

Zona Habitable

En astrofísica la zona de habitabilidad estelar es una estrecha región circunestelar en donde, de encontrarse ubicado un planeta (o luna) rocoso con una masa comprendida entre 0,6 y 10 masas terrestres y una presión atmosférica superior a los 6,1 mb correspondiente al punto triple del agua, la luminosidad y el flujo de radiación incidente permitiría la presencia de agua en estado líquido sobre su superficie. Definida por primera vez en 1959 por S. Huang, la zona de habitabilidad estelar (ZH) se encuentra delimitada por dos radios: uno interno ó ZHri y otro externo ó ZHro. Mientras el radio interno establece la distancia mínima capaz de salvaguardar el entorno planetario de un efecto invernadero desbocado, el externo, por el contrario, muestra la distancia máxima en la que este mismo fenómeno es capaz de impedir que las bajas temperaturas aboquen al planeta a una glaciación perpetua.

Junto a la zona de habitabilidad estelar, recientemente los astrónomos norteamericanos Gonzalez, Ward y Brownlee han definido la denominada zona de habitabilidad galáctica. Alejada de las fuentes intensas de radiación, sobre todo del violento centro galáctico y de las regiones activas de formación estelar, la conjunción de estas dos zonas, ZH y ZHG, presentan las condiciones más favorables para la aparición y posterior desarrollo de la vida en un entorno planetario adecuado.

Relegada inicialmente al marco de la mera especulación, no es hasta fechas recientes cuando el descubrimiento de un número cada vez mayor de planetas extrasolares ha hecho retomar con inusitado interés, sobre todo para la astrobiología, el estudio de la ZH. Prueba de ello lo constituye el desarrollo de diversas expresiones matemáticas, como las propuestas por Kasting, Whitmire & Reynolds (1993) o Whitmire & Reynolds (1996), destinadas al cálculo aproximado de los radios interno y externo expresados en unidades astronómicas: Ver Icarus-93.pdf

La distancia a una estrella dónde esto se puede dar, se postula centrada en 1 UA para una estrella con luminosidad igual a la del Sol. Se puede calcular conociendo el tamaño y luminosidad de la estrella. La Zona Habitable Continua(ZHC) de una estrella dada está “centrada” en una distancia dada por:

$$d_{AU} = \sqrt{L_{es}/L_{sol}}$$

dónde d_{AU} es el radio medio de la ZH en unidades astronómicas, L_{es} es la luminosidad de la estrella, y L_{sol} es la luminosidad del Sol.

El radio interno (ZHri) y el radio externo(ZHro) de la ZHC se sitúan en 95% y 137% de d_{AU} respectivamente.

Recordemos que la ZHC corresponde a la distancia a la estrella, dónde el agua líquida puede subsistir en la superficie de un planeta, *durante un período de al menos 4000 millones de años.*

Como puede apreciarse a partir del último conjunto de expresiones matemáticas, la zona de habitabilidad evoluciona con el tiempo migrando hacia el exterior a medida que la estrella recorre la secuencia principal.

Deducidas a partir de propiedades físicas como la masa, temperatura efectiva y flujo estelar, las características y evolución de la ZH se encontrarán estrechamente ligadas a la vida de las estrellas.

De esta forma con una temperatura efectiva inferior a los 3000 K y una luminosidad miles de veces inferior a la del Sol, las enanas rojas de clase espectral M presentarán una ZH muy estrecha y próxima a la estrella, quedando bloqueada la rotación planetaria a partir de 0,6-0,4 masas solares. A esta distancia tienden a ajustarse gravitacionalmente con la estrella y quedan en una posición similar a la de nuestra Luna, la cual rota sobre sí misma en el mismo tiempo en que lo hace alrededor del Sol, por lo cual siempre le muestra la misma cara. El problema con esto es que, dada la corta distancia entre el planeta y la estrella, el hemisferio que enfrenta a la

estrella debe alcanzar temperaturas altísimas, incompatibles con la vida; mientras que el hemisferio opuesto, que nunca recibe luz de la estrella, debe permanecer congelado permanentemente. Esto hace muy improbable que la vida pueda surgir y prosperar en dichos planetas. A pesar de este grave inconveniente y de la emisión de la mayor parte de la energía liberada en forma de radiación infrarroja, el abundante número de enanas rojas (70-90% del total de la Vía Láctea) y su extrema longevidad hace que presenten en conjunto el área de habitabilidad estelar más extenso de la galaxia.

A pesar de no mostrar restricción temporal alguna, una masa estelar inferior a 0,08 masas solares implica unas condiciones de presión y temperatura en su núcleo insuficientes para mantener activo el "fuego" nuclear. Consideradas objetos de transición entre estrellas y planetas, las enanas marrones muestran unas características físicas que imposibilitan la existencia a su alrededor de una zona de habitabilidad propiamente dicha.

En el extremo opuesto, con una temperatura efectiva de 50000 K y una luminosidad millones de veces superior a la solar, las grandes estrellas azuladas y blanco-azuladas de clase espectral O y B presentan una ZH amplia y muy alejada de la estrella, por lo que queda asegurada la libre rotación planetaria. Su reducido número, la emisión de la mayor parte de la energía liberada en forma de radiación ultravioleta, efímera vida y el intenso viento estelar que caracteriza estas grandes estrellas no solo imposibilita la consolidación a su alrededor de cuerpos planetarios, sino que incluso en casos extremos pueden llegar a disipar los discos protoplanetarios presentes en estrellas vecinas.

Estimado para el desarrollo de la vida en un planeta como la Tierra un lapso de tiempo no inferior a 4000 millones de años, las estrellas más aptas serían aquellas que presentasen una masa inferior a 1,20 masas solares y superior a 0,6 masas solares, o lo que es lo mismo estrellas de clase espectral F, G y K.

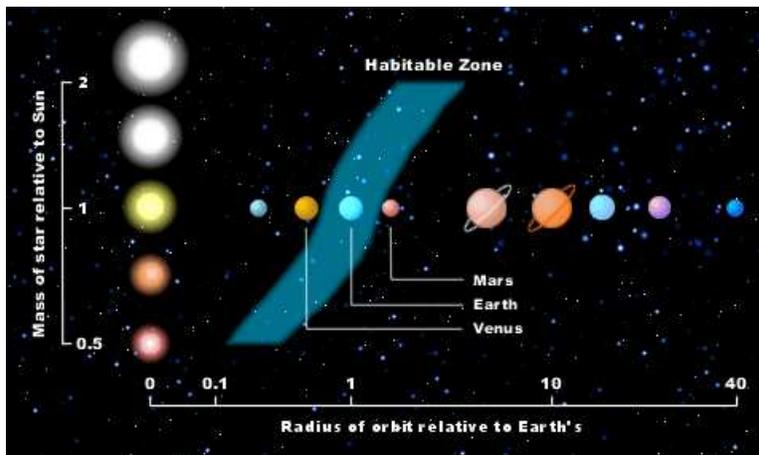


Diagrama de la zona de habitabilidad circumestelar para diferentes estrellas y tomando como ejemplo nuestro Sistema Solar.

La ZH del Sistema Solar está ubicada entre las órbitas de Venus y Marte, entre 0.95 UA y 1.37 UA (entre 5% más adentro y 37% más afuera de nuestra órbita actual). Dada la evolución que ha sufrido nuestro Sol (el cual tiende a volverse más grande y más brillante con el tiempo), esta zona se ha ido desplazando desde adentro hacia afuera. Por esta razón, sólo la Tierra podría tener las condiciones correctas para soportar la vida (aunque no se descarta que pudieran quedar nichos donde la vida aún pudiera abrirse camino en Venus y Marte). Sin embargo, dado que el Sol se volverá más grande y más brillante (y por lo tanto más cálido), la ZH se desplazará alejándose del Sol, hasta quedar por fuera de nuestra órbita actual, en unos 500 a 900 millones de años (y eso sin tener en cuenta el calentamiento por efecto invernadero que ya estamos provocando).

Mundos habitables:Detalle

El criterio básico para determinar si un mundo es habitable es la posible existencia de agua líquida. Dado que la temperatura del agua líquida satisface $0C \leq T \leq 100C$ ($273K \leq T \leq 373K$) a la presión de una atmósfera, se busca una zona en el entorno de una estrella donde la temperatura en la superficie esté en este rango.

La temperatura de un cuerpo T está determinada por el equilibrio entre la energía que absorbe y la energía que emite. Una aproximación razonable para encontrar T es suponer que el cuerpo se comporta como un cuerpo negro.

La energía emitida por unidad de área, por unidad de tiempo, por un cuerpo negro radiando a temperatura T está dada por la ley de Stefan-Boltzmann:

$$P = \sigma T^4, \quad \text{con} \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4} \quad (1)$$

La energía recibida por un planeta por unidad de área por unidad de tiempo es:

$$P = \frac{L_0}{4\pi R^2} \quad (2)$$

Donde L_0 es la luminosidad del Sol, y R es la distancia del planeta al Sol.

Un planeta de radio R_p , situado a una distancia R , recibe del Sol, por segundo, una energía igual a:

$$E_a = \pi R_p^2 P \quad (3)$$

y emite, de acuerdo a la ecuación (1),

$$E_e = 4\pi R_p^2 \sigma T^4 \quad (4)$$

Igualando (3) y (4), obtenemos:

$$T = \frac{\left(\frac{L_0}{\pi\sigma}\right)^{\frac{1}{4}}}{2\sqrt{R}} \quad (5)$$

Para el Sol se tiene

$$L_0 = 3.8 \times 10^{26} \text{ W}$$

La distancia de la Tierra al Sol es

$$R = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$$

Luego $T = 277K$.

Un análisis más preciso toma en cuenta que la Tierra absorbe una fracción de la luz solar y refleja el resto. Esto es P debe ser reemplazado por:

$$P' = (1 - a)P \quad (6)$$

a mide la fracción de energía reflejada por el planeta. Se llama **albedo**.

Con lo que se estima $T' = 255K$

Luminosidad de una estrella

L_0 se puede estimar utilizando (1):

$$L_0 = 4\pi R_e^2 \sigma T_0^4 \quad (7)$$

con T_0 la temperatura en la superficie de la estrella y R_e es su radio. Veremos más abajo, que es posible determinar T_0 a partir del color de la estrella.

Combinando (5,7), obtenemos:

$$T = T_0 \sqrt{\frac{R_e}{2R}} \quad (8)$$

o

$$R = \frac{T_0^2 R_e}{2T^2} \quad (9)$$

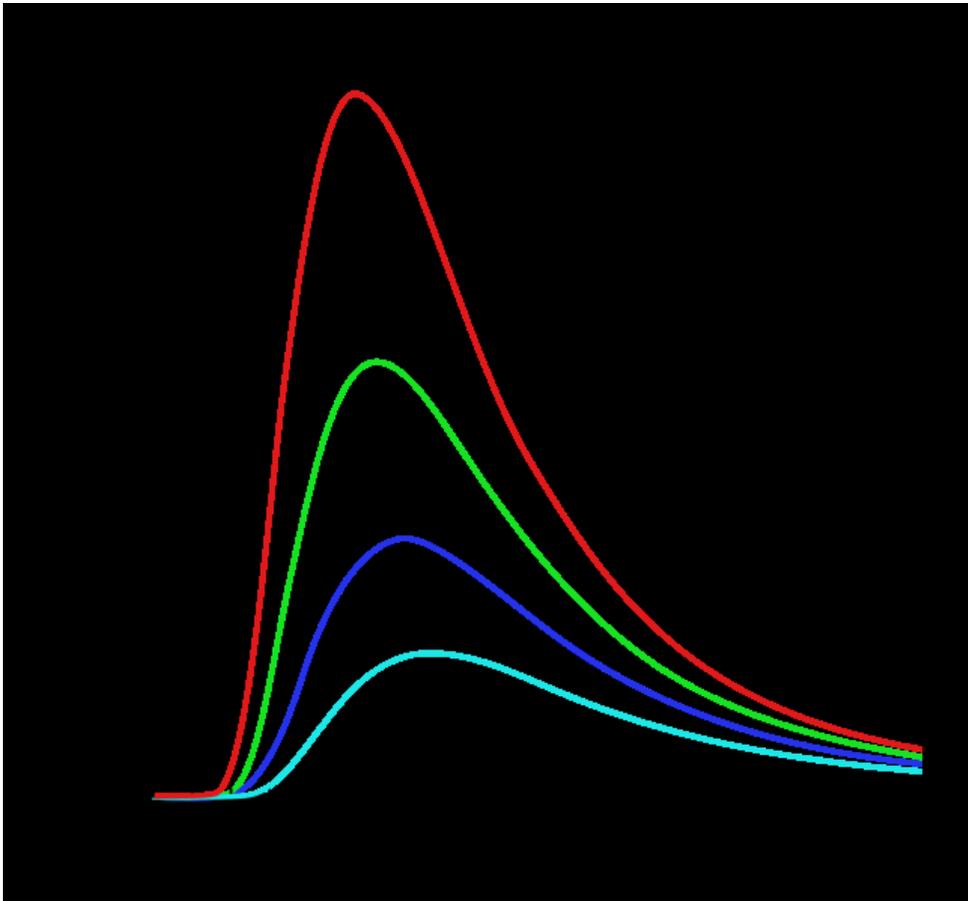
De esta manera obtenemos una primera aproximación a la distancia R entre planeta y estrella para tener un planeta habitable:

$$3.6 \times 10^{-6} T_0^2 R_e \leq R \leq 6.7 \times 10^{-6} T_0^2 R_e \quad (10)$$

Color y temperatura superficial de un cuerpo

Un cuerpo negro emite luz en todo el espectro de frecuencias. Sin embargo, su color está determinado por la frecuencia máxima en que emite. Se encuentra (Ley de Wien):

$$\lambda_{\max} = \frac{0.0028976}{T} m \quad (11)$$



Radiación del Cuerpo Negro para distintas temperaturas

En el caso del Sol, $\lambda_{\max} = 4750 \text{ \AA}$, con lo cual $T_0 = 5780 \text{ K}$. ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$.)

El radio del Sol es: $R_s = 695000 \text{ km}$.

$$8.4 \times 10^7 \text{ km} \leq R \leq 1.6 \times 10^8 \text{ km} \quad (12)$$

Esta zona se mueve a través de la historia del sistema solar, debido a la evolución del Sol, cuya luminosidad ha cambiado con el tiempo. Hace 4000 millones de años era 70% la luminosidad actual. Esto lleva a definir **la zona habitable continua** como la zona que es habitable durante toda la historia del sistema solar.

Efecto Invernadero

Sin embargo, la Tierra absorbe en el ultravioleta, donde la atmósfera es transparente, pero emite mayormente en el infrarrojo, al cual el CO_2 de la atmósfera es opaco. Para lograr el equilibrio térmico en estas condiciones, el planeta aumenta su temperatura. Esto cambia las zonas habitables.

Como detectar vida en planetas extrasolares

El único método disponible es la radiación proveniente de fuentes lejanas. Pero Qué aspectos de esta radiación podrían señalar la presencia de vida?

Para responder a esta pregunta, la nave Galileo, lanzada al espacio por la NASA en 1989, dirigió sus detectores de radiación infrarroja hacia la Tierra y luego hacia la Luna. Lo que vió se resume en el espectro infrarrojo de la Tierra, detectado por el satélite Nimbus-4.

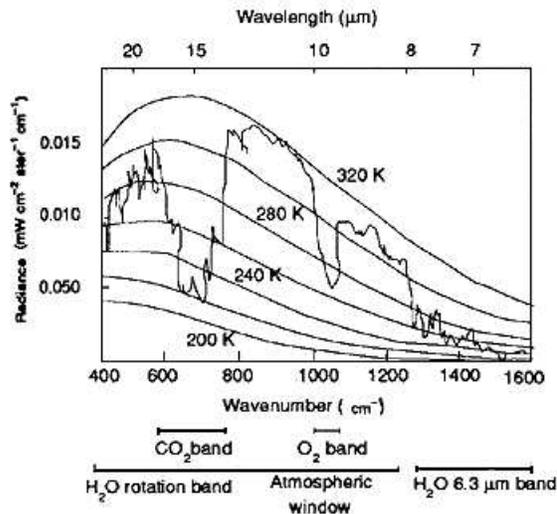


Fig. 1 Espectro infrarrojo de la Tierra tomado por Nimbus-4

Aquí destacan:

El Ozono, O_3 y el Metano CH_4 .

Uno de los mayores efectos de la biósfera terrestre es la sostenida presencia de Oxígeno molecular (O_2) en la atmósfera. O_2 aparece débilmente en el espectro infrarrojo, pero a través de la radiación UV da lugar a una apreciable cantidad de O_3 y éste tiene una presencia fuerte en el infrarrojo y puede ser detectado fácilmente.

El Oxígeno es muy probablemente producido por fotosíntesis, pero para estar seguros de la presencia de vida un elemento crucial que se agrega es el metano.

El metano también es generado por organismos multicelulares y por algunas bacterias. Se oxida fácilmente por el O_2 para producir H_2O y CO_2 y como resultado hay una molécula de metano en cada 600000 moléculas de la tropósfera. Esto pudo ser detectado por Galileo en el espectro infrarrojo. El punto crucial es que sin una inyección permanente y enorme de metano en la atmósfera cargada de Oxígeno de la Tierra, habría mucho menos metano en la atmósfera y Galileo no lo habría detectado.

Un planeta cálido como la Tierra no tiene receptáculos de metano en forma de hielo para aportar el CH_4 y las emisiones volcánicas de metano son insuficientes.

Sin un ritmo de producción prodigiosa de metano por la biósfera la cantidad de CH_4 en la atmósfera sería muchos órdenes de magnitud menor. Es decir, la presencia de O_2 y CH_4 juntos, lejos del equilibrio químico, pone a la presencia de vida en la Tierra más allá de cualquier duda razonable.

En Diciembre de 1992, los instrumentos de Galileo se enfocaron en la Luna, con resultados negativos. No se encontraron pares de gases atmosféricos lejos del equilibrio químico. En verdad, prácticamente no aparecieron gases. Si hay vida en la Luna, debe estar escondida a grandes distancias de la superficie lunar y esto es altamente improbable, debido a la ausencia de grandes cantidades de agua.

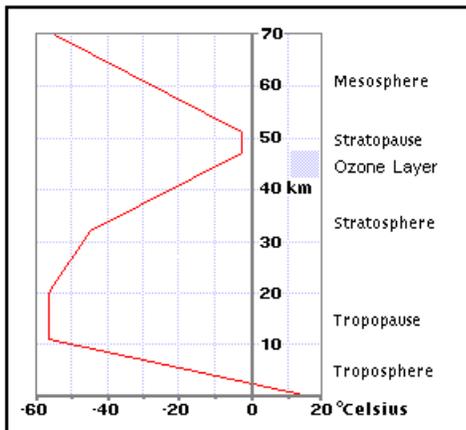


Fig.2 Cambio de la temperatura con la altura sobre el nivel del mar

Combinando la Fig. 1 con la Fig. 2 se puede encontrar la zona desde donde emiten los distintos gases en el infrarrojo.

-Entre $12\mu m$ y $8\mu m$, excepto por el valle en $9.6\mu m$, la curva suave correspondiente a un cuerpo negro a temperatura de 300K, aproxima muy bien el espectro. La ausencia de líneas espectrales nítidas, como serían generadas por gases, indica que la radiación recibida por Nimbus-4 en el rango $12\mu m$ y $8\mu m$ ha sido emitida por la superficie de la Tierra o por nubes, en lugar de una capa de gas en la atmósfera. Nimbus-4 enfocó sus instrumentos en una zona sin nubes, luego esta parte del espectro fue emitido por la superficie terrestre a una temperatura de algo menos que 300K. Por lo tanto el agua líquida es posible en la superficie.

-Agua. La presencia de agua aparece en la Fig.1 como bandas de absorción. La molécula de agua tiene muchas líneas de absorción angostas en el espectro infrarrojo que dan lugar a las bandas. Son estas bandas que aparecen abundantemente en la Fig. 1. En los bordes del espectro infrarrojo, la absorción debida al vapor de agua es fuerte y la curva con $T=275K$, describe esta parte del espectro fielmente. La Fig. 2 indica que el vapor de agua se encuentra a pocos km. sobre la superficie.

-Dióxido de Carbono(CO_2). Alrededor de $15\mu\text{m}$, el espectro infrarrojo de la Tierra muestra una fuerte absorción debida al CO_2 . La absorción más prominente corresponde a $T=220\text{K}$. Esto ocurre en la tropósfera superior alrededor de 10km . sobre la superficie(Ver Fig. 2). El CO_2 no está concentrado allí, pero esto es lo más profundo que podemos ver en esta longitud de onda.

Sólo de la Fig. 1 se ve que el CO_2 está presente y por lo tanto, el planeta tiene carbón, lo que es esencial para la formación de biomoléculas.. La proporción de CO_2 es 0.035% del número total de moléculas.

-Oxígeno y Metano. El declive del espectro alrededor de $9.6\mu\text{m}$ se debe al ozono(O_3). Este se produce a partir de O_2 debido a la acción de la luz UV. La profundidad del declive debido al O_3 muestra que debe haber una cantidad considerable de O_2 en la atmósfera de la Tierra. O_2 no es detectable directamente en el espectro infrarrojo porque absorbe radiación infrarroja débilmente. La curva que describe la sección central del declive debido al O_3 corresponde a $T=270\text{K}$. Esto corresponde a la baja tropósfera o a la alta estratósfera. Debido a que debe haber abundante radiación UV para producir Ozono, se deduce que el ozono se encuentra en la alta estratósfera, alrededor de 45km . sobre la superficie. El metano aparece débilmente en la zona de $8\mu\text{m}$. A pesar que CH_4 absorbe fuertemente en el infrarrojo, su presencia en la atmósfera es muy pequeña. A pesar de esto sí se puede detectar!.