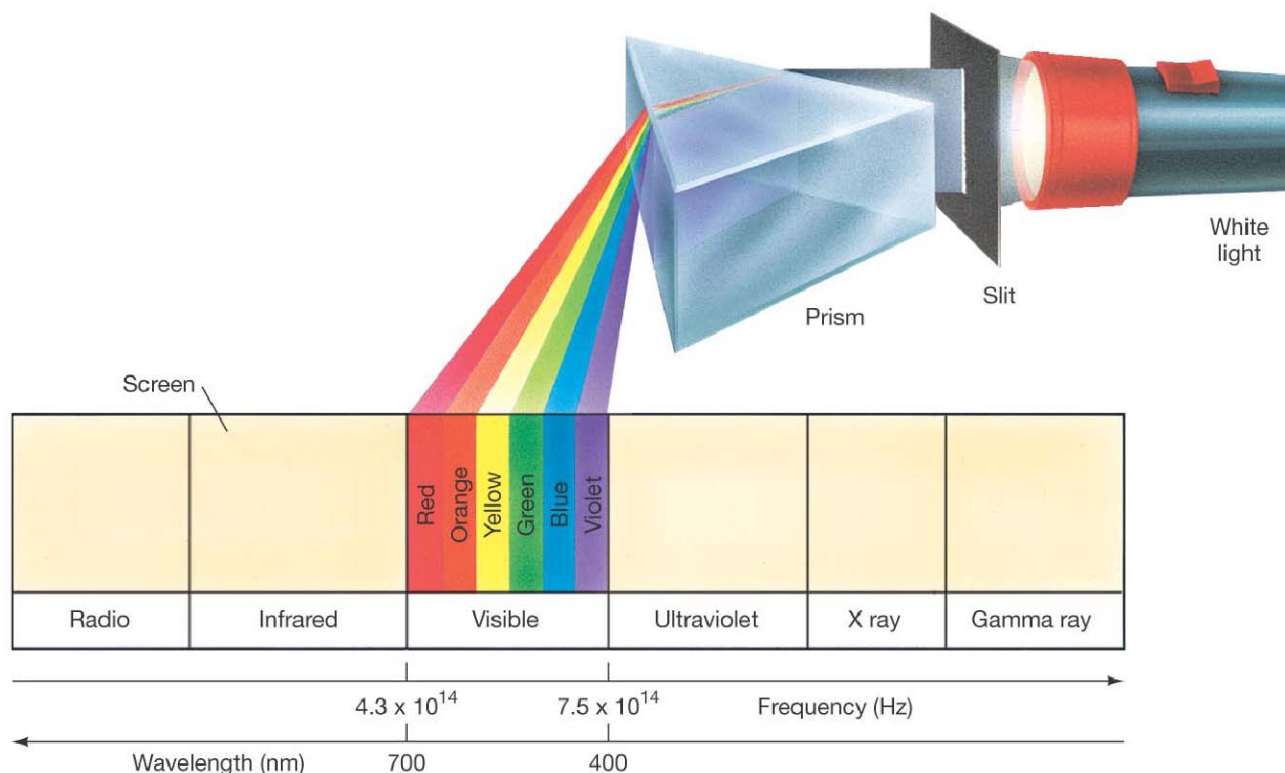
El color de las estrellas nos dice mucho sobre las mismas contradiciendo a la creencia del filósofo francés Auguste Comte (1798-1857) que sostenía que la composición de las estrellas era uno de los conocimientos que nunca estarían al alcance del hombre, solo podríamos conocerlas como puntos de luz en el cielo debido a su enorme distancia de nosotros. Sin embargo el análisis de la luz de las estrellas nos ha permitido conocer razonablemente bien su composición, temperatura y, a partir de ello, deducir cuál será su evolución.

Con unos prismáticos astronómicos podemos mirar hacia las Pleyades (cumulo de estrellas en la constelación de Tauro) y veremos un conjunto de estrellas de color azulado. Mas adelante explicaremos que esto nos está diciendo que estamos frente a estrellas jóvenes.



Lo que llamamos luz visible es solo una pequeña parte de los fotones que nos llegan: corresponde a las frecuencias que van desde el rojo al violeta. Nuestra visión de las cosas corresponde a los fotones reflejados que llegan a nuestros ojos.

Estamos inmersos en un mundo lleno de frecuencias más bajas que el rojo (las microondas, la FM, etc.) y más altas que el azul lo que ocurre es simplemente que no las vemos aunque podemos construir aparatos que si las "ven" (radios, teléfonos móviles, etc.) Nuestra atmósfera es opaca al infrarrojo, salvo en lugares muy secos como la Antártida, y los rayos UV, X y gamma, en estos casos la única forma de "ver" la radiación que nos llega es mediante el empleo de satélites.



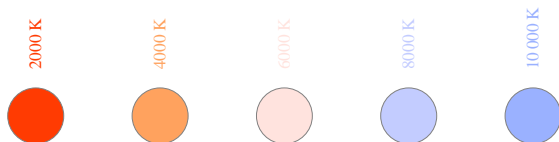
Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.

Astronomy Today Chaisson y McMillan. Pearson Addison-Wesley

2.2. Color y temperatura

Las estrellas no emiten un solo color, realmente emiten en muchas longitudes de onda en lo que se conoce como el espectro de luz de la estrella donde hay un color dominante. Por ejemplo una estrella roja emite en muchos colores pero el color que destaca es el rojo. El espectro de los colores de una estrella normalmente responde a lo que en física se conoce como cuerpo negro que nada tiene que ver con el color negro si no con la distribución de los colores que emiten los cuerpos que cumplen ciertas condiciones cuando se calientan a una temperatura concreta. Los cuerpos negros siguen lo que se conoce como ley de Plank.

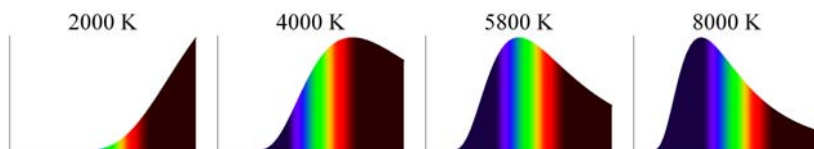
- Como se ha indicado hay una relación entre la temperatura en la superficie de la estrella y su color. Debajo se muestran el código de colores normalmente empleado en astronomía.



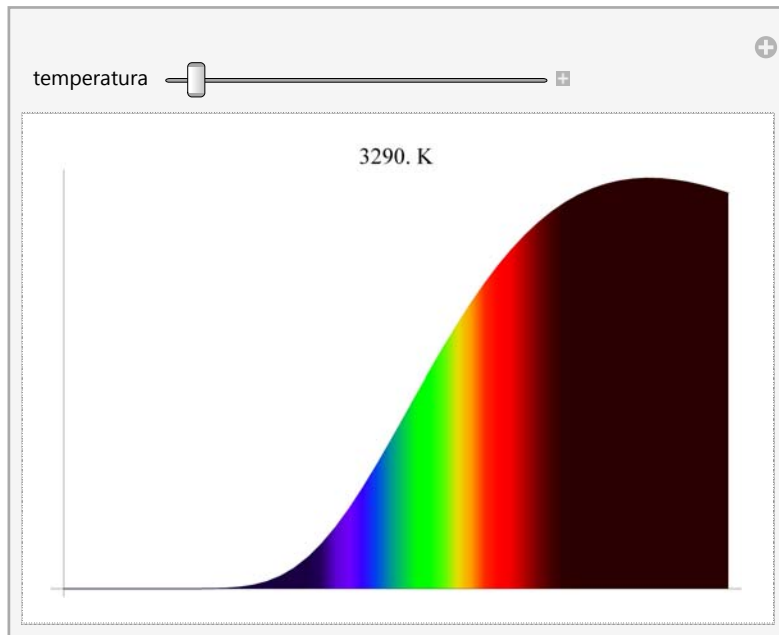
- Como hemos dicho los colores anteriores corresponden al color dominante según la temperatura de la estrella, pero realmente de cada estrella nos llegan fotones de muchas longitudes de onda, su espectro). La superficie de las estrellas se considera físicamente como cuerpos negros y como tales la forma de su espectro sigue la ley de Planck. Esta ley permite deducir la temperatura de la estrella (que evidentemente no podemos medir directamente) a partir del espectro de colores que nos llega de ella. Para lo que les gusten las matemáticas muestro la ley de Planck (los que no se la pueden saltar):

$I(\lambda) = \frac{2 h c^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1 \right)}$	
$I(\lambda)$	spectral radiance as function of wavelength
λ	wavelength
T	temperature
h	Planck constant ($\approx 6.62607 \times 10^{-34}$ Js)
c	speed of light ($\approx 2.998 \times 10^8$ m/s)
k	Boltzmann constant ($\approx 1.38065 \times 10^{-23}$ J/K)

- Se ve que todos los términos son constantes excepto la longitud de onda, λ , y la temperatura (en grados Kelvin, para pasar a grados Celsius simplemente restamos 273). Esta expresión nos permite deducir la temperatura a partir de T. También nos permite representar los espectros correspondientes a distintas temperaturas. Para 5800 K, que es la temperatura superficial de estrellas como el Sol, los colores dominantes van del azul al rojo, que es lo que denominamos luz visible. Probablemente esa es la razón por la cual la selección natural ha llevado a que nuestros ojos sean especialmente sensibles a este espectro. Podemos especular que una especie que viva al lado de una estrella de baja temperatura (3000 K) habrá desarrollado su visión para ver en el infrarrojo que nosotros no podemos ver.

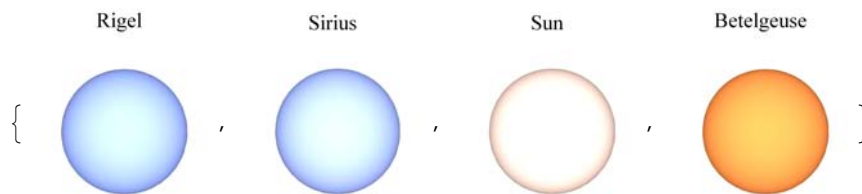


- Con la siguiente animación podemos construir un representación dinámica de la ley de Planck que muestra claramente la relación entre color y temperatura:

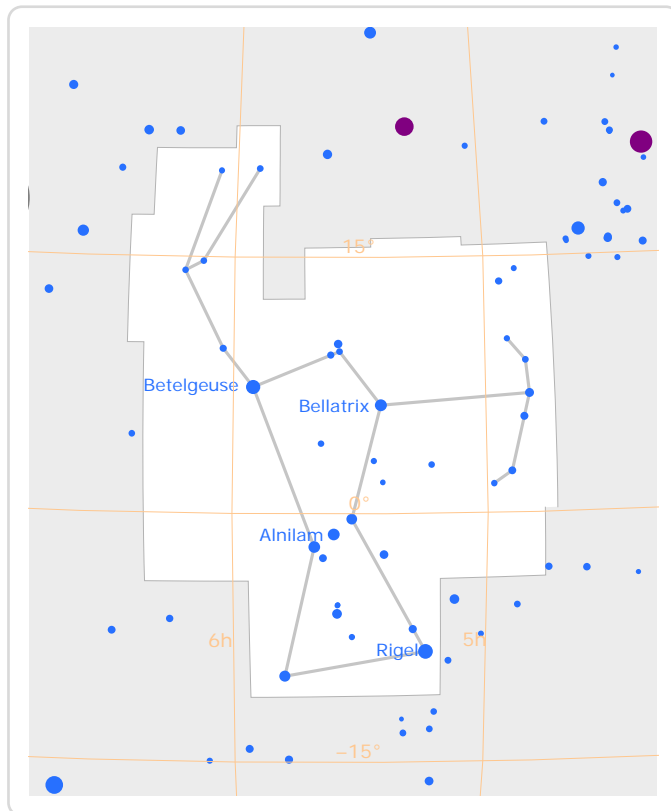


Un modelo más completo puede encontrarse en: "Blackbody Spectrum" (<http://demonstrations.wolfram.com/BlackbodySpectrum>) por Jeff Bryant

- Aplicamos la función anterior a varias estrellas conocidas.

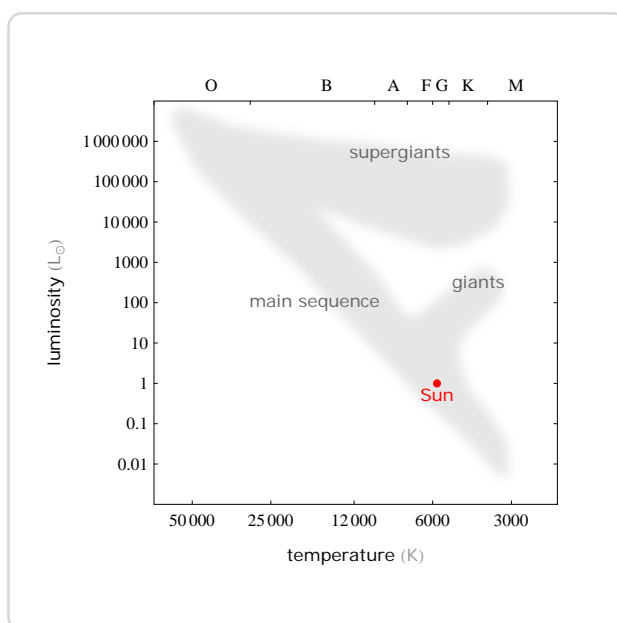


Betelgeuse y Rigel forman parte de la conocida constelación de Orión que destaca en los cielos de invierno. Con unos prismáticos distinguiremos claramente el color azul de Rigel y el color rojo anaranjado de Betelgeuse.



2.3. La vida de las estrellas

Rigel y Betelgeuse son dos estrellas opuestas en el sentido de que una es joven, Rigel (lo dice su color azul), mientras que Betelgeuse (anaranjada) es una vieja estrella que se está muriendo. ¿Y esto cómo lo sabemos? La solución la dieron, separadamente, los astrofísicos Hertzsprung y Russell que analizando miles de estrellas elaboraron lo que se conoce como diagrama de Hertzsprung y Russell que se muestra debajo. En el diagrama se representa en un eje la luminosidad y en otro la temperatura. Al Sol se le asignó por luminosidad 1 (aunque esto es un simple convenio y el diagrama tiene la misma forma si tomamos otra estrella como referencia). Recuerde que cuando hablamos de temperatura lo que realmente medimos es frecuencia de la luz que nos llega de la estrella. La luminosidad la deducimos de la magnitud aparente a la que nos hemos referido en otro artículo.



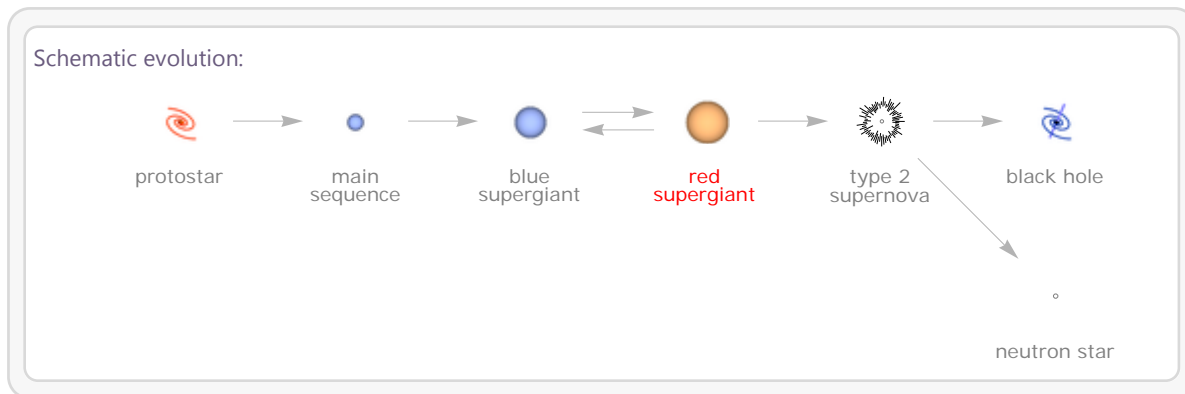
Las vidas de las estrellas evolucionan según su posición en el diagrama anterior. Se desplazan a lo largo de la secuencia principal, y lo

hacen más o menos rápidamente según la relación entre luminosidad y temperatura. Estrellas que nacen muy luminosas y con temperatura alta (por tanto emiten azul) al principio de su vida viven poco pero intensamente, mientras que estrellas que nacen más pequeñas y menos calientes viven una vida menos intensa pero más larga (Para ver como nacen las estrellas solo hay que observar con unos prismáticos la nebulosa de Orion). Veamos como ejemplos: Betelgeuse y el Sol.

- Los datos fundamentales Betelgeuse son los siguientes:

§Aborted

- Se trata de una estrella enorme. Hace muy pocos millones de años era una estrella azul muy luminosa (y muy caliente). Ahora está en fase de gigante roja (muy grande pero poca temperatura) con una masa 18 veces la del Sol. Su destino es convertirse una estrella muy densa (estrella de neutrones) incluso si su densidad es extraordinariamente alta acabará su vida como agujero negro.

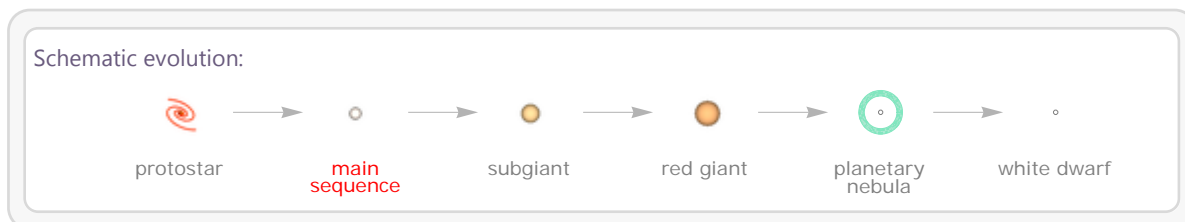


- Betelgeuse es una estrella de luminosidad variable (véase la tabla). Si magnitud aparente oscila entre 0 y +1.3 que es mucho en un periodo de unos 6 años, lo que puede percibirse incluso a simple vista si la observamos cada pocos meses. Eso nos dice que la estrella está agonizando. No sería extraño que en pocos milenios explote convirtiéndose en una supernova. Incluso podría ya haber explotado pero como está a 641.8 año-luz su luz aún no nos habría llegado. Cuando explote percibiríamos claramente su efecto (641.8 años después de que ocurra), incluso durante el día será claramente visible. No es probable que tenga consecuencias desastrosas para nuestro planeta. Existe una pequeña posibilidad de que se genere un brote de rayas gamma que tengamos la mala suerte enfoque hacia la Tierra y extinga una parte importante de la vida. Una de las grandes extinciones terrestres que ocurrió en el ordovícico, hace 450 millones de años pudo deberse a una explosión de rayos gamma, pero dejemos de ser agoreros, la posibilidad es remota

Variable star properties:

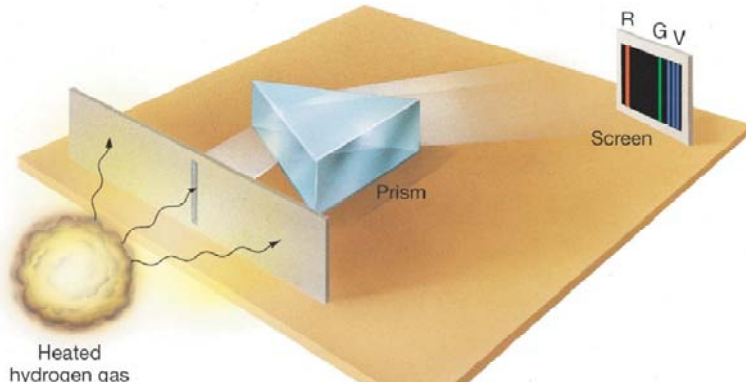
maximum apparent magnitude	0 (easily visible to the naked eye)
minimum apparent magnitude	+1.3 (easily visible to the naked eye)
maximum absolute magnitude	-6.471 (visual)
minimum absolute magnitude	-5.2 (visual)
variability period	2335 days
type	semiregular late-type supergiant

- La evolución del Sol es más placida. Existe desde hace unos 5500 millones de año y le queda otro tanto. Sin embargo su temperatura va subiendo, y en unos 1000 millones de años la temperatura de la tierra sobrepasará 100 °C, a las especies que entonces existan no les quedará más remedio que abandonar el planeta o vivir en cuevas climatizadas. En este caso podrán aguantar unos miles de millones de años más pero finalmente el Sol se convertirá en una gigante roja (aunque no tanto como Betelgeuse) que engullirla a la Tierra. En el mejor de los casos la fundirá, en cualquier caso acabáramos achicharrados.



2.4. La luz y la composición de las estrellas

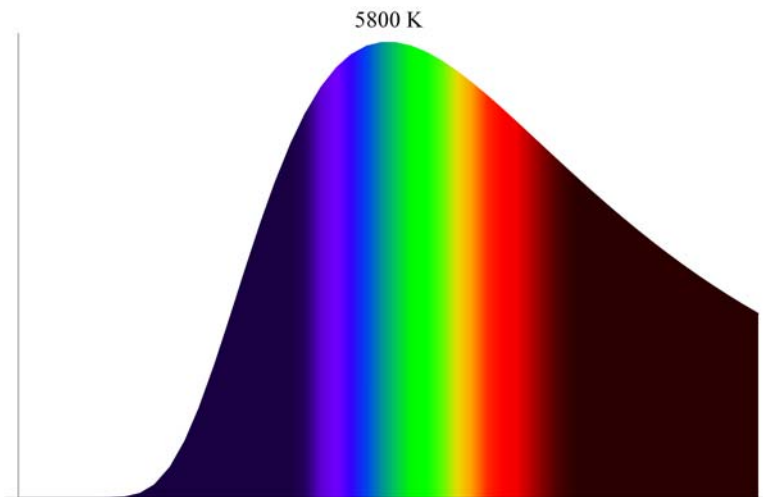
La luz que nos llega de las estrellas también nos informa de su composición de las estrellas. Al espectro continuo de cuerpo negro al que antes nos hemos referido se ve superpuesto por longitudes de ondas características de los elementos que componen la estrella. Cada elemento ionizado emite una señal luminosa específica. Así sabemos que en la superficie del Sol abundan el hidrógeno y el helio.



Astronomy Today Chaisson y McMillan. Pearson Addison-Wesley

2.5. ¿Por qué las hojas de los árboles son verdes?

Hemos visto que nuestro sol es una estrella de tipo O. Este tipo de estrellas se caracterizan por emitir un espectro de frecuencias de luz (fotones) como los que muestran la figura.



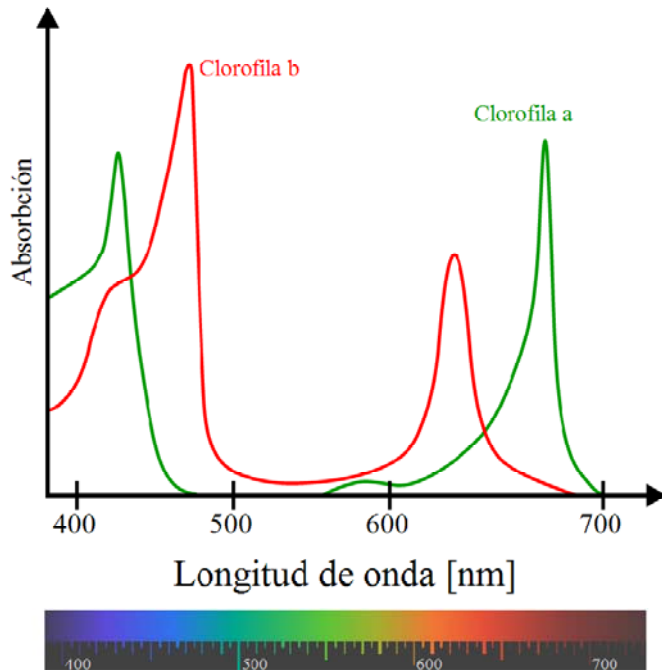
Puede verse que el espectro de la luz solar corresponde mayoritariamente a frecuencias que van desde el violeta al rojo. La superposición de todos estos colores en nuestros ojos se manifiesta como un solo color: el blanco que como hemos visto con un prisma puede descomponerse en los colores que lo forman.

Cuando la luz blanca incide sobre un objeto (seres vivos incluidos) este reflejará, dependiendo de sus características (forma, composición química, estructura molecular, etc.), algunos colores y absorberá otros. A veces algunos fotones son absorbidos y reemitidos con frecuencias más bajas. Por tanto: Si vemos algo de color verde es debido a que en esa superficie al llegar la luz blanca el color verde es reflejado y el resto de los colores son mayoritariamente absorbidos.

En el campo, al menos durante la época húmeda, a la luz del sol, el color verde es el que predomina pues es el color de los árboles y las plantas. Sabemos que el color verde se lo da a los vegetales los pigmentos de la clorofila, que son moléculas existentes en los cloroplastos de algunas células vegetales (también está presente en las cianobacterias que estaban aquí mucho antes que las plantas). La clorofila actúa como las células fotovoltaicas de los paneles solares: absorben parte de la luz solar incidente para convertirla en energía en forma de azúcares. En concreto el proceso implica la fijación de un átomo de carbono procedente del CO_2 atmosférico en una molécula de azúcar, para lo que se aprovecha la energía de al menos 8 fotones. El proceso conlleva además la rotura de un enlace OH de la molécula de agua, H_2O y la liberación de un electrón que es aprovechado en reacciones bioquímicas posteriores. Estos procesos requieren que la energía de los fotones incidentes sobrepasen un umbral mínimo para poder activar las reacciones. Como resultado: los átomos H y C, y algo de O, se combinan formando de azúcares (también intervienen el Mg y el N presentes en las plantas que lo obtienen del suelo) y liberando O_2 . Los azúcares son el combustible que produce energía para la propia planta, y además se la proporcionan indirectamente a los animales

(nosotros incluidos) que las ingieren.

Lo curioso del proceso es que los dos tipos de clorofilas más abundantes, llamadas a y b, los fotones aprovechados son los extremos del espectro visible: violetas y azules, para las frecuencias altas, y rojos en las frecuencias bajas, en cambio reflejan el verde.

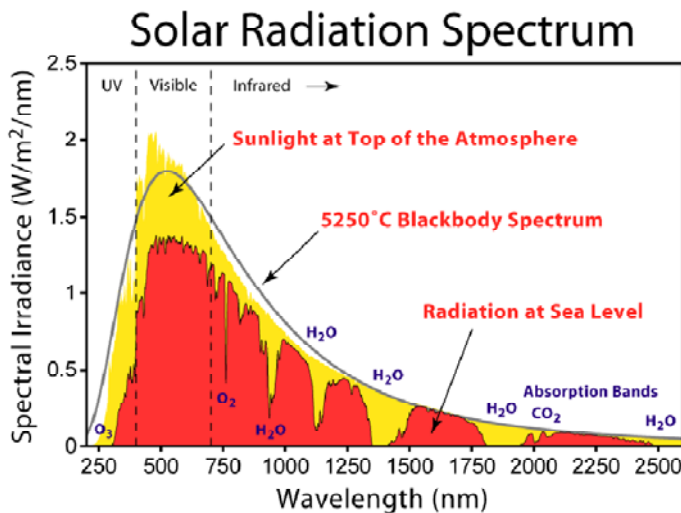


Para mí esto escondía una aparente paradoja pues hemos visto que los fotones de color verde son los que mayoritarios en el espectro emitido por el sol. Cabría esperar que la selección natural hubiese favorecido la absorción de este color por los vegetales en vez de reflejarlo pues así el proceso de conversión de luz blanca debería ser más eficiente.

Para encontrar la explicación observemos un arcoíris. En él predominan normalmente los colores rojos y azules sobre el verde. Parte de esta característica se debe a que una cosa es el espectro la luz que sale del sol y otra es la que alcanza la superficie terrestre.



Si medimos el espectro de la luz a nivel de la superficie terrestre comprobamos que predominan las frecuencias rojizas y las azules frente a la verde. El verde ha sido absorbido parcialmente por la atmósfera. Esto encaja con el comportamiento de la clorofila. De hecho los fotones rojos aunque son los menos energéticos del espectro visible abundan más que los azules (los más energéticos). La clorofila es un sorprendente mecanismo de aprovechamiento energético pues aprovecha fotones rojos por su mayor número y a los azules, aunque menos abundantes, por su mayor energía.



Si retrocedemos al lejano pasado de la atmósfera de la Tierra hubo un periodo enorme -2000 millones de años- en el que apenas había oxígeno en esta pues aun no había aparecido la clorofila. Al no haber oxígeno la atmósfera carecía de ozono (O₃) y por tanto llegaba mucha luz ultravioleta a la superficie terrestre que es dañina por su facilidad para ionizar moléculas. Pero en esa época la vida era exclusivamente bacteriana (entre ellas las cianobacterias que inventaron las fotosíntesis) y estas estaban en las aguas someras donde el agua actuaba como protector.

También podemos especular sobre que colores tendrán las plantas, si existen, en planetas de estrellas que emitan en otros espectros de luz y en otros tipos de atmósferas. Si el mecanismo de selección natural es universal, como cabe esperar, sus colores serán el resultado del mejor aprovechamiento de la energía en dichos planetas.

2.6. Recursos adicionales

Los siguientes libros son unas introducciones excelentes y actualizadas de Astronomía y Astrofísica editadas por Pearson/Addison Wesley:

Astronomy Today por *Chaisson y McMillan*

An Introduction to Modern Astrophysics por *C. Ostlie*

Simulaciones animadas pueden verse en : <http://demonstrations.wolfram.com/topic.html?topic=Astronomy>