

## Elementos de Astrobiología

**Rosa M. Ros, Beatriz García, Ricardo Moreno, Alex Costa, Florian Seitz, Ana Villaescusa, Madeleine Rojas**

International Astronomical Union, Technical University of Catalonia, Spain, ITeDA and National Technological University, Argentina, Colegio Retamar, Spain, Escola Secundária de Faro, Portugal, Heidelberg Astronomy House, Germany, Diverciencia, Spain, SENACYT, Panama.

### Resumen

Este taller se divide esencialmente en dos partes. Los elementos necesario para la vida y después se hace un estudio somero de la tabla periódica atendiendo a los objetivos de este trabajo y se introducen algunos elementos de astrobiología

### Objetivos

- Comprender donde surgen los diferentes elementos de la tabla periódica
- Comprender las condiciones de habitabilidad necesarias para el desarrollo de la vida
- Manejar las directrices mínimas de la vida fuera de la tierra.

### Formación de sistemas planetarios

En el proceso de formación y nacimiento de una estrella se constituye a la vez su sistema planetario con los restos de material de ámbito próximo a la estrella.

De la misma forma que podemos conocer a composición de la estrella considerada estudiando su espectro, Se usa espectroscopia para conocer la atmosfera de los exoplanetas. Cada elemento químico, cada molécula, presenta un espectro determinado y único.

Comparando los espectros de luz de las estrellas de sistemas exoplanetarios que, eventualmente, atraviesen la atmosfera de uno de sus exoplanetas, se puede saber la composición química de ésta (figuras 1 y 2).

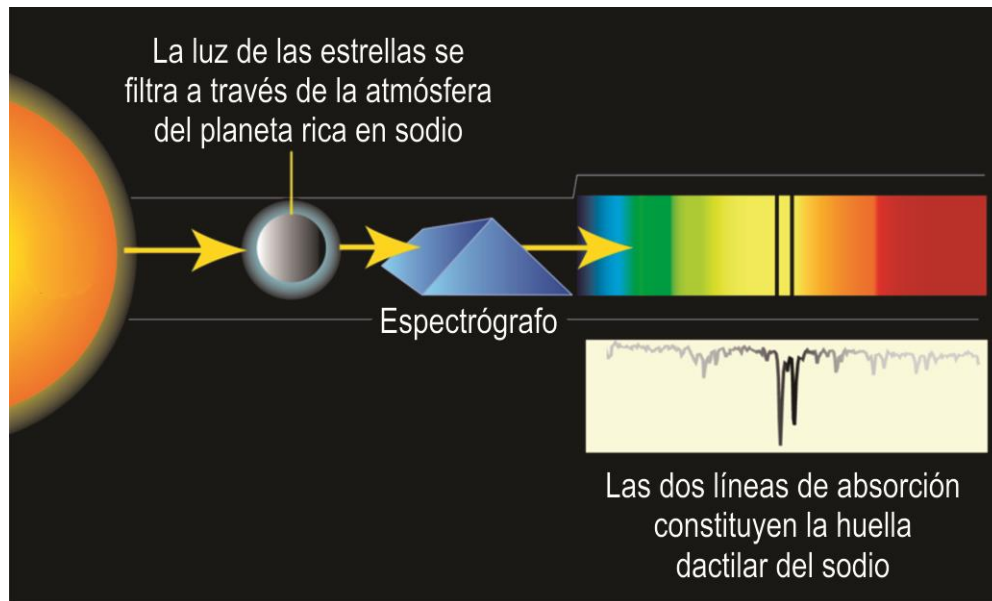


Fig. 1: Espectroscopia aplicada al estudio de la atmósfera del planeta HD 209458b, con la detección de sodio en su atmósfera. Fuente Wikipedia/ A. Feild (STSci)

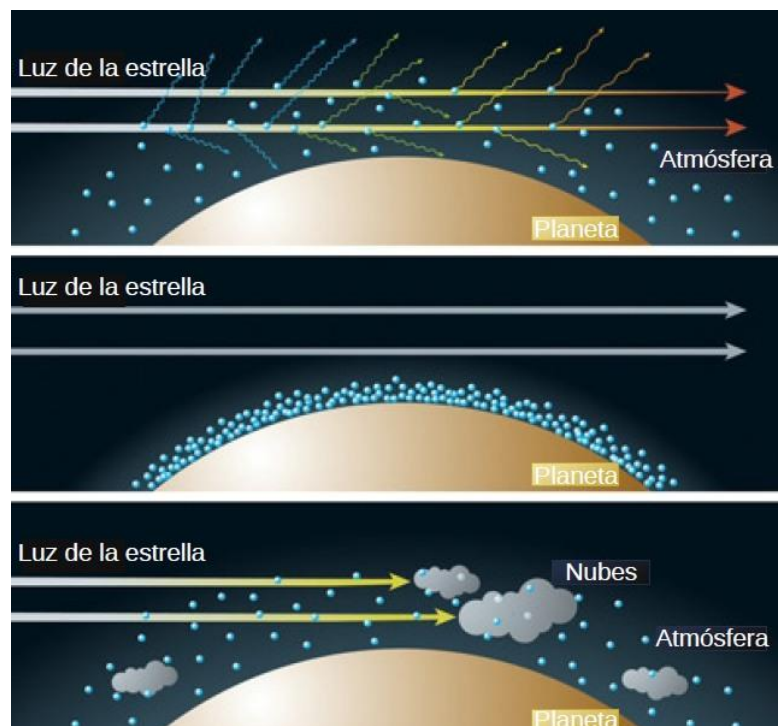


Fig 2: ¿Cómo sabemos si hay agua cómo incluso moléculas orgánicas? Cada elemento químico, cada molécula, presenta un espectro determinado y único. Comparando los espectros de luz de las estrellas de sistemas exoplanetarios que, eventualmente, atraviesen la atmósfera de uno de sus exoplanetas, se puede saber la composición química de ésta.

Pero veamos un ejemplo de formación de sistema planetarios usando un método para involucrar a los participantes en un modelo activo.

## Actividad 1: Formación de un Sistema Planetario a partir de gas y polvo

La temática de esta actividad consiste en explicar la formación del Sistema Solar o de cualquier sistema planetario según la hipótesis Nebular de Kant.

La dinámica consiste en dividir el grupo en dos subgrupos que a simple vista sean fáciles de identificar. Por ejemplo: el grupo de las chicas y el grupo de los chicos. (Se pueden tomar otros criterios, pero este generalmente es sencillo). Cada grupo tiene un rol, las Chicas pueden ser el gas y los Chicos el polvo (o viceversa). Si hay una diferencia sustancial en la cantidad de participantes de un grupo y otro, se recomienda que el grupo que representa al gas sea el que contenga más cantidad de participantes, ya que en un sistema planetario en formación la masa del gas es 100 veces la masa del polvo.

Los participantes a medida que van escuchando el relato van haciendo una dinámica de actuación sobre lo que escuchan, por ejemplo:

Texto del relato:	Actuación de los participantes:
Había una vez una nube de mucho gas y algo menos de polvo.	Todos están mezclados en una nube. Hay mayor cantidad de participantes que representan al gas. En la nube se agarran de las manos todos los participantes de manera aleatoria, formando como una red.
Entonces el gas comenzó a juntarse en el centro de la nube y a su alrededor el polvo.	Comienzan a separarse. Los participantes que representan al gas se acumulan en el centro y los que representan al polvo se agarran de las manos alrededor de los otros.
Había mucho movimiento, las partículas de gas atraían gas y las partículas de polvo atraían polvo.	Comienzan a rotar, moverse, chocar, vibrar, saltar. Algunos salen disparados como resultado de tanto movimiento y otros “rescatan”, atrapan, abrazan a esas partículas juntándose por identificación (gas con gas y polvo con polvo)
En el centro se formó un núcleo opaco denso rodeado de un disco de polvo y gas.	Los del centro (gas) se acumulan y a su alrededor se toman de la mano los participantes que representan al polvo en especie de un círculo. Aclaración: no todo el gas está en el centro, hay gas alejado, fuera del círculo.
Este núcleo es el que finalmente daría origen al Sol o a la estrella madre de un sistema extrasolar.	El Sol o la estrella anfitriona comienza a brillar por lo que sus rayos deben salir disparados hacia todas las direcciones. Aclaración: Al momento que el Sol o la estrella anfitriona comienza a brillar el gas “suelto” comienza a alejarse.

Algunos planetas pequeños se formaron por la unión de granos de polvo cada vez más y más grande, después rocas y así hasta que se hicieron planetas terrestres.	Comienzan a agruparse los participantes que representan el polvo que forma los planetas terrestres. Aclaración: no todo el polvo se queda en los planetas terrestres, debe haber algo de polvo en las regiones más alejadas.
Los planetas gigantes se formaron lejos del calor del Sol o la estrella anfitriona dónde el gas pudo reunirse sin inconvenientes.	El resto, los planetas gigantes, comienza a juntarse: mucho gas y algo de polvo. Aclaración: La disminución de la temperatura producto de la mayor distancia respecto al Sol o a la estrella anfitriona fue la causante de las diferencias principales entre los planetas rocosos internos y los gigantes externos.

Tabla 1: Historia para explicar la formación de un sistema planetario



Fig. 3: Todos están mezclados en una nube. Hay mayor cantidad de participantes que representan al gas. En la nube se agarran de las manos todos los participantes de manera aleatoria, formando como una red



Fig. 4: Comienzan a separarse. Los participantes que representan al gas se acumulan en el centro y los que representan al polvo se agarran de las manos alrededor de los otros



Fig. 5: Comienzan a agruparse los participantes que representan el polvo que forma los planetas terrestres

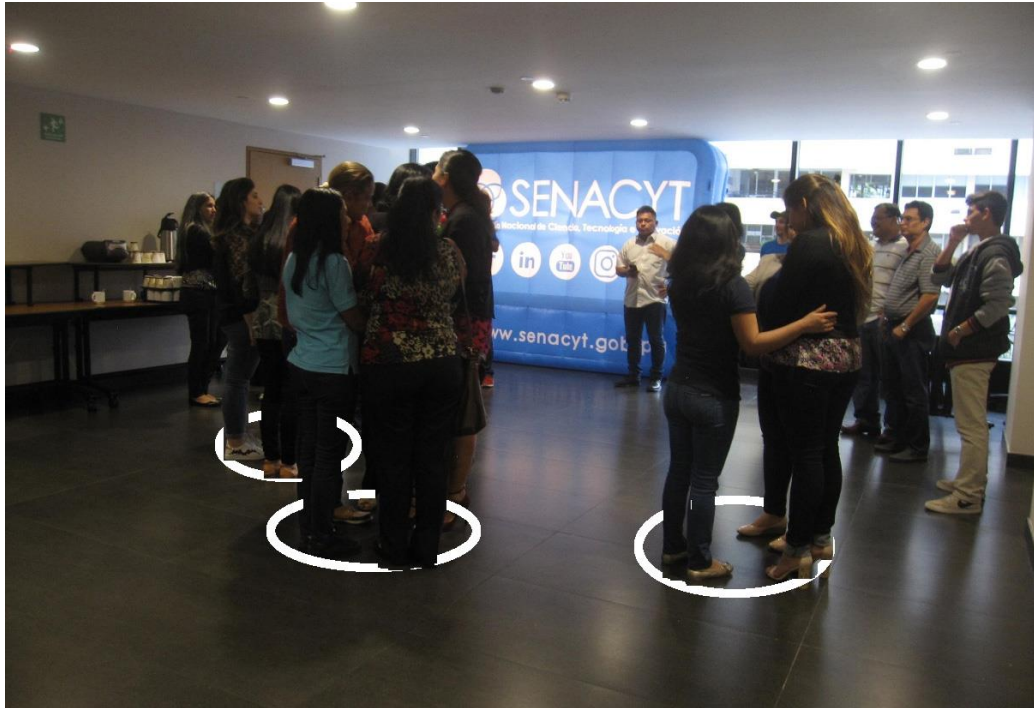


Fig. 6: El resto, los planetas gigantes, comienza a juntarse: mucho gas y algo de polvo.

## Actividad 2: Espectro de emisión

La espectroscopia nos permite conocer algunos datos de la composición química de los exoplanetas y sus atmósferas. Podemos visualizar el espectro de una bombilla (Fig. 7) con un DVD donde vemos las líneas de los gases que contiene en su interior (Fig. 8).



Fig. 7: Farola urbana que observamos con la ayuda de un DVD.

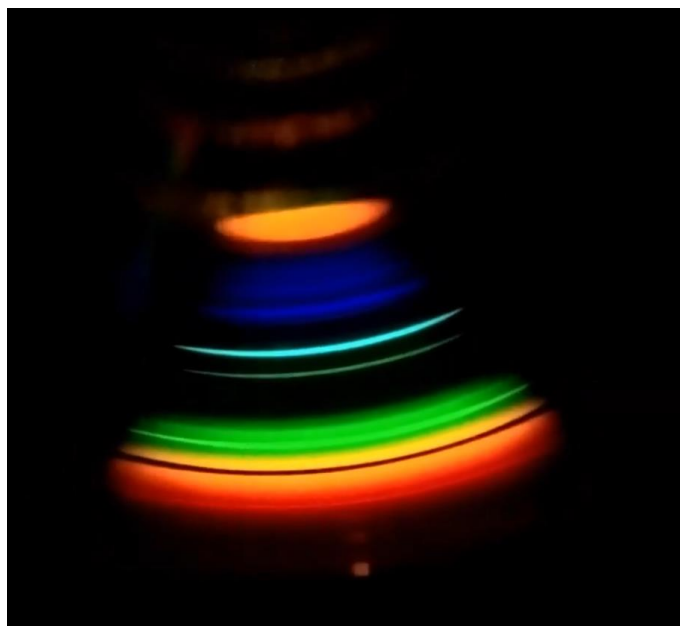


Fig. 8: Espectro de emisión de la farola

## Aspectos químicos de la evolución estelar

La tabla periódica nos permite darnos cuenta de hasta qué punto todo lo que somos surge a partir de la evolución de las estrellas.

En la tabla de la figura 3 se clasifican los diferentes elementos según

- 1) Elementos creados en los primeros minutos después del Big Bang. Inicialmente el Universo estaba formado esencialmente por el átomo más simple: el átomo de Hidrógeno. Un corto tiempo después este da lugar a elementos un poco más elaborados como el Helio, el Litio y el Berilio.
- 2) Los elementos que se forman en el núcleo de las estrellas por nucleosíntesis ya son algo más pesados como el Boro, Carbono, Nitrógeno, Oxígeno, Flúor, Neón, Sodio, Magnesio, Aluminio, Silicio, Fósforo, Azufre, Cloro, Argón, Potasio, Calcio, Sc, Titanio, V, Cromo, Manganeso y Hierro.
- 3) Los elementos más pesados que se forman en las grandes explosiones de supernovas son todos los demás. Algunos de ellos pueden ser inestables y se pueden producir en laboratorios.
- 4) Los elementos sintéticos producidos por el hombre en un laboratorio y que no se encuentran en la naturaleza

Elementos producidos en los primeros minutos después del Big Bang

Elements forjados dentro de las estrellas

Elements que aparecieron en las explosiones de supernovas

Elementos generados por el hombre en el laboratorio

1 H																	2 He															
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne															
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar															
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr															
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe															
55 Cs	56 Ba											61 La	62 Ce	63 Pr	64 Nd	65 Pm	66 Sm	67 Eu	68 Gd	69 Tb	70 Dy	71 Ho	72 Er	73 Tm	74 Yb	75 Lu						
87 Fr	88 Ra											104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og						
																		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Fig. 9: La tabla periódica desde el punto de vista de evolución estelar

## Actividad 3: Clasificación de los Elementos de la tabla periódica

A continuación, se da una lista de objetos que habrá que clasificar según los tres niveles o en tres cestos:

1. Elementos producidos en los primeros minutos después del Big Bang (Cesto azul)
2. Elementos forjados dentro de las estrellas (Cesto amarillo)
3. Elementos que aparecen en las explosiones de supernovas (Cesto rojo)

Hay que colocar en cada uno de los tres cestos (azul, amarillo y rosa) cada objeto de la siguiente lista, según su constitución:

Anillo: Oro Au	Broca de taladro recubierta con: Titanio Ti	Gas interior en globo de niño: Helio He	Limpiador de cacerolas: Níquel Ni
Batería de botón / móvil: Litio Li	Bujías de coche: Platino Pt	Hilo de cobre eléctrico: Cobre Cu	Solución de Yodo: Yodo, I
Botella de agua H <sub>2</sub> O:Hidrogeno H	Cacerola antigua: Aluminio Al	Mina de lápiz negro: Carbón C	Azufre en agricultura: Azufre, S
Lata de refresco: Aluminio Al	Reloj de muñeca de Titanio Ti	Medalla: Plata Ag	Tubería: Plomo Pb
Sacapuntas de Zinc: Zinc Zn	Clavo viejo oxidado: Hierro Fe	Termómetro: Galio Ga	Caja de cerillas: Fosforo P

Tabla 2: Objetos para clasificar

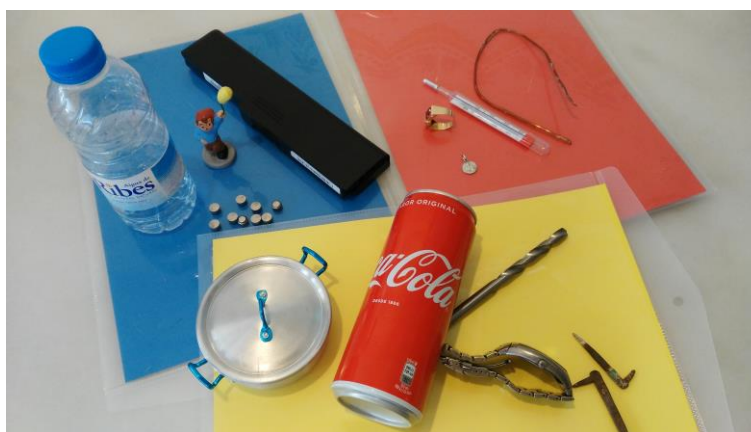


Fig. 10: Clasificación correcta. En la zona azul: Batería de móvil: Litio, Botella de agua H<sub>2</sub>O: Hidrógeno, Gas del interior de un globo de niño: Helio. En la zona amarilla: Lata de Coca cola: Aluminio Al, Broca de taladro recubierta con: Titanio Ti, Cacerola antigua: Aluminio Al, Reloj de muñeca de Titanio Ti., Clavo viejo oxidado: Hierro Fe, Mina de lápiz negro: Carbón/Grafito C, Azufre en agricultura: Azufre, S, Caja de Cerillas: Fosforo. P. En la zona roja: Hilo de cobre eléctrico: Cobre Cu, Bujías de coche: Platino Pt, Anillo: Oro Au, Medalla: Plata Ag, Termómetro: Galio, Ga, Sacapuntas de Zinc, Zn, Limpiador de cacerolas: Níquel Ni, Solución de Iodo: Iodo, I, Tubería, Plomo, Pb.

## Actividad 4: Hijos de las estrellas

A continuación, se incluye la lista bioelementos presentes en el ser humano ordenados según su abundancia.

- Elementos abundantes: oxígeno, carbono, hidrógeno, nitrógeno, calcio, fósforo, potasio, azufre, sodio, cloro, hierro y magnesio
- Elementos traza: flúor, zinc, cobre, silicio, vanadio, manganeso, yodo, níquel, molibdeno, cromo y cobalto

Los elementos químicos que se consideran esenciales para la vida son aquellos que:

- La insuficiencia del elemento provoca deficiencias funcionales (reversibles cuando vuelve a estar en las concentraciones adecuadas).
- Cuando el organismo carece de este elemento no crece ni completa su ciclo vital
- El elemento influye directamente en el organismo y está involucrado en sus procesos metabólicos.
- El efecto de dicho elemento no puede ser reemplazado por ningún otro.

No todos los seres vivos tienen la misma proporción de elementos esenciales. En la figura 9 se destacan los elementos esenciales, así como algunos que podrían ser reconocidos como tales: litio, cadmio, arsénico y estaño.

Elemento mayoritario				Elemento traza								Esencialidad discutida												
<u>H</u>																				He				
<u>Li</u>	Be																		<u>B</u>	<u>C</u>	<u>N</u>	<u>O</u>	<u>F</u>	Ne
<u>Na</u>	<u>Mg</u>																		Al	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Cl</u>	Ar
<u>K</u>	<u>Ca</u>	Sc	Ti	<u>V</u>	<u>Cr</u>	<u>Mn</u>	<u>Fe</u>	<u>Co</u>	<u>Ni</u>	<u>Cu</u>	<u>Zn</u>	Ga	Ge	<u>As</u>	<u>Se</u>	<u>Br</u>	Kr							
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	<u>Mo</u>	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	<u>Cd</u>	In	<u>Sn</u>	Sb	Te	<u>I</u>	Xe							
Cs	Ba	La	Hf	Ta	<u>W</u>	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn							
Fr	Ra	Ac																						

Fig. 11: Tabla periódica de elementos esenciales para la vida

Comparando con la tabla periódica de la figura 9 con la figura 11, se observa que “todos los elementos mayoritarios (salvo el hidrógeno)” se han producido dentro de las estrellas. Sin los elementos más pesados creados gracias a la evolución estelar no podríamos existir. Los que figuran solamente como trazas, hay algunos que se han formado dentro de una estrella pero otros en una explosión de supernova, pero los mayoritarios todos surgen de las reacciones de núcleo síntesis dentro del vientre de las estrellas: ¡Somos hijos de las estrellas!

## El Sol no es una estrella de primera generación

Las estrellas de primera generación están constituidas esencialmente por hidrogeno y helio (que ellas mismas han generado). Las estrellas que presentan elementos más elaborados significan que su nube inicial parte de los restos de la explosión de una supernova y por eso presenta algunos elementos mucho más evolucionados. Por ejemplo el espectro solar tiene unas líneas muy marcadas de Sodio lo que hace pensar, por su masa y estado de evolución, que no puede ser una estrella de primera generación, ese sodio no puede haberse generado en su propio interior. Además, en el sistema planetario se detectan multitud de elementos que surgen después de la explosión de una supernova por lo cual hay que pensar que posiblemente el Sol de formo a partir de una nube inicial que correspondía a los restos al menos de dos explosiones de supernovas. En consecuencia, cabe pensar que el sol es una estrella de tercera generación.

Veamos a continuación un par de ejemplos de figuras de espectros: el espectro de una estrella de primera generación donde solo se aprecian las líneas de los elementos primigenios (figura 12). El espectro solar con las líneas de sodio ya mencionadas (figura 14).

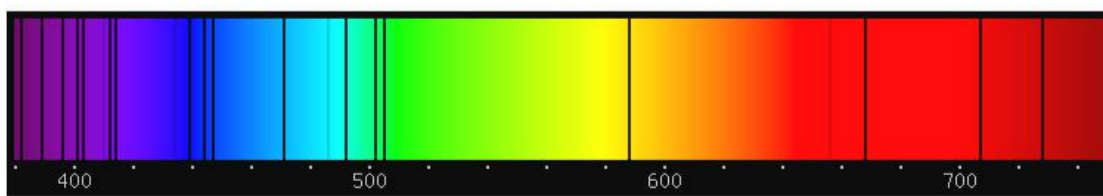


Fig. 12: Espectro de primera generación (impresión de artista). Las estrellas de primera generación son predominantemente decenas o cientos de veces más masivas que el sol. Vivieron rápido, murieron jóvenes y no han sobrevivido hasta nuestros días. Solo habría líneas de Hidrogeno, Helio y a lo sumo Litio.

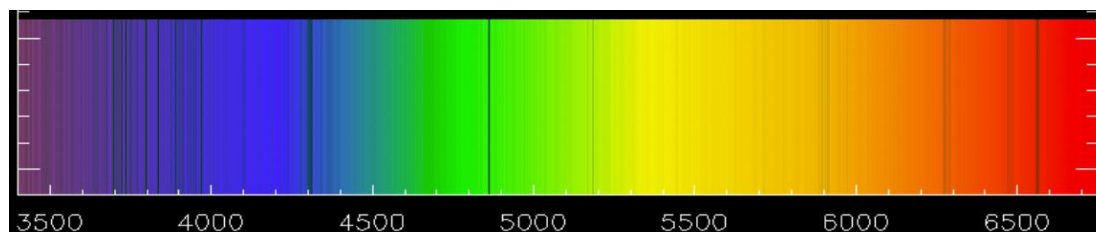


Fig. 13: Espectro de SMSS J031300.36-670839.3 estrella de segunda generación que solamente presenta líneas de hidrogeno y carbón.

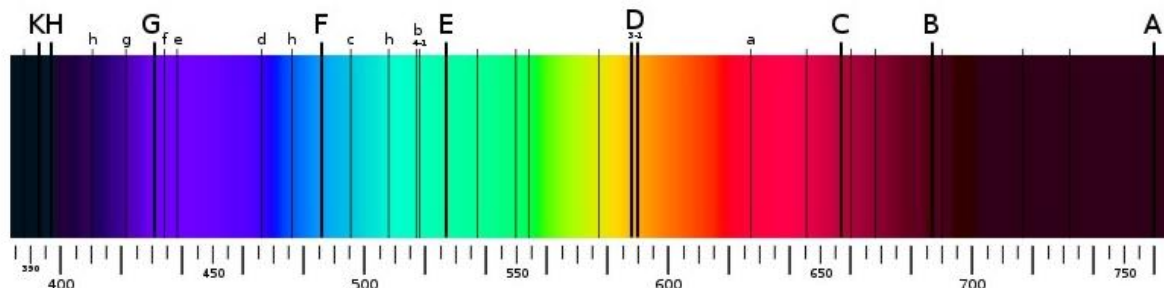


Fig. 14: Espectro del Sol. Con muchas líneas espectrales de diversos elementos y entre ellos del Sodio

## Actividad 5: Líneas de Fraunhofer del Sol

El espectro del Sol es continuo, con unas líneas oscuras llamadas líneas de Fraunhofer, que corresponden a los elementos químicos que contiene su atmósfera (Fig. 15). Se pueden ver a simple vista en la reflexión de la luz solar en un DVD.

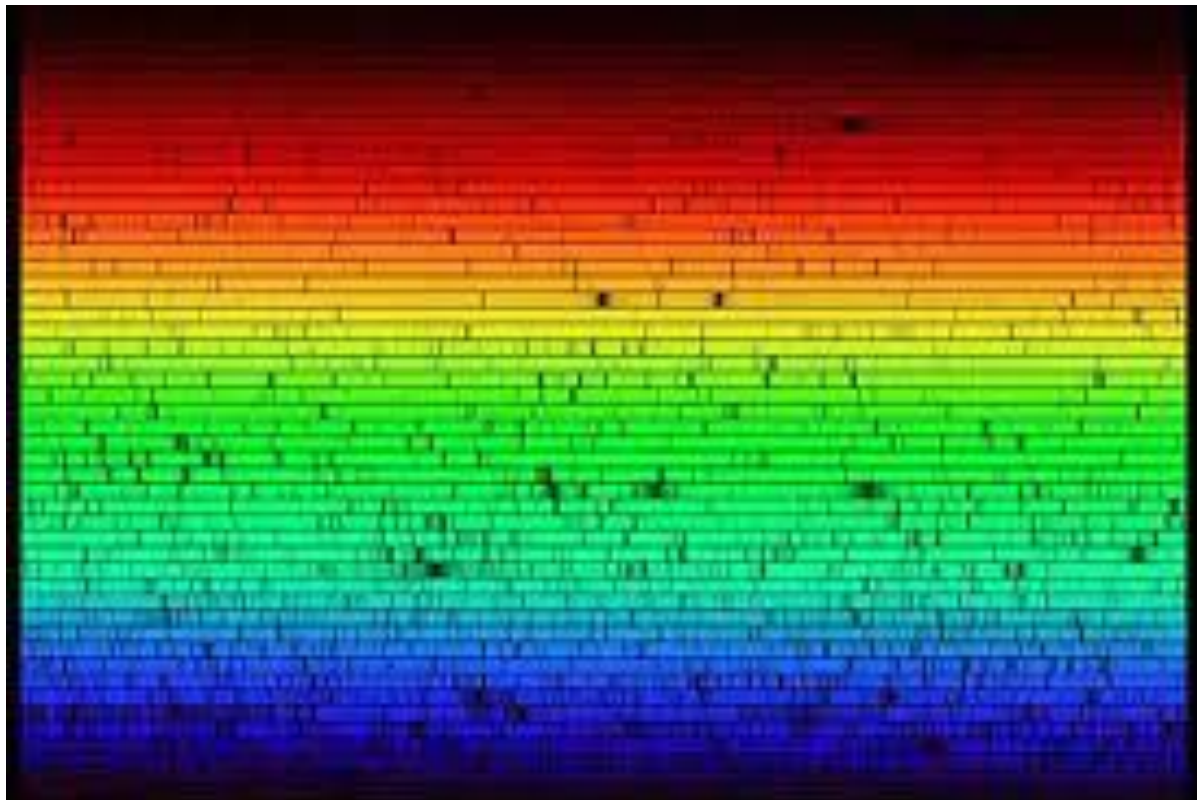


Fig. 15: Espectro solar. Se observan muchas líneas del Fe, el triplete del Mg (en el verde), el doblete del Na (en el amarillo) (Crédito NOAO)

En la reflexión del Sol en un DVD, vemos que hay un reflejo de primer orden muy brillante, cerca del centro, y separado por una pequeña parte oscura, se ve el reflejo de segundo orden, que ya no deslumbra y es el que usaremos (Fig. 16).

Para observar sólo el reflejo de segundo orden y no el de primer orden, meteremos un trozo de DVD en la cajita de la figura 17. (En la observación de la farola urbana, como es mucho menos brillante que el Sol, usamos el reflejo de primer orden y no hace falta la cajita).

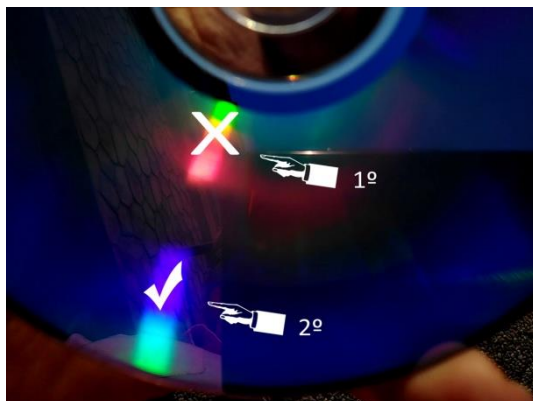


Fig. 16: No usaremos el reflejo de primer orden, cerca del centro, sino el de segundo orden, que es menos brillante

Para preparar la cajita mencionada solo es necesario recortar la fotocopia de la figura 17 sobre cartulina. El procedimiento consiste en recortar por la línea continua y doblar por las líneas de puntos hasta conseguir la cajita de la figura 17. Después recortaremos un trozo de DVD y los pegaremos en la zona indicada en la figura 17, con la zona brillante hacia el interior de la cajita.

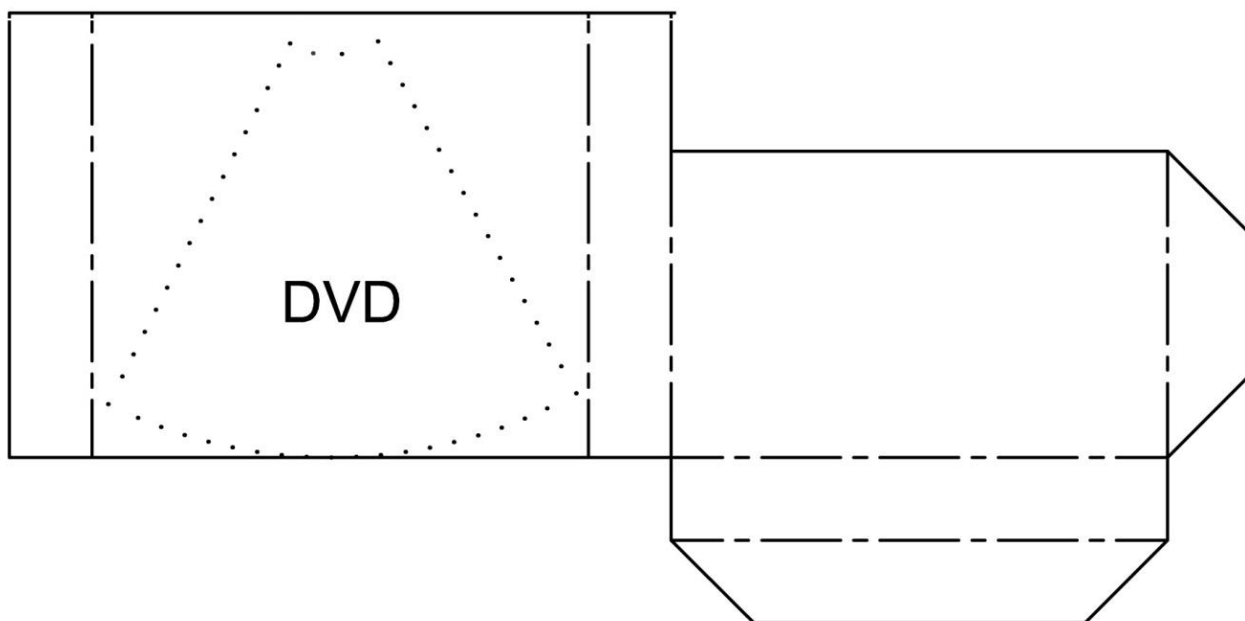


Fig. 17: Plantilla de la cajita



Fig. 18a: Detalles para usar la cajita montada

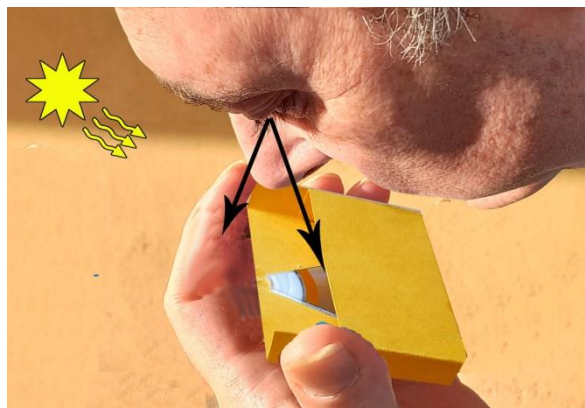


Fig. 18b: Como se usa la cajita

Para realizar la actividad de observación es suficiente salir al exterior en un día soleado y ponerse frente al Sol. Hay que poner la cajita frente a la cara del observador, con el borde superior a la altura de tus ojos, como se ve en la figura 18b. Mirando hacia el DVD de dentro, hay que moverse despacio hasta que se vea en el DVD el reflejo radial multicolor y brillante del Sol. Acercamos entonces la cara a la cajita, mirando siempre al reflejo, que se irá viendo cada vez más ancho. Cuando tengamos el ojo casi tocando la ventana, se verán dentro de la zona de los colores unas líneas negras finas y nítidas. Son las líneas espectrales de los elementos químicos que hay en el Sol (Fig. 19a). Se ven muchas líneas, unas más intensas que otras. La principal que se ve en el azul proviene del Hidrógeno, en el verde se ven muy bien tres rayas muy juntas, que es el triplete del Magnesio, y otra separada que procede del Hierro (Fig. 19b). En la parte del amarillo se ve una raya doble, que es del Helio y del Sodio. En la parte roja se ve una línea intensa, del Hidrógeno (Fig. 20).

Cuando se tiene práctica para mirar el reflejo de segundo orden, se puede prescindir de la cajita y ver las líneas directamente en un DVD. Pero al principio, es recomendable usar la cajita.

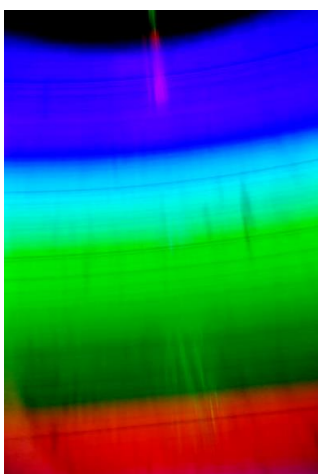


Fig. 19a: Las líneas negras finas y nítidas son las líneas espectrales de los elementos químicos que hay en el Sol.

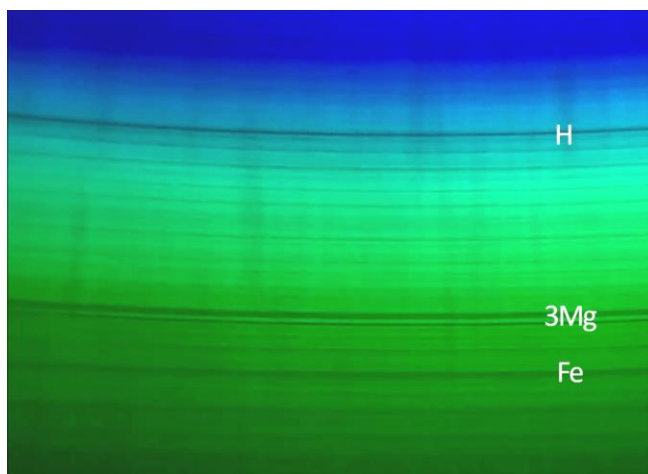


Fig. 19b: Las líneas del Hidrógeno, las tres líneas de Magnesio y la línea del Hierro.

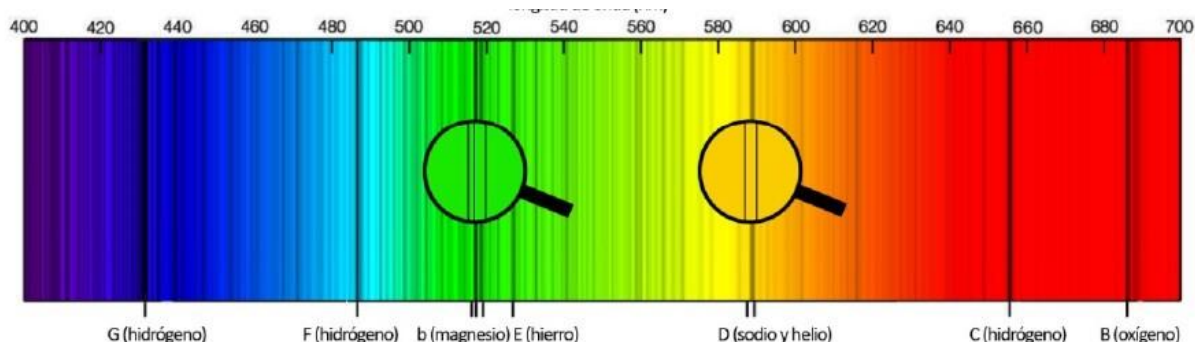


Fig. 20: Líneas de Fraunhofer de diferentes elementos químicos

## Zona de Habitabilidad

Cuando hablamos de vida se suele asumir que se trata de formas de vida basadas en el carbono y así se define un criterio central para la habitabilidad, que es la presencia de agua líquida. Se denomina zona de habitabilidad estelar a la región alrededor de una estrella en la que el flujo de radiación sobre la superficie de cualquier planeta (o satélite) rocoso permitiría la presencia de agua en estado líquido. Suele darse en cuerpos de masa comprendida entre 0,5 y 10  $M_t$  y una presión atmosférica superior a 6,1 mbar, correspondiente al punto triple del agua a una temperatura de 273,16 K (cuando coexiste agua en forma de hielo, líquido y vapor).

La zona de habitabilidad depende de la masa de la estrella. Si aumenta la masa de una estrella, su temperatura y brillo aumentan y en consecuencia la zona de habitabilidad es cada vez más lejana.

Que un planeta se encuentre en la zona de habitabilidad no implica que debe de existir vida. Por ejemplo, en nuestro sistema solar la zona de habitabilidad incluye los planetas Tierra y Marte, pero de los dos, en el único en lo cual se conoce vida es en la Tierra. La zona de habitabilidad para el sistema solar está comprendida entre 0,84 UA y 1,67 UA. Venus está a 0,7 UA con un efecto invernadero descontrolado y en cambio Marte está a 1,5 UA sin la existencia de agua superficial, mientras se espera la existencia de agua congelado subterráneo.

Además de la existencia de agua superficial líquida hay otras condiciones para la habitabilidad de un planeta. Veamos con detalle las más importantes:

- **Una distancia orbital** del planeta que lo sitúe en la zona habitable es una condición necesaria, pero no suficiente para que un planeta sea hospitalario para la vida. Ejemplo: Venus y Marte.
- Un factor que influye decisivamente en la habitabilidad es **la masa del planeta**. Ésta debe ser lo suficientemente grande para que su gravedad sea capaz de retener la atmósfera. Eso es el razón principal por lo cual Marte no es habitable en el presente, como perdió el mayor parte de su atmósfera y todo el agua superficial, lo cual tenía en sus primeros mil millones de años.

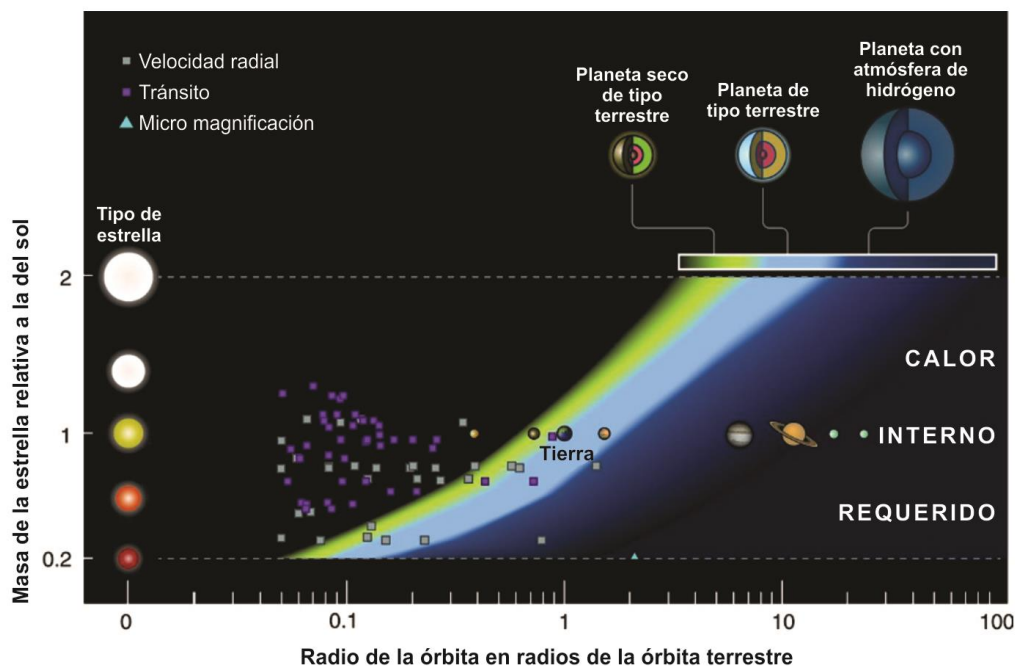


Fig. 21: Zona de habitabilidad según sea la estrella anfitriona

De todas formas puede ocurrir que aunque los planetas no estén en la zona de habitabilidad, puede que en su interior se den los factores necesarios para la existencia de algún tipo de vida, sea en los planetas mismos o en algunas de sus lunas, como podría ser el caso de algunas lunas de Júpiter o Saturno.

## Actividad 6: ¿Agua líquida en Marte?

La presión atmosférica en Marte es débil, solo un 0,7% de la terrestre. A pesar de la baja presión, en Marte se forman nubes y hielo de agua en los polos del planeta, entonces cabe pensar ¿Por qué no hay agua líquida en la superficie? La respuesta es que, a esa presión, el agua líquida no es estable y pasa a vapor (hierve).



Fig. 22a: Agua caliente a 80° en el interior de la jeringuilla antes de tirar del émbolo. Fig.22b: Al tirar del émbolo el agua empieza a hervir sin estar a 100°

Con una jeringuilla podemos simular esta situación. Ponemos agua caliente próxima a hervir dentro de la jeringuilla, por ejemplo, a unos 80° C y tapamos con el dedo la salida del líquido. Al tirar del émbolo, dentro baja la presión y el agua comienza a hervir y pasa a vapor, y poco a poco desaparece. La presión en Marte es tan reducida que para simular la presión marciana deberíamos tirar del émbolo hasta 9 m.

## Actividad 7: Efecto invernadero

Para comprender el efecto invernadero que se da por ejemplo en Venus podemos realizar una simple experiencia con algunas botellas de plástico. Ponemos un poco de tierra en el interior de dos botellas de plástico vacías, y en una tercera recortada a lo largo por la mitad (Fig. 23). Finalmente insertamos un termómetro en el tapón de cada botella.



Fig. 23: Botella preparada para el experimento.

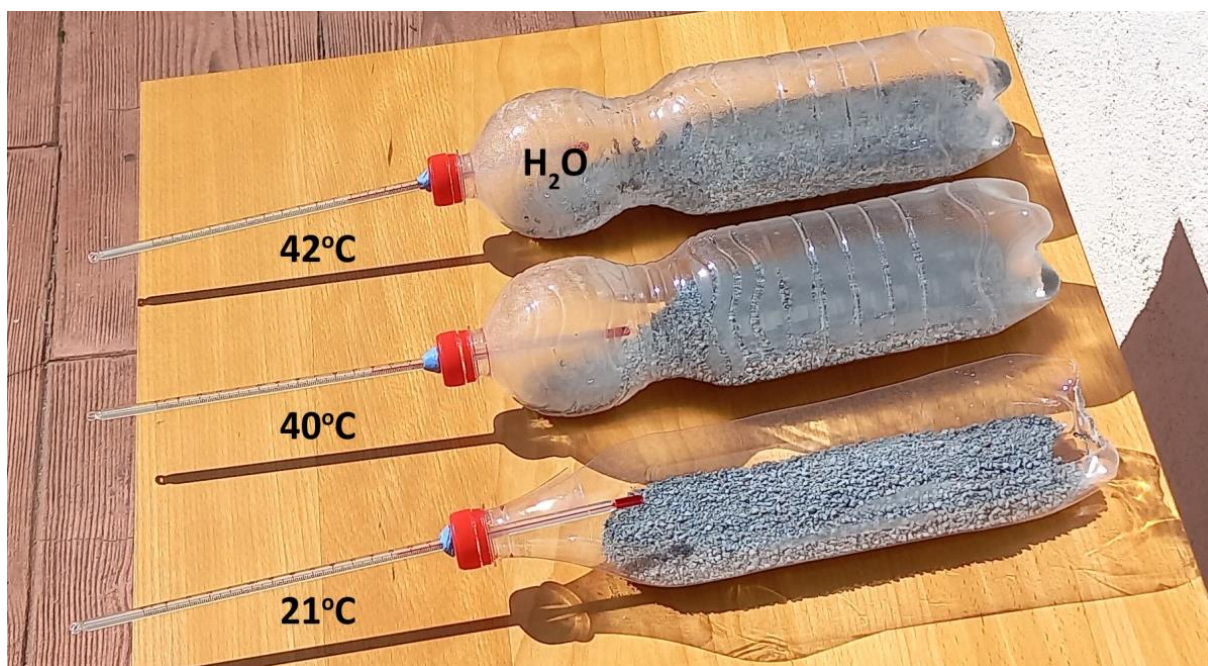


Fig. 24: Las tres botellas con las correspondientes temperaturas obtenidas tras la exposición al sol.

La botella recortada simula al planeta sin nubes, la primera botella entera simula el planeta con nubes, y en la última, ponemos unas gotas de agua en su interior, para simular atmósfera con vapor de agua.

Ponemos las tres botellas al sol y medimos la temperatura del interior cada 5 minutos. Anotamos las mediciones para determinar cómo influye el efecto invernadero. Por ejemplo, en nuestra experiencia (Fig. 24), en la botella recortada la temperatura solo ha alcanzado 21°C, mientras que en las otras dos llegaron a 40° C y la que incluye vapor de agua llega hasta 42°C. Es claro la diferencia entre las botellas con o sin la parte superior que como se ha mencionado equivale a la atmósfera.

## Preliminares de Astrobiología: El proceso de la formación de la atmósfera terrestre

El conocimiento de la fotosíntesis es esencial para entender las relaciones de los seres vivos y la atmósfera, y para entender el balance de la vida sobre la tierra, dado el profundo impacto que tiene sobre la atmósfera y el clima terrestres.

La fotosíntesis es un proceso físico-químico por el cual plantas, algas y ciertas bacterias fotosintéticas utilizan la energía de la luz solar para sintetizar compuestos orgánicos. Se trata de un proceso fundamental para la vida sobre la tierra y tiene un profundo impacto sobre la atmósfera y el clima terrestres: cada año los organismos con capacidad fotosintética convierten en carbohidratos más del 10% del dióxido de carbono atmosférico. Esto es, que el aumento de la concentración de dióxido de carbono atmosférico generado por la actividad humana, tiene un gran impacto sobre la fotosíntesis. Desde el punto de vista evolutivo, la aparición de la fotosíntesis oxigénica (que produce oxígeno) supuso una verdadera revolución para la vida sobre la tierra: cambió la atmósfera terrestre enriqueciéndola, hecho que posibilitó la aparición de organismos que utilizan el oxígeno para vivir.

Fotosíntesis Oxigénica	Fotosíntesis Anoxigénica
$\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- + 1/2 \text{O}_2$	$\text{H}_2\text{S} \rightarrow 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- + \text{S}$

Fig. 25: Fotosíntesis oxigénica y anoxigénica

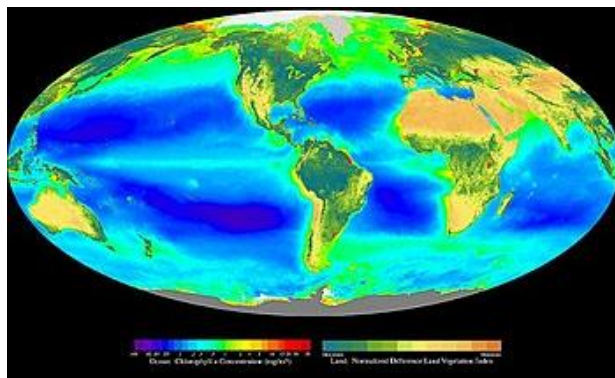


Fig. 26: Imagen que muestra la distribución de la fotosíntesis en el globo terrestre; mostrando tanto la llevada a cabo por el fitoplancton oceánico como por la vegetación terrestre.

Las cosas no siempre fueron como nosotros las conocemos; la evolución de la tierra, la evolución de la atmósfera primitiva, la evolución de los metabolismos primitivos, constituye un entramado de acontecimientos que conduce hasta unas bacterias fotótrofas que utilizan la luz como fuente de energía pero liberan azufre (llamada fotosíntesis anoxigénica, no libera oxígeno). Posteriormente aparece en la Tierra la fotosíntesis oxigénica que libera oxígeno a la atmósfera, incrementando su concentración y posibilitando la gran explosión de la vida que conocemos ahora. Se puede decir que atmósfera primitiva de nuestro planeta apenas contenía trazas de oxígeno. Pero hubo vida antes. Y hay acuerdo en que el aire que respiramos actualmente, con un 21% de oxígeno, es producto de la actividad biológica de la tierra y muy diferente a como debió ser la atmósfera de la tierra primitiva.

## El proceso de formación de materia orgánica. ¿Por qué son verdes las plantas?

La fotosíntesis o también llamada función clorofílica, consiste en la conversión de materia inorgánica a materia orgánica gracias a la energía que aporta la luz. La vida en nuestro planeta se mantiene fundamentalmente gracias a la fotosíntesis que realizan en el medio acuático las algas y algunas bacterias y en el medio terrestre las plantas, que tienen la capacidad de sintetizar materia orgánica (imprescindible para la constitución de los seres vivos) partiendo de la luz y la materia inorgánica. De hecho, cada año los organismos fotosintetizadores fijan en forma de materia orgánica en torno a 100 000 millones de toneladas de carbono.

Los pasos iniciales de conversión de energía lumínica en energía química dependen de moléculas denominadas pigmentos fotosintéticos. El término 'pigmento' es utilizado para describir una molécula que poseen la capacidad de captar energía de los fotones (energizando o excitando el nivel energético de electrones de su estructura atómica, es decir una molécula que se "excita con la luz"). Todos los pigmentos biológicos absorben selectivamente ciertas longitudes de onda de la luz mientras que reflejan otras.

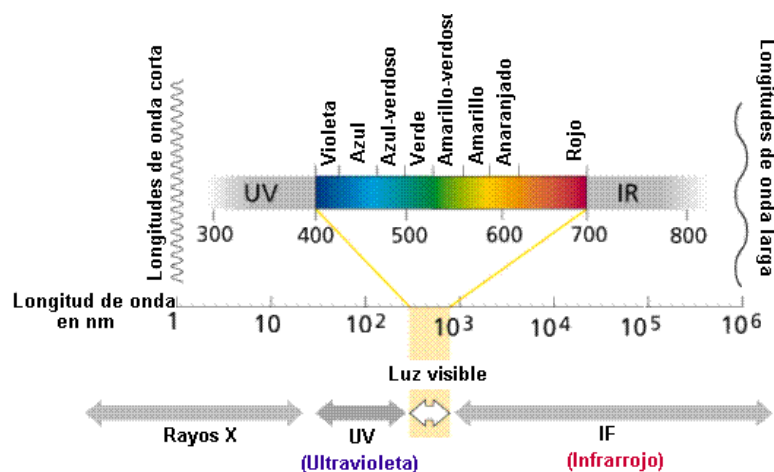


Fig. 27: El espectro de luz. Ampliado se representa el espectro de luz visible.

La luz solar está compuesta de diferentes colores; cada uno tiene una longitud de onda diferente que oscila entre 400 y 700 nm. La clorofila absorbe las longitudes de onda rojas y azules para usarlas como energía, pero no absorbe el verde. El color verde rebota de la hoja y nuestros ojos la ven verde.

## Actividad 8: Producción de oxígeno a partir de CO<sub>2</sub> usando la fotosíntesis o función clorofílica

En esta propuesta experimental se utilizaremos hojas de una planta para producir oxígeno gracias al carbono del bicarbonato sódico y la luz de una lámpara. Utilizaremos 2 frascos de vidrio transparente y sobre ellos colocaremos papel de celofán azul and rojo.

Las hojas vegetales verdes deben de ser frescas, consistentes y bien verdes, por lo que se aconseja espinaca o acelga. Con ayuda de un sacabocados o una perforadora de papel, cortaremos discos de hojas uniformes (calcular tener 10 discos por frasco, evitando las zonas con nervaduras centrales).

Prepararemos una solución al 2,5% de bicarbonato de sodio, es decir 25 gr de bicarbonato por 1 litro de agua, con el objetivo de impregnar los discos recortados de las hojas con ella y conseguir aumentar la cantidad de carbono disponible en forma de bicarbonato sódico haciendo así más visible y más rápido, el fenómeno que deseamos observar. Colocamos 20 ml de la solución de bicarbonato de sodio en cada frasco de vidrio.

Sacamos el émbolo de una jeringa desechable de 10 ml y ubicamos los discos en el cuerpo de la misma, luego colocamos suavemente el émbolo y succionamos 10 ml de la solución de bicarbonato hasta que los discos estén suspendidos en la solución.

Debemos reemplazar el aire existente en los discos por la solución de bicarbonato. Para lograr esto, obturar el extremo de la jeringa con un dedo y succionar fuertemente, procurando hacer

el vacío. En los espacios internos del tejido vegetal se reemplazará aire por solución de bicarbonato: de este modo, los discos no flotarán en la solución de bicarbonato, y la solución será una fuente de carbono disponible y próximo a las estructuras fotosintéticas de la hoja.

Colocamos los discos de hoja así tratados en cada frasco de vidrio (que a su vez contienen solución de bicarbonato al 2,5%). Cubrimos con un papel de aluminio uno de los vasos, y recubrir los demás frascos con el papel de celofán de colores. Sobre cada frasco (con el papel cubriéndolo) debe instalarse una lámpara, de manera que el haz de luz incida sobre la muestra a estudiar: todas a igual distancia (es necesario disponer de fuentes de luz individuales para cada frasco, de la misma potencia, no menor que 70w: pueden ser fuentes fluorescentes, pero se recomienda el uso de LED; evitar las incandescentes, como las lámpara halógenas, pues pierden mucha energía como calor).



Fig. 28a y Fig. 28b: La solución con la lámpara con papel rojo y con papel azul

Cuando encendemos la luz, comenzamos a medir el tiempo con un cronómetro, lo que se debe registrar es el tiempo para el cual los discos comienzan a ascender en la solución.

El proceso no es inmediato, puede demorar unos 5 minutos para que los discos empiecen a ascender (depende de la intensidad de las luces y la distancia a que se coloca la lámpara). Los discos comienzan a flotar al ir liberando oxígeno en forma de burbujas, que ayudan en la ascensión. Se observará que la ascensión en cada frasco es en tiempos diferentes, dependiendo del color del haz de luz: resulta más rápido para la luz azul. De esta forma demostramos que la componente de alta energía de la radiación electromagnética es la más eficiente en el proceso, la tasa fotosintética está directamente relacionada con el tiempo para el cual los discos ascienden, fenómeno vinculado con la producción de oxígeno. La tasa fotosintética es mayor para el azul que para el rojo. Por tanto con este experimento estamos demostrando como las plantas y otros organismos fotosintéticos son responsables de la existencia de Oxígeno en nuestra atmósfera. La sustitución del aire por la solución de bicarbonato, acelera el proceso y nos permite visualizarlo en menor tiempo.



Fig. 29a y Fig. 29b: La solución con las lámparas de diferente color mostrando como ascienden los discos de forma diferente en cada caso

Además, con el tiempo, la interacción de la radiación UV del Sol con las moléculas de oxígeno, generaron el ozono ( $O_3$ ), que nos protege de la radiación UV más energética, pero que deja pasar los UVA y UVB, sin los cuales no podría haber continuado el proceso fotosintético en nuestro Planeta.

Variables alternativas a explorar: concentración de bicarbonato en la solución utilizada, temperatura, fuentes de luz de diferentes colores e intensidades (manteniendo el resto de las condiciones constantes y el control de oscuridad en todos los casos), hojas pre-expuestas a luz u oscuridad, etc.

## Actividad 9: Comprobar la posibilidad de vida en condiciones extremas

La fermentación alcohólica es un proceso anaeróbico realizado por las levaduras (hongos). Junto con las bacterias, el proceso fermentativo es la base para la obtención de energía en los microorganismos. Las levaduras transforman el azúcar (glucosa) en alcohol etílico o etanol, y dióxido de carbono. La fermentación es un proceso de rendimiento energético bajo, mientras que respirar es mucho más rentable y más reciente desde el punto de vista evolutivo.

Así pues, como el azúcar se transforma en alcohol etílico y dióxido de carbono, vamos a basar nuestro experimento en la presencia de este gas. Si se observa la presencia del mismo sabremos que ha habido fermentación y por lo tanto se ha probado la posibilidad de vida.

Las experiencias de microbiología requieren tiempo para llegar a conclusiones fiables, en nuestro caso, la presencia o ausencia del dióxido de carbono nos va a permitir saber si ante un cambio de condiciones ambientales podemos deducir que la vida es posible. En todos los casos de nuestro experimento partimos de un cultivo en el que el agua está presente. Para disponer del tiempo suficiente para observar la evolución del experimento, se prepara al principio del taller y se puede observar la situación de los 7 procedimientos distintos después de una hora.

Para ello usaremos 1 cucharada de levadura (utilizar levadura para fabricar pan que se puede adquirir en un supermercado), es un microorganismo vivo fácil de conseguir, 1 vaso de agua

tibia (algo más de medio vaso entre 22° y 27°C), 1 cucharada de azúcar que puedan consumir los microorganismos considerados.

Usaremos el mismo procediendo en el experimento de control y los otros experimentos desarrollados en condiciones extremas.

### **Procedimiento en un experimento de control**

En un vaso de vidrio se disuelve el azúcar en el agua caliente. Luego se coloca la levadura y se disuelve bien, con ayuda de una cuchara. Enseguida se coloca la mezcla obtenida en una bolsita plástica y se coloca dentro de una bolsa hermética de las que se utilizan en los supermercados extrayendo todo el aire del interior antes (extendiéndola sobre la mesa y presionado con las manos extendidas) de cerrarla. Es importante cuidar de no dejar nada de aire dentro de la bolsa. A los 5 minutos debemos observar como empieza a acumularse en la bolsa el dióxido de carbono. A los 20 minutos deben aparecer burbujas en el interior de la bolsa por el desprendimiento de este gas, uno de los productos finales de la fermentación que se produce en el interior de la bolsa. La presencia de este gas demuestra que los microorganismos están vivos.



Fig. 30: El experimento de control con las burbujas de dióxido de carbono que muestran la existencia de vida

**Procedimiento en un “planeta alcalino” (p.ej. NEPTUNO o Titán ambos tienen presencia de amoníaco):** Repetir la experiencia utilizando una base de la que se disponga (bicarbonato sódico, amoníaco...) en el agua de cultivo y esperar para ver si aparecen burbujas, es decir si los microorganismos pueden vivir o no. Escalas de Ph **ALCALINO:** Bicarbonato sódico: Ph 8,4 y Amoníaco casero: Ph 11

**Procedimiento en un “planeta salino” (p.ej. MARTE o Ganimedes se cree que tiene agua con concentración de sal)** .Repetir la experiencia disolviendo distintas cantidades de cloruro sódico en el agua del cultivo (sal común).



Fig. 31a: La solución alcalina.

Fig. 31b: La solución salina ambas con burbujas

**Procedimiento en un “planeta ácido” (p.ej. VENUS que tiene lluvias de ácido sulfúrico):**

Repetir la experiencia disolviendo vinagre, limón....o cualquier otro ácido del que se disponga en el agua de cultivo. Escalas de Ph **ACIDO**: Vinagre: Ph 2,9 y Limón: Ph 2,3

**Procedimiento en un “planeta helado” (p.ej. Europa o Trapist-1 h)**

Colocar la bolsa en un recipiente lleno de hielo y observar si hay actividad, es decir si aparecen burbujas de CO<sub>2</sub>. También utilizarse un congelador. Si no aparecen burbujas no hay vida.

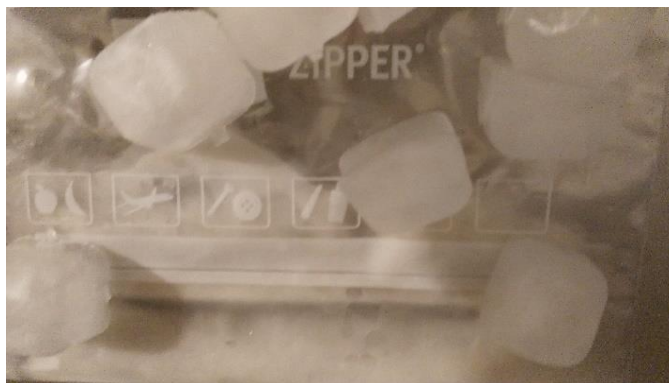


Fig. 32: La solución helada sin burbujas

**Procedimiento en un “planeta con UV” (p.ej. MARTE):** Realizar el mismo experimento pero manteniendo la bolsa hermética con la levadura y azúcar bajo la acción de la luz UV producida por una lámpara especial para ello. Si la lámpara de UV utilizada es de alta energía (UV-C) o (UV-B) no aparecerán burbujas lo cual significa que no hay vida posible. Pero las lámparas comercializadas, llamadas de “luz negra”, son de baja energía ultra violeta (UV-A), es decir que no son peligrosas para la vida y suelen ser usadas en jardinería por los buenos resultados que dan en facilitar el crecimiento de las plantas. Usando este tipo de lámparas se observa que se forma mayor número de burbujas. Si aparecen burbujas hay vida.

**Procedimiento en un “planeta cálido” (p.ej. VENUS debido al efecto invernadero)**

Realizar el mismo experimento con el agua muy caliente. Para el caso de Venus debemos usar agua hirviendo. (Si se dispone de termómetro se puede repetir a distintas temperaturas y sacar una tabla de actividad a dichas temperaturas). Si aparecen burbujas hay vida

## Planetas y exoplanetas con condiciones extremas y semejantes a las expuestas en esta actividad

**VENUS.** Tiene una densa atmósfera, compuesta en su mayor parte por dióxido de carbono y una pequeña cantidad de nitrógeno. La presión al nivel de la superficie es 90 veces superior a la presión atmosférica en la superficie terrestre. La enorme cantidad de dióxido de carbono de la atmósfera provoca un fuerte efecto invernadero que **eleva la temperatura de la superficie del planeta hasta cerca de 464°C en las regiones menos elevadas cerca del ecuador**. Esto hace que Venus sea más caliente que Mercurio, a pesar de hallarse a más del doble de la distancia del Sol que este y de recibir solo el 25 % de su radiación solar. Las nubes están compuestas principalmente por gotas de dióxido de azufre y **ácido sulfúrico**, y cubren el planeta por completo, ocultando la mayor parte de los detalles de la superficie a la observación externa.

**MARTE.** Bajo la superficie helada de ese mundo desértico **podría haber agua salada. Esa agua podría ser el hogar de formas de vida capaces de tolerar estas condiciones tan extremas**. En el pasado fue un lugar muy diferente. Sabemos que pudo parecerse mucho a la Tierra. Tuvo océanos, volcanes y una atmósfera tan densa como la nuestra, rica en dióxido de carbono, pero eso no hubiera sido un impedimento para la vida microbiana. **Lo único que le faltaba al planeta rojo, y provocó que terminase de una manera tan diferente a nuestro planeta, fue un campo magnético** que pudiese retener su atmósfera. Además, Marte es un planeta que recibe en su superficie radiación ultravioleta (UV) solar con una fuerte componente biológicamente muy perjudicial (UV-C y UV-B), lo que influye notoriamente en el deterioro de la superficie en vistas de poder encontrar algún signo de vida.

**NEPTUNO.** La estructura interna de Neptuno se parece a la de Urano: un núcleo rocoso cubierto por una costra helada, oculto bajo una atmósfera gruesa y espesa. Los dos tercios interiores de Neptuno se componen de una mezcla de roca fundida, agua, amoníaco líquido y metano. El tercio exterior es una mezcla de gas caliente compuesto de hidrógeno, helio, agua y metano. Su atmósfera comprende aproximadamente 7% de su masa. A grandes profundidades, la atmósfera alcanza presiones de aproximadamente 100 000 veces mayor que la de la atmósfera de la Tierra. **Las concentraciones de metano, amoníaco y agua son crecientes desde las regiones exteriores hacia las regiones inferiores de la atmósfera.**

**Ganimedes** satélite de Júpiter, está compuesto de silicatos y hielo, con una corteza de hielo que flota encima de un fangoso manto que puede contener **una capa de agua líquida con una alta concentración de sal**. Los primeros sobrevuelos de Ganimedes de la nave *Galileo* descubrieron que el satélite tiene su propia magnetosfera. Probablemente se genera de un modo similar a la magnetosfera de la Tierra: es decir, resulta del movimiento de material conductivo en su interior.

**Titán** satélite de Saturno. **Se cree que existe también un océano subterráneo de agua y amoníaco disuelto** en él a una profundidad de 100 kilómetros bajo la superficie, y tal vez otro de hidrocarburos. La atmósfera está compuesta en un 94 % de nitrógeno y es la única

atmósfera rica en nitrógeno en el Sistema Solar aparte de nuestro propio planeta, con rastros significativos de varios hidrocarburos que constituyen el resto.

**Europa** satélite de Júpiter tiene una **superficie helada un océano subsuperficial de agua líquida**. La atmósfera que tiene es muy ligera y compuesta de oxígeno. El hielo se parece mucho al que existe en los polos de la Tierra, hielo a la deriva. Europa tiene un núcleo de metal y piedra rodeado de un manto rocoso caliente, sobre este un océano profundo de agua líquida con una profundidad en discusión para los geólogos de en torno a 100 km y con una superficie helada de 10 km.

## Actividad 10: Buscando una segunda Tierra

La Tierra es el único planeta conocido que contiene vida. Entonces, si estamos buscando un planeta con vida extraterrestre, es una buena opción buscar planetas que ofrezcan condiciones similares. ¿Pero qué parámetros son importantes?

La siguiente tabla enumera algunos exoplanetas con propiedades. Descartad los exoplanetas que no son adecuados para la vida y tal vez encuentreis una segunda tierra. Hay algunos criterios a considerar después de la tabla.

Nombre del exoplaneta	Masa del exoplaneta en masas terrestres	Radio del exoplaneta en radios terrestres	Distancia a la estrella UA	Masa de la estrella en masas solares	Tipo espectral de la estrellas / temp superficial
Beta Pic b	<del>4100</del>	<del>18,5</del>	<del>11,8</del>	<del>1,73</del>	A6V
HD 209458 b	<del>219,00</del>	<del>15,10</del>	<del>0,05</del>	1,10	G0V
HR8799 b	<del>2226</del>	<del>14,20</del>	<del>68,0</del>	1,56	A5V
<b>Kepler-452 b</b>	<b>unknown</b>	<b>1,59</b>	<b>1,05</b>	<b>1,04</b>	<b>G2V</b>
Kepler-78 b	1,69	1,20	<del>0,01</del>	0,81	G
<b>Luyten b</b>	<b>2,19</b>	<b>unknown</b>	<b>0,09</b>	<b>0,29</b>	<b>M3.5V</b>
Tau Cet c	3,11	unknown	<del>0,20</del>	0,78	G8.5V
TOI 163 b	<del>387</del>	<del>16,34</del>	<del>0,06</del>	1,43	F
Trappist-1 b	0,86	1,09	<del>0,01</del>	0,08	M8
TW Hya d (yet unconfirmed)	4	unknown	<del>24</del>	0,7	K8V
HD 10613 b	<del>12,60</del>	<del>2,39</del>	<del>0,09</del>	1,07	F5V
<b>Kepler-138c</b>	<b>1,97</b>	<b>1,20</b>	<b>0,09</b>	<b>0,57</b>	<b>M1V</b>
Kepler-62f	2,80	1,41	<del>0,72</del>	0,69	K2V
Proxima Centauri b	1,30	1,10	<del>0,05</del>	0,12	M5V
HD 10613 b	<del>12,60</del>	<del>2,39</del>	<del>0,09</del>	1,07	F5V

Tabla 4: Candidatas a segunda Tierra

## Radio y masa

En nuestro Sistema Solar hay planetas terrestres (Mercurio, Venus, Tierra, Marte) y planetas gigantes (Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno). Los planetas terrestres similares a la Tierra están compuestos de rocas de silicato y metales y tienen una densidad más alta que los planetas gigantes. Los buenos indicadores para una densidad adecuada son el radio y la masa del planeta.

Utilizando la definición del equipo de la Misión Kepler: los planetas del tamaño de la Tierra y del tamaño de la Tierra tienen un radio inferior a 2 radios terrestres y 10 masas de Tierra se consideran un límite superior para planetas de tamaño súper terrestre.

## Zona de Habitabilidad

La zona habitable es el rango de órbitas alrededor de una estrella dentro de la cual una superficie planetaria puede soportar agua líquida.

Las estrellas de secuencia principal en las que nos estamos centrando tienen una correlación directa entre el brillo y la temperatura de la superficie de la estrella. Cuanto más caliente es la temperatura de la superficie, más brillante es la estrella y más lejos está la zona habitable. Los tipos espectrales indican la temperatura de la superficie (ver tabla a continuación).

Tipo espectral	Temperatura K	Zona Habitable AU
O6V	41 000	450-900
B5V	15 400	20-40
A5V	8 200	2,6-5,2
F5V	6 400	1,3-2,5
G5V	5 800	0,7-1,4
K5V	4 400	0,3-0,5
M5V	3 200	0,07-0,15

Tabla 5: Zona habitable dependiendo del tipo espectral

Los tipos espectrales se clasifican con una letra (O, B, A, F, G, K, M) y se subdividen en un número del 0 al 9 (0 es el más caliente en un tipo espectral dado). La V indica una secuencia principal estrella.

Sugerencia: usad los valores dados para la zona habitable como aproximación, si el tipo espectral de una estrella es ligeramente diferente o se desconoce el subtipo.

## Masa de la Estrella anfitriona

Para estudiar la habitabilidad en un sistema planetario alrededor de estrellas de secuencia principal, debemos tener en cuenta la evolución de la estrella anfitriona.

Aproximadamente mil millones de años después de la formación de la Tierra, ocurrieron las primeras formas de vida. Tal vez hubo vida incluso antes, pero esto es incierto. Por lo tanto, la

estrella anfitriona debe ser estable durante al menos más de  $10^9$  años para que la vida evolucione.

La evolución y vida útil de una estrella depende principalmente de su masa. La energía que una estrella puede obtener de la fusión de hidrógeno es proporcional a su masa. Y se obtiene el tiempo de secuencia principal dividiendo esta energía por la luminosidad de la estrella. Usando estas proporcionalidades y usando el sol como referencia, a partir de estas consideraciones se estima la vida de una estrella en la secuencia principal como

$$t^*/t_s = (M^*/M_s)/(L^*/L_s)$$

Para estrellas normales enanas o de la secuencia principal del diagrama H-R, la luminosidad es proporcional a la masa elevada a la potencia de aproximadamente 3.5.

$$t^*/t_s = (M^*/M_s)/(M^{3.5}/M_s^{3.5}) = (M^*/M_s)^{-2.5}$$

$$t^*/t_s = (M_s/M^*)^{2.5}$$

lo que da la vida útil de una estrella como una fracción de la vida útil esperada del Sol ( $10^{10}$  años). Una versión simplificada de esta fórmula es:

$$t^* \sim 10^{10} \cdot (M_s/M^*)^{2.5} \quad \text{años}$$

Calculemos un límite superior para la masa de la estrella si el intervalo de tiempo de la secuencia principal debe ser de al menos 3 mil millones de años.

$$M^* = (10^{-10} \cdot t)^{-0.4} M_s$$

$$M^* = (10^{-10} \cdot 3\,000\,000\,000)^{-0.4} M_s$$

$$M^* = 1,6 M_s$$

Para estrellas con masas  $>2M$  la vida útil de la secuencia principal cae por debajo de 1 año galáctico (tiempo en dar una vuelta al centro galáctico 250 millones de años) por lo tanto, incluso si existen planetas habitables a su alrededor, la vida probablemente no tendría tiempo suficiente para evolucionar.

## Bibliografía

- Anderson, M. (2018) *Habitable Exoplanets: Red Dwarf Systems Like TRAPPIST-1*, ISBN 1980845026
- García Vescovi, E., Alvarez, C., Bercovich, B., Burdisso, P., Crotta Asis, A., Echarren, L., Espinoza Cara, A., Galles, C., Garavaglia, B., Lavatelli, A., Lazzaro, M., Lisa, N., Tomatis, P., Vitor Horen, L. (2018), *Libreciencias Taller Experimental para Docentes de Establecimientos Escolares de Nivel Secundario*, <http://librecienciaibr.blogspot.com.ar/>

- Goldsmith, D. (2018) *Exoplanets: Hidden Worlds and the Quest for Extraterrestrial Life*, Harvard University Press, ISBN 0674976908
- Haswell, C.A. (2010). *Transiting Exoplanets*. Cambridge Univ. Press. ISBN: 9780521139380.
- Prieto, J., Orozco, P., *Estudios de Astrobiología*, Actas Ciencia en Acción , Viladecans, 2018
- Perryman, M., (2018) *The Exoplanet Handbook*, 2nd edition, Cambridge Univ. Press. ISBN: 9781108419772
- Seager, S. (2011) *Exoplanets*, University of Arizona Press; ISBN 9780816529452
- Summers M, Trefil, J. (2018) *Exoplanets: Diamond Worlds, Super Earths, Pulsar Planets, and the New Search for Life beyond Our Solar System* , Smithsonian Books; ISBN 1588346250
- Tasker, E. (2017) *The Planet Factory: Exoplanets and the Search for a Second Earth*, Bloomsbury Sigma, ISBN: 1472917723