LA ENERGÍA DEL SOL Y LAS ESTRELLAS

Simón García

La energía del Sol y las estrellas. Átomos. La interacción de la luz y la materia. Espectros estelares. La estructura del Sol. La atmósfera solar. Brillo intrínseco. El diámetro de las estrellas. El diagrama H-R. Masa y densidad de las estrellas.

Para y óyeme ¡oh sol! yo te saludo
y extático ante ti me atrevo a hablarte:
ardiente como tú mi fantasía,
arrebatada en ansia de admirarte
intrépidas a ti sus alas guía.

¡Ojalá que mi acento poderoso,
sublime resonando,
del trueno pavoroso
la temerosa voz sobrepujando,
¡oh sol! a ti llegara
y en medio de tu curso te parara!

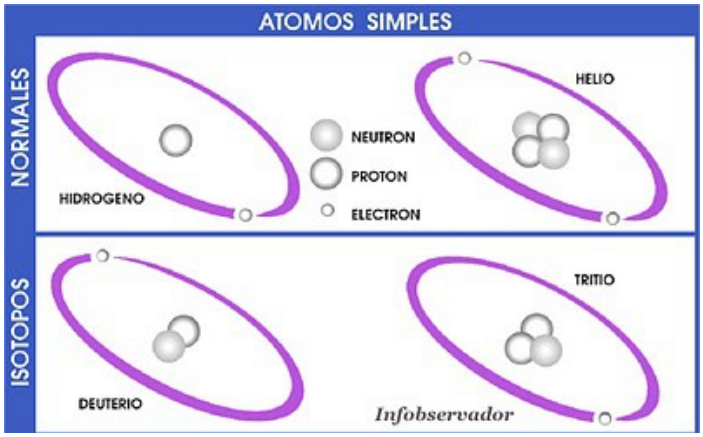
José de Espronceda

Los átomos

Cuando comenzamos a conocer las estrellas utilizamos un **modelo**: La ***esfera celeste***. No existe tal esfera pero nos es útil para estudiar todo lo que en esa esfera imaginaria podemos ver: El Sol, la Luna, los planetas, las estrellas, sus movientos,etc.

Para entender la estructura de la materia utilizamos un modelo de **átomo**. El modelo actual, tal vez imperfecto todavía, ha sido muy difícil de conquistar para la Ciencia. Nuestro modelo de átomo consiste en un pequeño **núcleo** central compuesto de **protones** con carga eléctrica positiva y **neutrones** sin carga, rodeado por una pequeña nube de **electrones,** partículas de muy poca masa con carga igual pero opuesta, girando a su alrededor.

Los átomos son tan pequeños que si quisiéramos hacer un modelo apreciable a escala habría que aumentarlo miles de millones de veces. Lo mismo ocurre con su masa. Deberíamos multiplicarla por un factor de 10^{12} para obtener algo que pudiéramos imaginar.



Hay más de un centenar de tipos de átomos que se diferencian por el número de protones de su núcleo. Si cambiamos el número de neutrones de un átomo obtenemos un **isótopo**. Cuando un átomo pierde uno más electrones se convierte en un **ion.**

Dentro de la nube de electrones, un electrón puede orbitar al núcleo a diferentes distancias, pero dentro de unos ciertos límites. Las reglas que gobiernan estas **órbitas permitidas** se conocen con el nombre de **mecánica cuántica.**

Las propiedades de las órbitas electrónicas son importantes en Astronomía ya que los electrones pueden interaccionar con la luz, que es nuestra mejor clave para conocer los astros. Analizando esta interacción, podemos interpretar las líneas de un espectro y conocer, por ejemplo, la composición y temperatura de las estrellas, de las nubes de gas en el espacio y de las atmósferas de los planetas.

La interacción de la luz y la materia

El hidrógeno es el elemento químico más abundante en el Universo. El **espectro** del átomo de hidrógeno ha resultado ser la piedra de Rosetta de la física moderna: cuando se logró descifrar esta

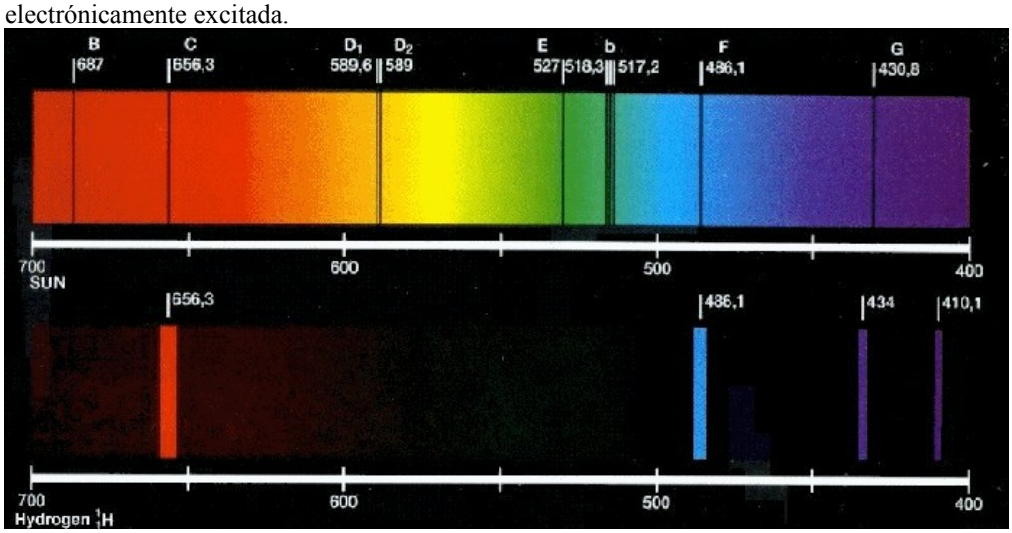
distribución de líneas, se entendieron muchas otras cosas. En particular, fue en gran parte el esfuerzo para explicar el espectro de la luz emitida por el átomo de hidrógeno lo que inspiró las leyes de la mecánica cuántica. Desde entonces se ha observado que estas leyes se aplican no sólo al átomo de hidrógeno sino también a otros átomos, a las moléculas y a la materia en general. Constituyen los fundamentos de la química moderna, de la física del estado sólido y aun de ciencias aplicadas tales como la electrónica.

La posición central que ocupa el átomo de hidrógeno en la historia de la física del siglo xx pudiera inducir a pensar que el espectro se conoce en todos sus detalles desde hace tiempo. Esto no es cierto. Sólo en los últimos años se han resuelto algunas de las características más sutiles del espectro, y muchas otras no se han observado todavía directamente. La medición de las posiciones de las rayas espectrales continúa siendo hoy en día una prueba importante de las predicciones de la teoría cuántica.

Espectros atómicos

Cuando se excita de manera adecuada un gas atómico a una presión ligeramente inferior a la atmósfera emite un espectro de radiación que contiene determinadas longitudes de onda. Los espectros atómicos obtenidos de varios elementos, se conocen como espectros de líneas de emisión. Cada elemento da lugar a un espectro de emisión de líneas único; por eso se compara estos espectros a las huellas digitales de los elementos.

Las bandas deben su origen a las rotaciones y vibraciones de los átomos en una molécula electrónicamente excitada.



Espectro de absorción en la parte superior y de emisión en la inferior del átomo de Hidrógeno

ESPECTRO DE EMISIÓN COMPLETO DEL HIDRÓGENO:

El espectro se estudia por grupos de bandas, por series, que reciben el nombre de su descubridor y que corresponden a diferentes zonas del espectro (ultravioleta, visible, infrarrojo).

Las series mencionadas: Serie de Lyman, en la zona ultravioleta. Serie de Balmer, en la zona visible. Serie de Paschen, Brackett y Pfund en la infrarroja.

Espectros estelares

Al utilizar la interacción de la luz y la materia, los astrónomos pueden obtener información del espectro de los objetos celestes. Un espectro nos puede decir cosas tales

como la temperatura y la composición, e inclusos darnos datos acerca del movimiento de los cuerpos estelares.

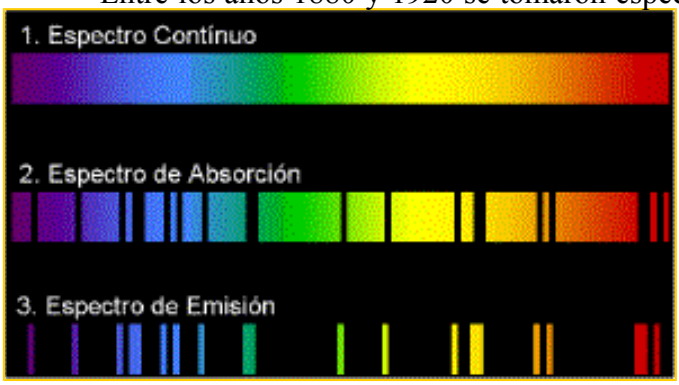
Podemos utilizar las líneas de absorción de Balmer como un termómetro para encontrar la temperatura de las estrellas.

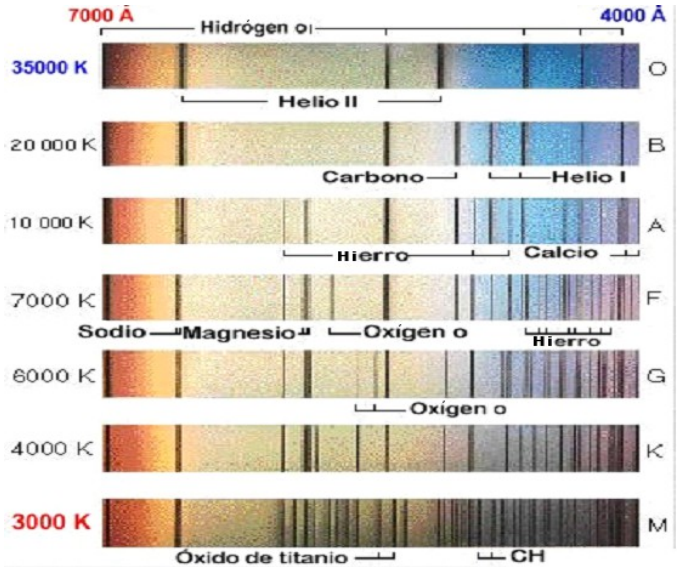
Analizando los espectros de estrellas, los astrónomos han encontrado que las estrellas más calientes tienen temperaturas superficiales de más de 40.000 grados. Las más frías de unos 2.000 grados y que la temperatura superficial del Sol es de 5.800 grados.

Clasificación espectral

Hay muchas maneras de clasificar las estrellas: respecto al color, la temperatura, el brillo, la masa. Sin embargo, el espectro de las estrellas ha demostrado ser una de las más útiles.

Entre los años 1880 y 1920 se tomaron espectros de miles de estrellas. En dicho trabajo destacó la aportación de un buen número de astrónomas del Observatorio de Harvard (notablemente, Annie Jump **Cannon**). Denominaron tipo *A* a las estrellas con las líneas más prominentes de hidrógeno, con *B* a las que le siguen y así. La clasificación terminaba en la letra *P*.



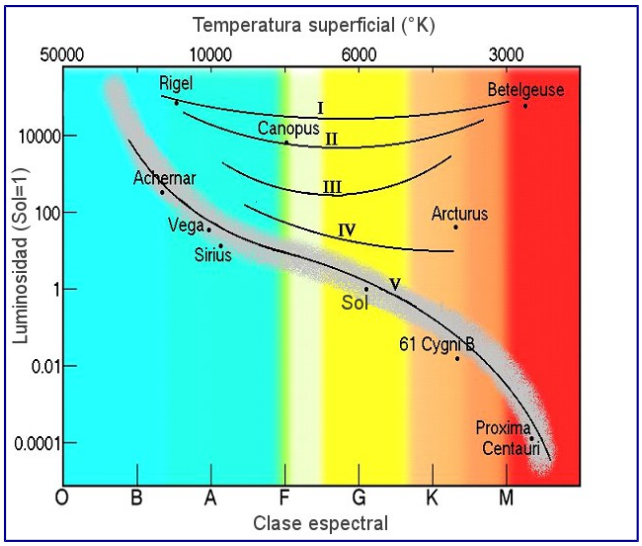


Annie Jump Cannon

El Diagrama de Hertzsprung-Russell

La importancia de la **clasificación espectral** se debe a que existe una relación directa entre ésta y el brillo (luminosidad o magnitud) de una estrella. Los primeros en encontrar esta relación fueron los astrónomos Ejnar **Hertzprung** (danés) y Henry Norris **Russell** (norte americano).

H y R (Más fáciles de pronunciar) se dieron cuenta de que si se grafica la temperatura, el color, o la clasificación espectral en el eje horizontal, y el brillo en el vertical, más del 90% de las estrellas quedan contenidas en una banda diagonal muy estrecha. También observaron que las estrellas gigantes, las super-gigantes y las enanas ocupan regiones muy separadas dentro de este diagrama.



El **diagrama HR**, como se le conoce actualmente, es sumamente útil para estudiar la evolución de las estrellas

El Sol: Nuestra estrella

Introducción: qué son las estrellas y cómo funcionan

En sus propiedades generales las estrellas son muy sencillas.

Una estrella es una esfera de gas autogravitante en cuyo interior se producen reacciones nucleares que liberan energía. Su evolución depende del balance entre dos fuerzas de sentido opuesto: la de **gravedad**, que ejerce una presión hacia el centro (centrípeta) y la de **radiación**, que ejerce una presión hacia fuera (centrífuga). La fuente de energía que hace que las estrellas brillen durante miles de millones de años no se descubrió hasta finales de los años 1930: son **reacciones nucleares** (la llamada cadena protón-protón) que transforman hidrógeno (H) en helio (He) liberando enormes cantidades de energía y de unas partículas subatómicas llamadas neutrinos. Para que se produzcan estas reacciones el núcleo estelar debe alcanzar una temperatura de unos diez millones de grados.

Resumiendo

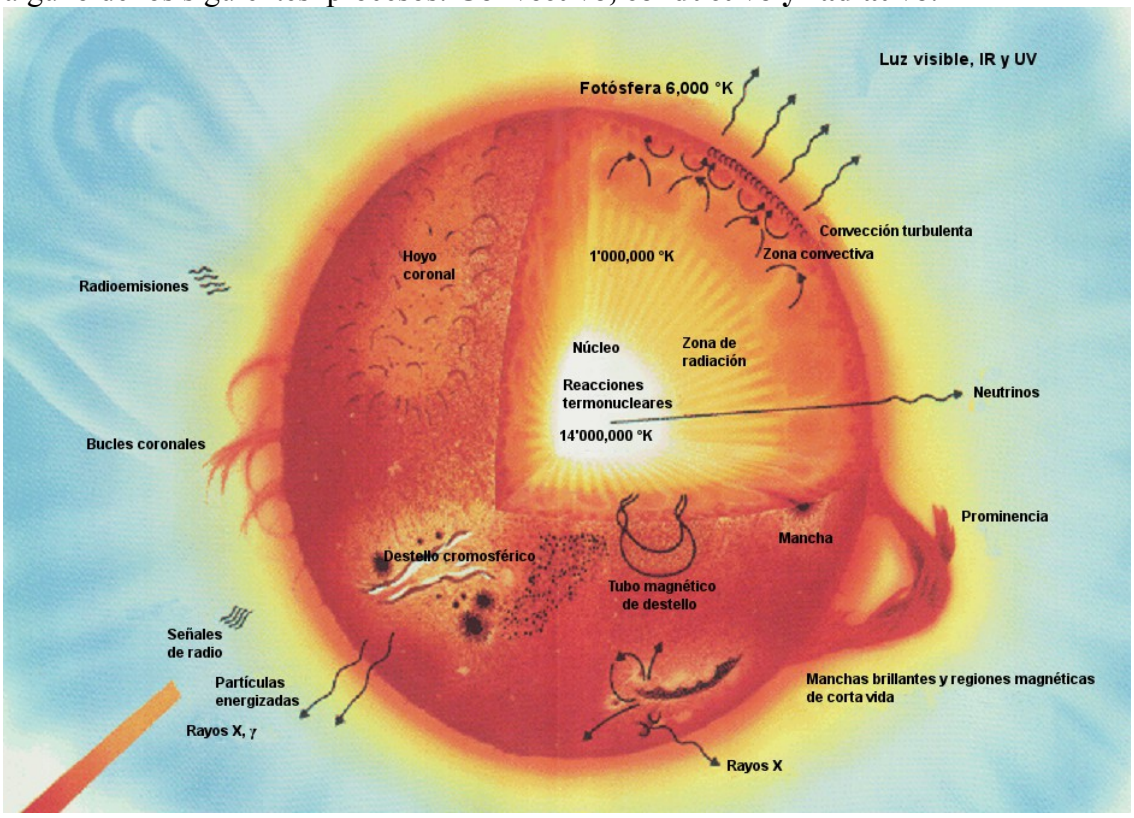
* Son esferas de gas que producen enormes cantidades de energía en procesos de fusión nuclear.
* Las estrellas cumplen con un ciclo de vida*:*
* **Se forman** en las nubes de gas y polvo que existen entre las estrellas (medio interestelar).
* **Nacen** al iniciar la fusión nuclear, en la que cuatro núcleos de H se transforman en uno de He.
* Tendrán un **periodo de vida**, cuya duración dependerá principalmente de cuál fue su masa inicial.
* **Mueren** de diversas maneras, regresando gran parte de su masa (ahora más rica en elementos pesados) al medio interestelar.

La estructura del Sol.

La respuesta al problema de la producción de energía en las estrellas no fue resuelta hasta el siglo pasado. La primera clave para la explicación surgió con la famosa ecuación de Einstein que relaciona a la materia con la energía: $\mathbf{E = mc^2}$.

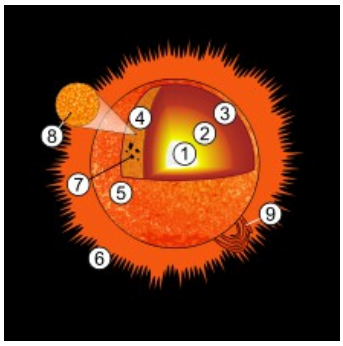
Los detalles sobre el mecanismo energético solo pudieron entenderse gracias a los avances de la Física Nuclear. Hoy sabemos que es la **fusión nuclear** la responsable de que brillen las estrellas

La **energía producida en el núcleo** es transportada hacia la superficie por alguno de los siguientes procesos: **Convectivo, conductivo y radiativo**.



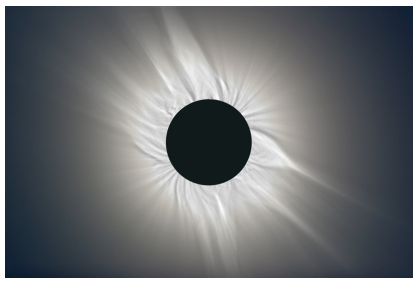
Como toda estrella, el Sol posee una forma esférica, y a causa de su lento movimiento de rotación, tiene también un leve achatamiento polar. Como en cualquier cuerpo masivo, toda la materia que lo constituye es atraída hacia el centro del objeto por su propia fuerza gravitatoria. Sin embargo, el plasma que forma el Sol se encuentra en equilibrio, ya que la creciente presión en el interior solar compensa la atracción gravitatoria, lo que genera un equilibrio hidrostático. Estas enormes presiones se producen debido a la densidad del material en su núcleo y a las enormes temperaturas que se dan en él gracias a las reacciones termonucleares que allí acontecen. Existe, además de la contribución puramente térmica, una de origen fotónico. Se trata de la presión de radiación, nada despreciable, que es causada por el ingente flujo de fotones emitidos en el centro del Sol.

Casi todos los elementos químicos terrestres (aluminio, azufre, bario, cadmio, calcio, carbono, cesio, cobalto, cobre, cromo, estaño, estroncio, galio, germanio, helio, hidrógeno, hierro, indio, magnesio, manganeso, níquel, nitrógeno, oro, oxígeno, paladio, plata, platino, plomo, potasio, rodio, silicio, sodio, talio, titanio, tungsteno, vanadio, circonio y zinc) y diversos compuestos (como el cianógeno, el óxido de carbono y el amoniaco) han sido identificados en la constitución del astro rey, por lo que se ha concluido que, si nuestro planeta se calentara hasta la temperatura solar, tendría un espectro luminoso casi idéntico al Sol. Incluso el helio fue descubierto primero en el Sol y luego se constató su presencia en nuestro planeta.



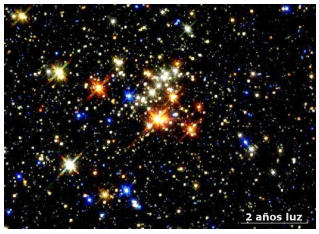
El Sol presenta una estructura en capas esféricas o en "capas de cebolla". La frontera física y las diferencias químicas entre las distintas capas son difíciles de establecer. Sin embargo, se puede determinar una función física que es diferente para cada una de las capas. En la actualidad, la astrofísica dispone de un modelo de estructura solar que explica satisfactoriamente la mayor parte de los fenómenos observados. Según este modelo, el Sol está formado por: 1) núcleo, 2) zona radiante, 3) zona convectiva, 4) fotosfera, 5) cromosfera, 6) corona, 7) manchas solares, 8) granulación y 9) viento solar.

La atmósfera solar.



Su parte exterior, o atmósfera, consta de tres capas: la **fotosfera** (500 km de grosor y entre 7 000 y 4 000 grados de temperatura) es la superficie visible del Sol, donde se observan gránulos que muestran corrientes ascendentes de gas en su centro y descendientes en los bordes; la **cromosfera** (grosor de 2 000 km y temperaturas ascendientes hasta los 60 000 grados), menos brillante que la fotosfera y, por tanto, no visible; y la **corona** (varios radios solares de grosor y temperaturas de 1 ó 2 millones de grados), zona de gasses ionizados, observable durante los eclipses totales, en donde las altísimas temperaturas son producto del movimiento y reestructuración del campo magnético. El Sol emite radiación en muchas frecuencias pero la temperatura efectiva de su fotosfera hace que se emita más radiación en el color naranja; estrellas con fotosferas más calientes se verán más azules y las más frías se verán más rojas.

Brillo intrínseco.



El color de las estrellas

El color y la temperatura de las estrellas. Ley de Wien.
El color de una estrella, definido por la longitud de onda en la cual emite la mayor cantidad de radiación, está relacionado con su temperatura a través de la

Ley de Wien: $\lambda max = 0.2898 / T$

Donde λmax es la longitud de onda en centímetros a la cual emite el cuerpo negro la máxima radiación, y T es su temperatura superficial en grados Kelvin.

¿De qué color es el Sol? Para el Sol, cuya temperatura es, T = 5,800 °K:

$\lambda max = 0.2898 / 5{,}800 = 5x10\text{-}5$ cm = 5,000 Å

Esta longitud de onda se localiza entre los colores amarillo y verde del espectro electromagnético.

La luminosidad (**L**) de una estrella se define como la energía que emite por unidad de tiempo.

La ley de Stefan Boltzmann

La ley de Stefan Boltzmann nos dice que ***L*** depende del área y de la temperatura:

L = 4πR2σT4; **σ** = 5.67x10-5 erg cm-2 s-1 K-4, la constante de Stefan Boltzmann; **R** es el radio de la estrella.

Para el caso del Sol tenemos:

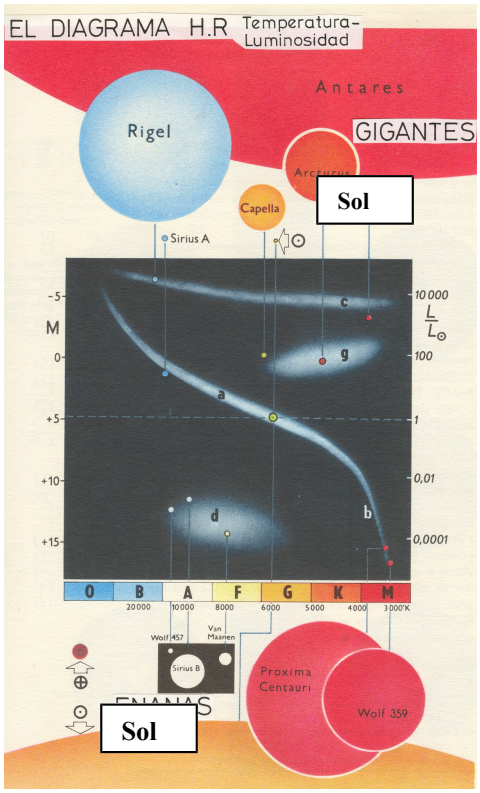
T = 5,800 °K ; R = 6.96x1010 cm; Substituyendo en la ecuación anterior:

L = 4π(6.96x1010)2(5.67x10-5)(5.8x103)4

L = 3.9x1033 erg/s. Esta es la energía que emite el Sol.

El diámetro de las estrellas

En este **Diagrama HR** se sitúa la posición del Sol en el centro, lo que demuestra su condición de estrella mediana en todo (edad, color, masa, magnitud absoluta, brillo, clase espectral…) y se compara su tamaño con las estrellas más pequeñas (abajo) y con las más grandes (arriba)



Propiedades de las estrellas

- Velocidad.
- Brillo.
- Color.
- Tamaño.
- Temperatura.
- Masa.
- Densidad.
- Presión.
- Distancia.
- Tipo espectral.
- Composición química.
- Edad.
- Fuentes de energía.
- Variabilidad.
- Asociación con otras estrellas: binarias, cúmulos.
- Magnitud (real y aparente).

Preguntas importantes

- ¿Dónde nacen las estrellas?
- ¿Cómo se forman?
- ¿Cuánto tiempo viven?
- ¿Cómo evolucionan?
- ¿Cómo terminan sus vidas?
- ¿Cuántas estrellas existen?
- ¿Cuántas tienen planetas?
- ¿Existe vida fuera de nuestro planeta?

La respuesta a estas preguntas será el motivo del próximo tema: *La evolución de las estrellas*