



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

TIPOS DE ESTRELLAS COMPATIBLES CON LA TEORÍA
DE LA DISIPACIÓN TERMODINÁMICA PARA EL ORIGEN Y
LA EVOLUCIÓN DE LA VIDA.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A:

ANDRÉS LEDESMA RAMÍREZ

TUTOR:

DR. KARO MICHAELIAN PAUW



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Resumen

Este trabajo parte desde la perspectiva de una de las teorías contemporáneas sobre el origen de la vida. Se sugiere que la vida surgió con la estructuración disipativa de pigmentos UltraVioleta-C (UV-C) para disipar la energía libre del flujo de fotones solares que llegaron a la superficie de la Tierra durante el Arqueano.

Las moléculas fundamentales de la vida, según la “Teoría de la Disipación Termodinámica para el origen de la vida” (TDT), se originaron como estructuras disipativas microscópicas auto-organizadas. Proliferaron sobre la superficie del océano para absorber la luz UV-C “suave” (205-285 nm) del Sol durante el Arqueano y disiparla como calor que se acopla a más procesos disipativos abióticos, como el ciclo del agua, para disiparla aún más hacia el infrarrojo. Por otro lado, la luz UV-C “dura” de longitud de onda más corta (<205 nm) que podría haber llegado a la superficie, por las condiciones atmosféricas, pueden ionizar, y disociar así las moléculas de estos pigmentos a base de carbono.

En este trabajo se estudió la TDT y se analizaron los espectros de emisión de diferentes tipos de estrellas (diferentes temperaturas superficiales), para determinar la energía integrada sobre las longitudes de onda en las regiones UV-C “dura” y “suave”. Igualmente se catalogaron las energías de ionización de las moléculas fundamentales de la vida (ácidos nucleicos, aminoácidos, proteínas, entre otras). Estos datos permitieron determinar que los tipos de estrellas, con las condiciones espectrales favorables para permitir la estructuración disipativa de las primeras moléculas de la vida (los pigmentos orgánicos a base de carbono), son de tipo F, G o K.

Abstract

This work starts from the perspective of a contemporary theory on the origin of life which suggests that life arose with the dissipative structuring of UltraViolet-C (UV-C) pigments to dissipate the free energy of the flow of solar photons that reached the Earth's surface during the Archean.

The “Thermodynamic Dissipation Theory for the Origin of Life” (TDT) proposes that the fundamental molecules of life originated as self-organized microscopic dissipative structures, which proliferated on the ocean surface to absorb “soft” UV-C light (205-285nm) from the sun during the Archean and dissipate it into heat that couples with abiotic dissipative processes, such as the water cycle, to dissipate the photon energy further into infrared light. However, the “hard” UV-C light of short wavelength (<205nm) that could have reached the surface, due to atmospheric conditions, can ionize, and thereby dissociate the molecules of these carbon-based pigments.

In this work, the emission spectra of different types of stars with different surface temperatures were analyzed to determine the integrated energy over the wavelengths in the UV-C hard and soft regions. Likewise, the ionization energies of the fundamental molecules of life (nucleic acids, amino acids, proteins, etc.) were catalogued. These data allow determining the most probable types of stars which have the favorable spectral conditions for the dissipative structuring of the first molecules of life (the organic carbon-based pigments) are type F, G and K.

Dedicatorias

A mis padres, por ser mi inspiración y ejemplo más grande, por su amor infinito y enseñarme que con esfuerzo y dedicación todo es posible. Este trabajo es para ustedes, con todo mi cariño y gratitud.



Con mi papá, Ismael Ledesma Mateos.



Con mi mamá, Rosaura Ramírez Sevilla.

Agradecimientos

Acepto que el origen de esta tesis proviene del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) y, por lo tanto, agradezco al proyecto financiado, bajo el cual recibí la beca de conclusión de estudios.

Clave del proyecto: IN104920

Título del proyecto: Fotofísica y fotoquímica de estructuración, proliferación, y selección disipativa de moléculas en el origen de la vida.

Responsable: KARO MICHAELIAN

Entidad académica con los recursos del proyecto: IF-UNAM

Acepto también que la tesis se incluya en el acervo electrónico del PAPIIT para efectos de difusión académica.

This research has made use of the NASA Exoplanet Archive, which is operated by the California Institute of Technology, under contract with the National Aeronautics and Space Administration under the Exoplanet Exploration Program.

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo incondicional de las personas que me han acompañado a lo largo de este camino. En primer lugar, quiero agradecer profundamente a mi familia por estar a mi lado en cada momento difícil, por creer en mí cuando yo mismo dudaba, y por recordarme siempre la importancia de la constancia y el esfuerzo. A mis amigos, por su compañía, sus palabras de aliento, y por recordarme que también hay tiempo para descansar y reír.

Agradezco también a todos los profesores y colegas que, de una u otra forma, contribuyeron con su conocimiento, paciencia y consejos valiosos para que este proyecto llegara a buen puerto. Sus enseñanzas han sido fundamentales para mi crecimiento profesional y personal.

Finalmente, a todas las personas que, de manera directa o indirecta, me impulsaron a seguir adelante, gracias por su apoyo y comprensión durante esta etapa. Este logro es también de ustedes.

Índice general

1. Introducción	1
2. Metodología	5
3. Marco Teórico	8
3.1. Clasificación de Estrellas	8
3.1.1. Estrellas y su clasificación espectral	8
3.1.2. Ecuación de Planck: Radiación de Cuerpo Negro	9
3.1.3. Ley de Wien	9
3.2. Termodinámica	10
3.2.1. 1ª y 2ª Ley de la Termodinámica	11
3.2.2. Entropía	12
3.2.3. Procesos Irreversibles, Estados Estacionarios y Estructuras Disipativas	13
3.3. Selección Termodinámica Natural	15
3.4. Fundamentos de la Teoría de la Disipación Termodinámica (TDT)	19
3.5. Biología, Química y Astro-biología	20
3.5.1. Moléculas Fundamentales de la Vida	22
4. Resultados	24
4.1. Introducción	24
4.2. Energías de Ionización de Moléculas Fundamentales	24
4.3. Tipos de Estrella	25
4.3.1. Emisión de Estrellas en UV-C	28
4.3.2. Gráficas de Espectros Estelares en la Superficie de un Planeta Similar a la Tierra	32
4.4. Discusión de los resultados	34
4.4.1. Estrellas Candidatas Cercanas para albergar planetas con Estructuración Disipativa	34
4.4.2. Estructuración Disipativa de la Vida en Marte	36
5. Discusión y Conclusiones	40
5.1. Implicaciones de los Tipos de Estrellas en la Búsqueda de Vida en Exoplanetas	40
5.2. Conclusiones	42
Referencias	43
Programa Fortran	47

ÍNDICE GENERAL

VII

Constantes Universales

50

Unidades

51

Índice de figuras

3.1. Absorción de las moléculas fundamentales y ventana atmosférica en el UV-C.	16
4.1. Espectros de estrellas de tipo O entre 10 nm - 285 nm.	28
4.2. Espectros de estrellas de tipo B entre 10 nm - 285 nm.	29
4.3. Espectros de estrellas de tipo A entre 10 nm - 285 nm.	29
4.4. Espectros de estrellas de tipo F entre 10 nm - 285 nm.	30
4.5. Espectros de estrellas de tipo G entre 10 nm - 285 nm.	30
4.6. Espectros de estrellas de tipo K entre 10 nm - 285 nm.	31
4.7. Espectros de estrellas de tipo M entre 10 nm - 285 nm.	31
4.8. Espectros estelares en la atmósfera superior de un planeta.	33
4.9. Espectros en la superficie de planeta con atmósfera similar a la de la Tierra.	33
4.10. Fórmula esquelética de la molécula de tiofeno, un heterociclo aromático de cinco miembros con cuatro carbonos y un azufre. Se muestra la convención de numeración para los derivados (por ejemplo, ácido 3-tiofeno acético). Esta molécula absorbe en el UV-C “suave” (Ver Fig.4.11)	38
4.11. Espectros UV del tiofeno en fase gaseosa (línea de puntos) y en solución de ciclohexano (línea sólida). Se muestran las longitudes de onda de excitación empleadas para los experimentos de resonancia de Raman por encima de los espectros.	39

Índice de tablas

4.1. Energía de ionización de moléculas fundamentales.	25
4.2. Emisión de cada tipo de estrella	26
4.3. Emisión estelar en la banda 10 nm-205 nm, (UV-C “duro”) de ionización.	27
4.4. Emisión en la banda 205 nm-285 nm, (UV-C “suave”) para la estructuración disipativa.	27
4.5. Estrellas similares cercanas con planetas detectados	35

Capítulo 1

Introducción

Todas las culturas han desarrollado teorías sobre el origen de la vida, que han prevalecido en forma de mitología. La primera evidencia escrita que se tiene de una propuesta materialista es la del origen a partir de los cuatro elementos (agua, tierra, fuego y aire) de los antiguos griegos. A pesar de esto, la concepción judeocristiana e islámica ha dominado durante los últimos 2000 años destacando el misticismo que ha impactado y prevalecido en la cultura y la sociedad, por encima del materialismo.

En el renacimiento, a principios del siglo XV, los europeos retomaron las ideas materialistas de los griegos, pero la antigua idea de “generación espontánea”; acerca de que algo tan complejo como un gusano, una mosca, o una rana puede aparecer súbitamente del barro, o de un charco de agua sucia; prevaleció hasta el siglo XVIII, cuando se puso en entredicho con los experimentos de Spallanzani. En el siglo XX hubo más intentos científicos para explicar el origen de la vida con nuevas teorías materialistas basadas en un mayor entendimiento de la física y la química (Miller, 1953; Miller y Urey, 1959; Kauffman, 1971).

Todas dependen de la cuestionable premisa de que naturalmente se produjo, hace 3.9 millones de años, una maravillosa reacción química que brindó a las moléculas de características darwinianas de reproducción, con variación y selección, basadas en la estabilidad molecular o en la eficacia del uso de las moléculas precursoras, sin que tal conjunto milagroso de reacciones químicas haya sido descubierto (Gilbert, 1986; Michaelian, 2011). Incluso carecen de bases axiomáticas basadas en leyes físicas, sólo describen la síntesis química de moléculas fundamentales lo más eficientemente posible.

El trabajo de Ilya Prigogine y su mentor Lars Onsager mostró que bajo una fuerza general impuesta (un gradiente de temperatura, un potencial químico o un flujo de fotones, entre otros) la materia de un sistema se puede “autoorganizar” en estructuras disipativas “diseñadas” naturalmente para aumentar la disipación de la fuerza general impuesta, como resultado del imperativo termodinámico de la disipación que se deriva de la formulación local de la segunda ley de la termodinámica (Onsager y Machlup, 1953; Prigogine, 1967).

Tras el trabajo de Prigogine sobre estructuras disipativas, es posible profundizar en una teoría exhaustiva para el origen de la vida, basada en principios físicos establecidos. Los detalles específicos sobre cómo la estructuración disipativa de la vida surgió forman una teoría sólida. Estos fueron revelados recientemente en la Teoría de la Disipación Termodinámica del Origen y Evolución de la

Vida, basada en la disipación de la luz ultravioleta en el rango UV-C y la presencia de compuestos precursores como el cianuro de hidrógeno (HCN), cianógeno ($NCCN$), dióxido de carbono (CO_2), y agua (H_2O) (Michaelian, 2009a, 2011, 2016, 2017, 2021).

La energía total es una cantidad conservada y la energía libre es la que se disipa y está involucrada en la estructuración disipativa para el origen de la vida. En particular, se trata de la energía libre de los fotones solares incidentes en la superficie de la Tierra, y los grados de libertad microscópicos comprendidos en su disipación son de escala molecular, lo que provoca: excitación electrónica, vibración molecular y reconfiguración (nuevos enlaces covalentes entre átomos), produciendo calor (más vibraciones moleculares), lo que eleva la emisión de fotones (con longitud de onda mayor) hacia el infrarrojo. Estos grados de libertad materiales son lugares donde la energía incidente con baja entropía se absorbe, se redistribuye y se vuelve a emitir como radiación con mayor entropía al entorno (Michaelian y Simeonov, 2015).

La estructuración disipativa microscópica que se describe en la TDT es una respuesta termodinámica fuera de equilibrio en la que la autoorganización de la materia ocurre para disipar el potencial impuesto por la luz solar sobre la superficie de la Tierra. Esta teoría ha descrito propiedades fotoquímicas de las moléculas fundamentales exitosamente y arroja luz sobre la complejidad de los procesos que podrían preceder al surgimiento de la vida en la Tierra, y posiblemente en el cosmos (Michaelian, 2021, 2022).

Con la disipación de los fotones UV-C del Sol y la estructuración de las moléculas fundamentales en la era Arqueana (hace 3.950 a 2.500 millones de años), la vida surgió como un proceso fotoquímico autocatalítico. Se produjeron pigmentos, a partir de moléculas precursoras (más simples y comunes) presentes en el agua, los cuales se desarrollaron hasta presentar una complejidad mayor para disipar la energía del amplio espectro solar de manera más eficiente. Hasta el día de hoy, el proceso productor de entropía más importante que ocurre en el planeta es el proceso disipativo en el que parte de la energía del espectro solar es absorbida y convertida en calor, en las moléculas orgánicas de la superficie terrestre (Michaelian, 2017).

Hoy en día existe una extensa variedad de pigmentos de UV cercano y visible para disipar la luz solar en calor y así producir entropía (la razón termodinámica para la vida). Las plantas y las cianobacterias representan casi toda la biomasa en el planeta. Absorben la energía libre (de casi todo el espectro) de la luz solar, la utilizan (sólo el uno por ciento) para la fotosíntesis (reconstruir enlaces covalentes, formar ATP y glucosa a partir de nutrientes) y el resto es simplemente disipada en calor (ruta no fotosintética).

El calor producido en las hojas de las plantas y por las cianobacterias se acopla al ciclo del agua, para incrementar aún más la producción de entropía. Así, la biósfera recorre el espectro de luz incidente y emite luz hacia el infrarrojo. Se puede calcular la entropía de este proceso porque se conoce el espectro incidente de luz solar y el espectro saliente del planeta. Dado el espectro de la luz y los flujos hacia dentro y fuera del sistema, se calcula su entropía usando la ecuación de Planck (Michaelian y Cano Mateo, 2022). Por esto, es posible notar que la producción de entropía (por unidad de área y normalizado con la intensidad de la luz) en la Tierra es dos veces mayor que en Marte o Venus, esta diferencia con estos y los demás planetas del Sistema Solar se debe a los procesos que ocurren en su superficie (la biosfera y la vida). Las moléculas fundamentales de la vida absorben fuertemente luz en el rango UV-C y la disipan en calor, así como lo hacen las plantas actualmente con luz visible.

Entonces, con el marco teórico de la termodinámica fuera de equilibrio aplicado sobre el origen

y evolución de la vida, se considera que desde su inicio la función de la vida es, disipar la energía libre de la luz solar disponible en forma de calor (radiación con menor energía). Al inicio con las moléculas fundamentales que luego proliferaron sobre toda la superficie de la Tierra y con su subsecuente evolución a organismos cada vez más disipativos y complejos hasta la biosfera. Por lo que el origen y la evolución de la vida pueden explicarse en términos físicos y químicos, con la estructuración disipativa, la proliferación disipativa y la selección disipativa como los elementos necesarios y suficientes (Michaelian, 2017; Fang y Wang, 2020).

En paralelo, el firmamento ofrece un espectáculo de innumerables luces titilantes, cada una de estas pertenece a diferentes tipos de estrellas que pueblan la galaxia (Martin, Baross, Kelley, y Russell, 2008). Cada tipo de estrella, con su propia temperatura y composición, emite un espectro de luz característico. Estas estrellas son los actores esenciales en la creación de elementos químicos y condiciones necesarias para la vida.

En el vasto espectro de luz y energía que emiten las estrellas, existe una cantidad crucial a considerar: la longitud de onda. La luz de longitud de onda extremadamente corta puede dar lugar a la fragmentación de moléculas basadas en carbono, mientras que la de longitud de onda extremadamente larga parece no tener efecto significativo sobre ellas. No obstante, en las longitudes de onda intermedias, ocurre algo notable: la estructuración disipativa de moléculas orgánicas en pigmentos UV-C basados en carbono. Este fenómeno es la clave de nuestra investigación mientras exploramos a detalle las propiedades y consecuencias de esta región única del espectro electromagnético (Michaelian y Cano Mateo, 2022).

Bajo este principio y dadas ciertas condiciones en la superficie de planetas similares orbitando estrellas que emiten importantes componentes de UV-C, principalmente entre 205 y 285 nm, el origen de la vida basada en el carbono como la nuestra sería una imposición termodinámica. Si la superficie está protegida por una atmósfera de las longitudes de onda inferiores a 205 nm (que pueden ionizar y destruirlas), en estos planetas debería estar ocurriendo la autoorganización de pigmentos orgánicos. La emisión en la región de UV-C “suave”, junto con la protección de la luz UV-C “dura”, indicarían la existencia de un perfil de concentración de moléculas fundamentales, basadas en carbono funcionando como pigmentos estructurados disipativamente. Las características de estas moléculas dependen de la naturaleza de su entorno físico, la luz UV local, las moléculas precursoras y los disolventes disponibles (Michaelian y Simeonov, 2015).

La Teoría de la Disipación Termodinámica y la clasificación de tipos de estrellas son elementos fundamentales en esta exploración. Su conexión es crucial en la búsqueda de vida fuera del planeta Tierra. Si esta teoría resulta ser correcta, los científicos deberían dirigir su atención hacia los planetas que orbitan alrededor de estos tipos específicos de estrellas. Esto, a su vez, abre nuevas perspectivas para la búsqueda de vida en el Universo, nos sumergimos en la exploración de las interacciones entre la radiación estelar y las moléculas orgánicas y cómo éstas influyen en el desarrollo de condiciones propicias para la vida en otros rincones del cosmos (Simeonov y Michaelian, 2017; Michaelian, 2023).

Esta investigación se adentra en estos principios, explora las propiedades fotoquímicas especiales, la clasificación estelar y la interacción única entre la luz y las moléculas orgánicas en las longitudes de onda UV-C (“suave” y “dura”) del espectro electromagnético. A medida que se avanza en la investigación, se espera arrojar luz sobre la posibilidad de que en algún otro lugar del vasto Universo, los procesos fotoquímicos y la luz de las estrellas hayan allanado el camino para la vida tal como la conocemos.

Para determinar qué tipos de estrellas son más propensas a albergar planetas con pigmentos orgánicos estructurados disipativamente, se analizaron sus espectros, se catalogaron las energías de ionización para las moléculas fundamentales y así se determinaron los tipos de estrellas con espectros favorables. En primer lugar, se realizó una búsqueda exhaustiva de la literatura científica para obtener información relevante acerca de las moléculas fundamentales de la vida y los espectros de diferentes tipos de estrellas. Luego, se analizaron los espectros de emisión de diferentes tipos de estrellas con diferentes temperaturas superficiales, para determinar la energía integrada sobre las longitudes de onda en las regiones UV-C “dura” (10-205 nm) y “suave” (205-285 nm). También, se catalogaron las energías de ionización de las moléculas fundamentales de la vida para determinar las condiciones espectrales óptimas, para la no destrucción de los pigmentos orgánicos a base de carbono y la formación de vida, tal como la conocemos, en algún exoplaneta. Finalmente, se investigó sobre la detección de estos pigmentos y qué implicaciones tendría su presencia en términos de la búsqueda de vida en exoplanetas.

Capítulo 2

Metodología

El problema se inserta en el marco de la Termodinámica Disipativa del Origen y Evolución de la Vida (Michaelian, 2009a, 2011, 2017, 2021). A partir de las condiciones espectrales para la estructuración disipativa de pigmentos orgánicos (moléculas fundamentales de la vida), se busca determinar los tipos de estrella con mayor posibilidad de albergar planetas donde vida similar a la nuestra pudo surgir por estructuración disipativa bajo fotones UV-C.

Para esto, se estudiará la clasificación de tipos de estrellas y la termodinámica fuera de equilibrio, la estructuración, proliferación y selección disipativa. También se utilizarán programas basados en la ecuación de Planck para determinar la energía emitida por cada tipo de estrella, dada su temperatura superficial promedio, en las dos regiones UV-C “duro” y “suave”, y graficar los espectros correspondientes. Igualmente, se buscarán y catalogarán las energías de ionización de las moléculas fundamentales de la vida.

Con toda la información obtenida se identificarán las estrellas compatibles con la estructuración disipativa de moléculas orgánicas a partir de precursores comunes bajo un flujo UV-C. Esta consideración culmina indicando las estrellas más próximas, a menos de 100 años luz (30.66 pc de la Tierra) que deberían ser el blanco de estudio para encontrar biosignaturas de vida similar a la nuestra.

La metodología consiste de los siguientes pasos:

1. Clasificación de estrellas.

Se comienza por clasificar las estrellas según su tipo espectral y temperatura superficial. Las estrellas se clasifican en los tipos: O, B, A, F, G, K y M, de más caliente a más frío.

2. Termodinámica fuera de equilibrio y estructuración, proliferación y selección disipativa de la vida.

Se estudia la termodinámica fuera de equilibrio y la estructuración disipativa de moléculas orgánicas bajo un flujo UV-C. Esto implica comprender cómo la materia puede organizarse y evolucionar bajo la influencia de la radiación UV-C y otros factores ambientales, desde el nivel molecular hasta la biosfera.

3. Energías de ionización de moléculas fundamentales.

Se investigan las energías de ionización de las moléculas fundamentales que son relevantes para

la vida tal como la conocemos. Esto incluiría moléculas como el agua, aminoácidos, bases nitrogenadas, azúcares y ácidos grasos.

Comparamos las energías de ionización de las moléculas fundamentales con la emisión de las estrellas en las dos regiones del UV-C. Se identifican las emisiones de estrellas que contienen las energías de ionización de estas moléculas.

4. Energía emitida en el UV-C.

Se obtiene la energía total emitida en las dos regiones del UV-C, “duro” (10-205 nm) y “suave” (205-285 nm), para cada tipo de estrella. Esta información es nuestro foco de interés, ya que las proporciones de UV-C del espectro determinan la capacidad de un planeta para desarrollar vida por estructuración disipativa.

5. Determinación del espectro de fotones.

Se utilizan programas de radiación de cuerpo negro para determinar el espectro de fotones emitidos por estrellas de diferentes tipos en función de sus temperaturas superficiales promedio. Esto permitirá conocer la cantidad de radiación en diferentes regiones del espectro, incluyendo el UV-C.

6. Selección de estrellas candidatas.

Con base en la comparación anterior, se seleccionan los tipos de estrellas que son las mejores candidatas para la estructuración disipativa de la vida. Estas serían aquellas cuyas emisiones en UV-C “duro” y “suave” se ajusten mejor a las energías de estructuración disipativa y de no-ionización de las moléculas orgánicas. Es decir, las que tienen mayor probabilidad de albergar planetas con condiciones adecuadas para la estructuración disipativa de vida.

Es importante filtrar el tipo de planeta (por su masa) para que sea similar a la Tierra, y si se conoce la distancia a la estrella huésped, definir si se encuentran en su zona habitable.

7. Búsqueda de exoplanetas adecuados.

Utilización de técnicas de detección de exoplanetas, como el método de tránsito o el método de velocidad radial para identificar estrellas que tienen planetas en zonas habitables. La zona habitable es la región alrededor de una estrella donde las condiciones, incluyendo el flujo de luz UV-C y agua líquida, podrían ser adecuadas para la estructuración disipativa de la vida.

Con base en la información recopilada en los pasos anteriores, se buscará entre las estrellas más cercanas, a menos de 30.66 pc (100 años luz), en las que se han detectados exoplanetas y que cumplen con los criterios necesarios para la estructuración disipativa de moléculas orgánicas. Se filtrará el tipo de estrella huésped y el tamaño (masa) del exoplaneta detectado y se descartará cualquiera a más de 100 años luz.

8. Estudio de atmósferas y biosignaturas.

Las biosignaturas son señales que podrían indicar la presencia de vida, como la detección de gases producidos por organismos. A partir de los resultados de estas investigaciones y observaciones, se pueden identificar las estrellas más prometedoras que deberían ser el blanco de futuros estudios en la búsqueda de vida similar a la nuestra en otros sistemas estelares.

Una vez identificadas las estrellas con planetas candidatos, se discute lo que implican las condiciones de los diferentes tipos de estrellas en la búsqueda de vida en exoplanetas. Se sugiere

investigar las atmósferas de los planetas en las zonas habitables de las estrellas seleccionadas, utilizando modelos y técnicas de observación para determinar la composición atmosférica y la búsqueda de bioseñales, como la presencia de oxígeno o gases producidos por seres vivos. El desarrollo de estrategias para detectar biofirmas en las atmósferas de estos planetas es básico.

9. Comunicación con astrónomos.

Se mandará una versión de nuestro trabajo a astrónomos planetarios que usan observatorios para estudiar las atmósferas de los exoplanetas en busca de biosignaturas. Este es un proyecto interdisciplinario que requiere conocimientos en astrofísica, química, biología, termodinámica y ciencias de la computación. Si se logran identificar estrellas y planetas con las condiciones adecuadas para la vida, esta investigación podría tener un impacto significativo en nuestra comprensión de la astrobiología y la búsqueda de vida en el Universo.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1. Clasificación de Estrellas

3.1.1. Estrellas y su clasificación espectral

Las estrellas son esferas de gas muy calientes, compuestas principalmente de hidrógeno y helio, aunque también contienen otros elementos en menor proporción. Su color puede variar ampliamente y está determinado por varios parámetros, como su edad, composición, tamaño y temperatura. Las estrellas más frías tienden a tener tonalidades rojizas, mientras que las más calientes presentan colores azules intensos.

El estudio de la radiación de cuerpo negro y las propiedades de la radiación electromagnética y su termodinámica puso en evidencia que el comportamiento de la densidad espectral de la radiación, lo que define la distribución de su energía por unidad de volumen, está en función de la frecuencia (o longitud de onda) a una temperatura dada. La emisión térmica es la radiación electromagnética emitida por un cuerpo caliente, un haz de rayos de luz al que se le puede asociar una energía de radiación (ver sección 3.1.2).

Una forma común de clasificar las estrellas es de acuerdo con la temperatura de su superficie, la cual se determina utilizando la ley de Wien que es la relación entre la temperatura de un objeto y la longitud de onda en la que se produce el pico de emisión de su radiación electromagnética (ver sección 3.1.3).

La clasificación espectral es un sistema utilizado para categorizar las estrellas según sus características espectrales. Se basa en la observación de las líneas de absorción en el espectro de luz emitido por las estrellas. Estas líneas corresponden a niveles de energía en átomos específicos.

Se utiliza una secuencia alfabética para clasificar las estrellas, comenzando con la letra “O” para las estrellas más calientes y finalizando con la letra “M” para las estrellas más frías. A continuación, se presenta una tabla con las diferentes clases espectrales y sus respectivas temperaturas superficiales promedio:

Clase espectral	Temperatura (K)
O	45,000
B	20,000
A	8,750
F	6,750
G	5,500
K	4,000
M	2,750

3.1.2. Ecuación de Planck: Radiación de Cuerpo Negro

Para describir radiación electromagnética emitida por cuerpos calientes (en equilibrio a cualquier temperatura) se hace uso del cuerpo negro, un objeto idealizado cuyas paredes se mantienen a temperatura constante T . La radiación en el interior tiene la misma temperatura T , está en equilibrio con las paredes. La radiación externa es totalmente absorbida por las paredes, lo que le da el nombre de cuerpo negro. La descripción de esta radiación se da en términos de la temperatura T , independientemente del mecanismo con el que se emite la radiación.

Se conoce la distribución de fotones en un gas (radiante) en equilibrio termodinámico a temperatura T . Esta distribución se puede dar como función de la frecuencia ν . La densidad de energía (energía por unidad de volumen) tiene la forma siguiente:

$$u(\nu)d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3(e^{\beta h\nu} - 1)}d\nu \quad (3.1)$$

La ecuación de Planck describe la radiación de un cuerpo negro. Determina cuánta energía tiene la radiación entre las frecuencias $\nu + d\nu$ en una unidad de volumen del cuerpo negro a temperatura T .

La distribución por unidad de frecuencia de Planck es equivalente a una por unidad de longitud de onda pues $\nu = \frac{c}{\lambda}$. Realizando el cambio de variable se obtiene:

$$u(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5(e^{\beta hc/\lambda} - 1)}d\lambda \quad (3.2)$$

Esta distribución $u(\lambda)$ tiene un máximo en función de la temperatura. Cuando cualquier objeto emite radiación, la banda de longitudes de onda alrededor de λ_{max} corresponde al color de la luz emitida.

Con esta forma de describir la radiación electromagnética se pueden idealizar las estrellas como cuerpos negros para describir la luz que emiten a partir de su temperatura superficial. Computacionalmente se puede programar para modelar el espectro electromagnético y estudiar la energía emitida en función de su temperatura y, por lo tanto, de su clasificación espectral (Herrera, 2001; García Colin, 1990).

3.1.3. Ley de Wien

La Ley de Wien, formulada por el físico alemán Wilhelm Wien, establece que la longitud de onda en la que un objeto emite la máxima cantidad de radiación está inversamente relacionada con su temperatura absoluta. En otras palabras, a temperaturas altas, el pico de emisión se desplaza

hacia longitudes de onda más cortas (como el azul, el ultravioleta y los rayos X). Mientras que, a temperaturas más bajas, el pico de emisión se desplaza hacia longitudes de onda más largas (como el rojo visible, el infrarrojo y el radio).

Matemáticamente, la Ley de Wien se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T},$$

donde λ_{max} representa la longitud de onda en la que se produce el pico de máxima emisión, T es la temperatura absoluta del objeto y b es la constante de proporcionalidad conocida como constante de Wien.

La Ley de Wien es fundamental en astrofísica y se utiliza para determinar la temperatura de las estrellas y otros cuerpos celestes a partir de la longitud de onda en la que se encuentra su pico de emisión, donde emiten la máxima cantidad de radiación. También es una herramienta importante en la espectroscopia y otras ramas de la física para analizar y caracterizar las propiedades de la radiación electromagnética emitida por diferentes fuentes.

Esta relación permite clasificar las estrellas en diferentes clases espectrales (O, B, A, F, G, K, M) basadas en su temperatura superficial.

(García Colin, 1990; Herrera, 2001)

3.2. Termodinámica

Las propiedades macroscópicas de la materia son nuestras principales interfaces con los fenómenos naturales. La ventaja de la Termodinámica es su generalidad, ya que se aplica a todo tipo de sistema macroscópico, también porque no predice teóricamente valores numéricos específicos para cantidades observables directamente. Las predicciones teóricas provienen de los experimentos u otras disciplinas como la teoría cinética y la mecánica estadística. Obtiene relaciones entre las propiedades macroscópicas del sistema al someterse a distintos procesos.

Establece los límites (desigualdades) sobre los procesos físicos permitidos y las relaciones entre propiedades aparentemente no relacionadas. Refleja los puntos en común de las leyes de la naturaleza. Las cantidades que siguen el principio de conservación son las principales candidatas como coordenadas termodinámicas independientes del tiempo.

Un sistema termodinámico es una porción del universo físico que es objeto de estudio, por lo que es necesario definir su frontera, el mecanismo que lo separa del resto del Universo. La parte del Universo que interactúa con el sistema constituye sus alrededores. Esta interacción está caracterizada, en diversas formas, por los intercambios mutuos de energía, momento, momento angular, entre otros.

Se sabe experimentalmente, que existe siempre un subconjunto de variables termodinámicas tal que, una vez que se ha determinado el valor de una, los restantes quedan determinados y ya no son arbitrarios. Las variables que forman este subconjunto y que son independientes entre sí son los grados de libertad del sistema. Un estado termodinámico del sistema está definido por el valor de los grados de libertad. Para la descripción del comportamiento de un sistema termodinámico se utilizan los espacios de estados macroscópicos, donde cada punto representa un estado.

Cuando las cantidades conservadas se han esparcido de la manera más óptima sobre los grados de

libertad tal que su valor ya no se modifica, se dice que un sistema está en equilibrio termodinámico; es decir, que sus variables termodinámicas no varían espontáneamente con el tiempo, lo que es una propiedad que sólo cumplen los sistemas completamente aislados de sus alrededores o entorno. Tales estados finales simples e independientes del tiempo se conocen como estados de equilibrio. Los sistemas tienden a estados muy simples independientemente de su historia específica, evolucionan hacia estados en los que las propiedades están determinadas por factores internos en lugar de influencias externas aplicadas previamente.

En realidad, pocos sistemas están en equilibrio absoluto, lo que da lugar a la existencia de pseudo-equilibrios, condiciones que parecen ser consistentes con la definición. Un sistema que completó los procesos relevantes de evolución espontánea y que se describe con pocos parámetros se puede considerar en equilibrio meta-estable. Tal equilibrio tan delicado es suficiente para la aplicación de los principios de la termodinámica. En los estados de equilibrio meta-estable o los fenómenos de estados estacionarios, lo invariante de los grados de libertad se debe a flujos de masa/energía a través del sistema. Se reconocen estos estados por los cambios que provocan en los alrededores (Callen, 1960; García Colin, 1990).

3.2.1. 1ª y 2ª Ley de la Termodinámica

El desarrollo del principio de conservación es de los logros más significativos en la física. La primera ley de la Termodinámica establece la conservación de la energía y define que el trabajo y el calor son formas de transportarla entre un sistema y su entorno. Una vez que la energía es transferida a un sistema, ya sea como trabajo o calor, es indistinguible de la energía que pudo ser transferida de otra manera.

Según la primera ley de la Termodinámica, todo proceso debe satisfacer el principio de conservación de la energía, incluyendo el calor. La variación de la energía interna debe ser la suma de las cantidades de calor y trabajo intercambiados por el sistema con su alrededor. Lo que establece que es imposible que cualquier proceso tenga la finalidad de crear o destruir energía. Niega la existencia de movimiento perpetuo pero no establece la dirección en que pueden ocurrir los procesos, por lo que no limita la transformación de energía de una forma a otra (calor en trabajo y viceversa).

La restricción de la dirección en la que los intercambios o transformaciones de energía pueden ocurrir en un proceso, se observa ya que ocurren de manera natural, y nunca se observa que se den en dirección opuesta. Estas observaciones se generalizan en la segunda ley de la termodinámica, a través de la cual se define la entropía, con lo que se da un criterio y las condiciones para que un proceso pueda ocurrir. La segunda ley y sus enunciados se consideran la generalización de la evidencia experimental que la constituyen. Es equivalente a negar la existencia de un proceso cuyo único fin sea extraer calor de un cuerpo y convertirlo totalmente en trabajo.

Para describir sistemas físico-químicos, biológicos, atmosféricos y hasta astrofísicos, es necesario aplicar estas leyes a sistemas abiertos, que intercambian materia con sus alrededores. La Termodinámica irreversible hace referencia a los ritmos de los procesos físicos y explica la diversidad en sus dinámicas. Particularmente en la biología, el proceso de la vida captura nuestra atención, en lugar del eventual estado de equilibrio del que todos los organismos preceden y al que todos proceden también inevitablemente.

(García Colin, 1990; Callen, 1960)

3.2.2. Entropía

Se tiene un poderoso formalismo de gran generalidad, levantado sobre una base de pocas y simples hipótesis. En el formalismo matemático, para determinar estados de equilibrio se introduce la función variacional y sus valores extremos, la entropía formulada de manera abstracta. Se conoce la entropía de un sistema como función de algunos parámetros extensivos de los subsistemas, con lo que se encuentran los estados de equilibrio que se clasifican según su estabilidad.

Al calcular la variación de entropía de un sistema y añadir la variación de entropía del entorno, se obtiene la suma de todos los cambios de entropía ocasionados por un proceso, la entropía del Universo. Si se produce un proceso reversible, la entropía del Universo permanece invariable. No obstante, todos los procesos naturales son irreversibles.

Cuando un sistema se encuentra en el estado donde su entropía es la máxima que puede tener, ya no cambia el volumen, ni el número de partículas y su energía interna U disminuye hasta que es mínima, entonces el sistema ya no cambia inesperadamente a otro estado, el sistema está en su estado de equilibrio. Si un sistema cambia espontáneamente, sin la intervención de agentes externos, el estado final debe tener mayor entropía que el estado inicial (Herrera, 2001).

El cambio de entropía del Universo asociado a procesos irreversibles es positivo. Continuamente suceden procesos irreversibles en la naturaleza en los que la energía libre se vuelve menos utilizable por un sistema pero no se pierde. La segunda ley expresa el hecho observado de que las variables conservadas en la naturaleza (como la energía, momento, momento angular, entre otros.) se dispersan cada vez sobre más grados de libertad microscópicos. Todos estos procesos implican disipación a través de un sistema, transformación de energía, transferencia de calor y cambios espontáneos de estructura interna, composición química o densidad. La energía se transforma de una forma en otra y tales procesos suponen un paso del orden al desorden, el aumento de la entropía expresa esta evolución.

La mecánica estadística provee esta interpretación física de la entropía. Desde el punto de vista atómico, el equilibrio macroscópico se asocia con las rápidas e incesantes transiciones entre todos los estados posibles de todos los átomos del sistema (según las condiciones de borde), y durante la duración de una medición macroscópica, el sistema pasa rápidamente entre todos los estados atómicos representativos. La mecánica cuántica dicta que en un sistema macroscópico existen muchos estados cuánticos discretos consistentes con los parámetros medidos. El sistema debe estar en cualquiera de estos estados (equiprobables) permitidos según los grados de libertad disponibles (consistentes con las restricciones).

Al remover restricciones (considerando que ningún sistema físico puede estar realmente aislado), se abre la posibilidad de ocupar micro-estados que no estaban disponibles previamente, las transiciones ocurren entre estos nuevos estados hasta que se pierde la distinción por lo que vuelven a ocurrir transiciones espontáneas y aleatorias (se mantiene equiprobable aunque se haya aumentado el número de micro-estados disponibles). Esto ocurre hasta el máximo permitido por las condiciones impuestas, cuando se han distribuido estas cantidades de manera más apta sobre los grados de libertad accesibles.

Esto es muy cercano al postulado de la entropía: la entropía aumenta hasta el máximo permitido por las restricciones impuestas cuando las cantidades conservadas se han esparcido de la manera más probable. Esto sugiere que la entropía se identifica con el número de micro-estados consistente con las restricciones macroscópicas impuestas. Un postulado breve, simple y completo (Callen, 1960;

García Colin, 1990).

3.2.3. Procesos Irreversibles, Estados Estacionarios y Estructuras Disipativas

Con el fin de aplicar lo anterior a procesos biológicos, en los que la presión y la temperatura pueden ser constantes, se utiliza el potencial químico que es función del número de moles de cierta sustancia. El potencial químico representa su energía libre por mol. Dos sistemas que pueden intercambiar partículas están en equilibrio químico si sus potenciales químicos son iguales y las concentraciones de sus componentes son iguales. Cuando hay diferencias de concentración ocurren procesos espontáneos, como la difusión, que incrementan la entropía y que tienden a igualarlas. La diferencia de concentraciones es la “fuerza” que induce estos procesos.

Para ilustrar lo descrito anteriormente, se utiliza el ejemplo de una gota de tinta que se deposita en un vaso con agua. El inevitable intercambio de partículas entre la gota de tinta y el agua sucede hasta que la concentración de partículas de tinta sea la misma en todo el vaso, entonces se establece el estado de equilibrio y ya no surgen cambios espontáneos. Al mezclarse las sustancias se da lugar a un nuevo sistema que ocupa todo el volumen y se encuentran a la misma temperatura y presión. En el estado final, la energía libre total disminuye proporcionalmente al incremento de la entropía. La entropía de la mezcla es mayor que la suma de las entropías individuales (previas) ya que mezclar sustancias es un proceso irreversible que implica aumento de entropía (Herrera, 2001).

La noción de vitalidad en la materia biológica es un desafío especialmente complejo de abordar, ya que involucra múltiples procesos irreversibles emergentes. En un principio, la termodinámica clásica en equilibrio parecía no ser aplicable a la vida, dado que los sistemas cerrados y aislados tienden a evolucionar hacia el equilibrio, lo que parecía chocar con la vitalidad y el dinamismo de la vida. La segunda ley de la termodinámica, que establece que las cantidades conservadas tienden a distribuirse de forma óptima entre todos los grados de libertad microscópicos posibles, excluyendo la organización macroscópica, parecía entrar en conflicto con la vida (Michaelian, 2016).

Ludwig Boltzmann argumentó que la segunda ley es relevante solamente para sistemas aislados, mientras que la vida es un sistema abierto que intercambia materia y energía con su entorno. Propuso que los organismos vivos adquieren y mantienen su organización a expensas de la desorganización del entorno, lo que implica la redistribución de las cantidades conservadas en la naturaleza sobre más grados de libertad microscópicos (Michaelian, 2016).

Cuando un sistema exhibe un alto nivel de organización y, por lo tanto una baja entropía, las cantidades conservadas se distribuyen en un número reducido de grados de libertad microscópicos. Por otro lado, en las regiones ambientales circundantes, la desorganización es mucho mayor (se distribuyen sobre más grados de libertad). Boltzmann señaló que la organización en los seres vivos surge al mismo tiempo que la desorganización de la energía que proviene del Sol y llega a la Tierra (Michaelian, 2016).

La segunda ley de la termodinámica y las cantidades conservadas se manifiestan a través de todas las fuerzas termodinámicas generales, ya que las cantidades conservadas tienden a extenderse en el tiempo sobre un mayor número de grados de libertad microscópicos. Esto incluye los niveles vibracionales, rotacionales, traslacionales y electrónicos de las moléculas o átomos del sistema. Esto se considera una ley fundamental de la naturaleza a nivel macroscópico (Michaelian, 2023).

Los flujos o procesos que involucran la dinámica de materia o energía están impulsados por

potenciales termodinámicos generales. Por ejemplo, el potencial eléctrico que impulsa el flujo de materia cargada en corrientes eléctricas; los potenciales de temperatura que promueven el flujo de calor, y los potenciales de concentración que impulsan la difusión de materia. Además, las fuerzas químicas y fotoquímicas desempeñan un papel crucial en las transformaciones moleculares y reacciones químicas (Prigogine, 1967; Prigogine y Nicolis, 1967, 1971).

La relación entre estas fuerzas y los flujos no sigue necesariamente una dinámica lineal: en situaciones donde las fuerzas termodinámicas son considerablemente elevadas, la generación de flujos internos puede desencadenar la aparición de nuevas fuerzas internas, lo que a su vez originaría y desataría una serie de procesos acoplados (no lineales). Esta no linealidad es responsable de la diversidad de las dinámicas que se observan en la interacción de la materia con su entorno, especialmente en sistemas basados en carbono cuando se ven sometidos a potenciales fotoquímicos (Michaelian, 2016).

Los sistemas termodinámicos no lineales evolucionan en un espacio-fase multidimensional generalizado sobre la superficie de producción de entropía que los describe. Los sistemas abiertos, como la vida, pueden evolucionar hacia estados metaestables y tener la capacidad de cambiar entre estos estados. Esto ocurre en función de las condiciones iniciales y mediante las perturbaciones posteriores cerca de puntos críticos y en las fronteras entre los atractores de estados estacionarios cercanos.

En un sistema fotoquímico real, cada una de estas moléculas intermedias tendrá una concentración particular en un momento dado. El sistema tendrá una producción de entropía debido a la disipación de fotones en las diferentes concentraciones de las diferentes moléculas. Las concentraciones de las moléculas son las variables en las coordenadas de un espacio multidimensional y la variable dependiente es la producción de entropía debido a la disipación de fotones.

Las estructuras en equilibrio minimizan el potencial de Gibbs, mientras que las estructuras fuera de equilibrio optimizan la disipación (producción de entropía) (Michaelian, 2011) y cada estado estacionario corresponde a una estructura disipativa. En el caso de la interacción de la luz con moléculas orgánicas, la superficie de producción de entropía se encuentra sobre un espacio cuyas coordenadas corresponden a la concentración de moléculas. Por ejemplo, la estructuración fotocatalítica disipativa de la adenina a partir de 5 moléculas de cianuro de hidrógeno (HCN) en agua (Ferris y Orgel, 1966; Boulanger, Anoop, Nachtigalova, Thiel, y Barbatti, 2013). En la que cuatro moléculas de HCN se transforman en el oligómero más pequeño y estable (tetramero) de HCN, conocido como *cis*-2,3-diaminomaleonitrilo (*cis*-DAMN), que, bajo un flujo constante de fotones UV-C, se isomeriza en *trans*-DAMN (también conocido como diaminofumaronitrilo, DAFN), el cual puede convertirse, al absorber dos fotones UV-C adicionales, en un intermedio de imidazol, 4-amino-1H-imidazol-5-carbonitrilo (AICN). Finalmente, las reacciones térmicas en estado fundamental caliente con otra molécula de HCN o su producto de hidrólisis formamida (o formiato de amonio) llevan a la purina adenina. Este es un proceso de estructuración disipativa microscópica que termina en adenina (Michaelian, 2017, 2021), un pigmento UV-C con un gran coeficiente de extinción molar en la intensidad máxima del espectro solar superficial UV-C del Arcaico (260 nm) y con una intersección cónica pronunciada que facilita la rápida disipación de fotones a estas longitudes de onda (Michaelian, 2024). En el nivel de ecosistema las coordenadas corresponden a las poblaciones de especies y en el de la biosfera, a las poblaciones de tipos de especies (Michaelian, 2005).

Durante este proceso de transición entre estados, el sistema puede volverse más organizado y

estructurado en términos de la distribución de las cantidades conservadas en los grados de libertad microscópicos del entorno. A estos patrones estructurados se les conoce como estructuras disipativas y se manifiestan en distintos niveles, desde fenómenos meteorológicos como huracanes y tornados hasta máquinas moleculares presentes en las células vivas (Prigogine, Nicolis, y Babloyantz, 1972a, 1972b).

La extensión de la termodinámica a procesos irreversibles se basa en los postulados de la termostática en equilibrio junto con el postulado adicional de la simetría de inversión temporal de las leyes de la física. Sus principios, indican que en sistemas no lineales pueden surgir múltiples estados locales de disipación que son estables y estacionarios. Estos estados implican procesos o flujos que pueden romper la simetría tanto en términos espaciales como temporales, lo que conduce a la formación de estructuras disipativas en el sistema en relación con su entorno. En sistemas con retroalimentación positiva, por ejemplo, autocatalíticos, la evolución entre estados, generalmente, lleva a una mayor disipación del potencial ambiental impuesto (García Colin, 1990; Callen, 1960).

3.3. Selección Termodinámica Natural

Desde la perspectiva de la TDT en el origen de la vida, la selección natural se ve como un proceso termodinámico que beneficia a sistemas que incluyen tanto componentes bióticos como abióticos. A partir de la interacción entre la radiación solar y las moléculas orgánicas, favorece a aquellos sistemas que son más eficientes en disipar la energía en su entorno. Reconoce la existencia de múltiples soluciones e inestabilidades en sistemas no lineales. Su aplicabilidad abarca todos los niveles jerárquicos, desde las moléculas fundamentales en el origen de la vida hasta la biosfera actual. Este enfoque proporciona una explicación físico-química del origen, la persistencia y la evolución de la vida. El análisis de sistemas biológicos desde la óptica de la termodinámica irreversible ofrece una comprensión más profunda de las características únicas de la biología y sus interacciones con el entorno, sin necesidad de postular una vitalidad inherente de la materia viva, como a menudo se hace en la perspectiva biológica tradicional (Michaelian, 2023).

La vida desempeña un papel crucial en la producción de entropía en la Tierra, especialmente en la captación y eficiente disipación de la energía de la luz solar. Durante el período en que la vida se originó en la Tierra, la atmósfera carecía de oxígeno y ozono, lo que permitía que la luz en un rango de longitudes de onda de 205 a 285 nm, el UV-C “suave”, llegara sin obstáculos a la superficie terrestre.

Nos interesa encontrar condiciones iniciales similares, principalmente de la luz solar. Michaelian y Siemenov en 2015, presentaron los cálculos y las gráficas del espectro del Sol y otros tipos de estrellas a través del tiempo. En sus resultados se observa que lo importante es el radio de la estrella y la intensidad de su luz, también toman en cuenta la extinción que producen los gases que componían la atmósfera de un planeta como el nuestro: el pico en UV-C se extendería de 205 a 285 nm, la absorción de las moléculas fundamentales coincide exactamente con esta ventana de la atmósfera, como se puede notar en la figura 3.1.

Simultáneamente, la cantidad de luz ultravioleta cercana y visible (entre 320 y 700 nm) era menor que la actual debido a que el Sol tenía un radio más pequeño comparado con el de ahora (Karam, 2003). Este flujo solar de UV-C conduce a la formación de las moléculas fundamentales de la vida, como pigmentos estructurados disipativamente. Estos pigmentos se generaron de manera espontánea a partir de moléculas precursoras comunes basadas en carbono, como el cianuro de

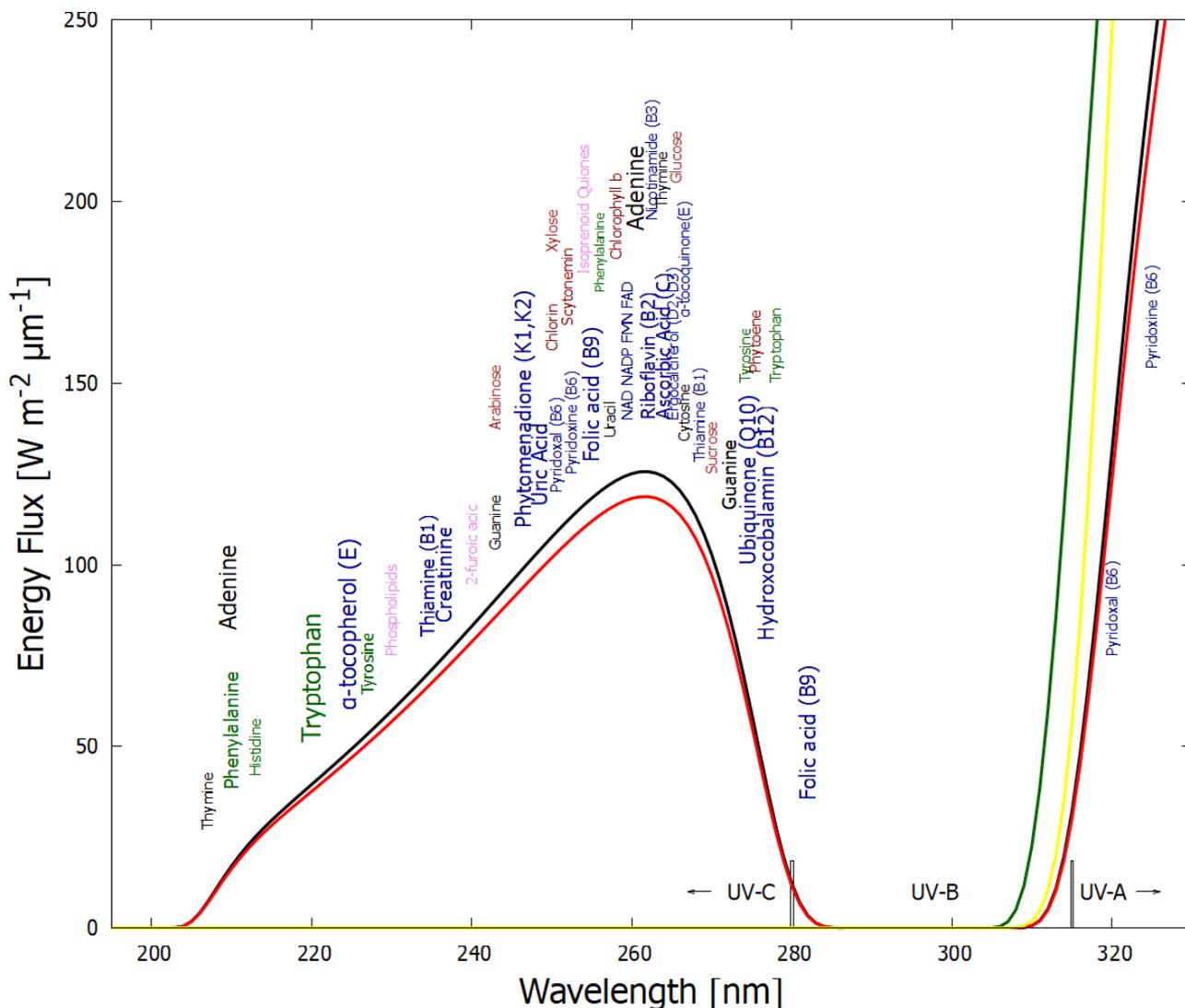


Figura 3.1: Absorción de las moléculas fundamentales y ventana atmosférica en el UV-C.

hidrógeno (HCN), el cianógeno (NCCN) y el dióxido de carbono (CO_2) en el agua (H_2O), bajo la influencia de los fotones de UV-C “suave”.

Durante el Arcaico, los fotones con la energía adecuada, podían inducir la ruptura y reconstrucción de enlaces covalentes en el cianuro de hidrógeno (HCN) y el dióxido de carbono (CO_2) en el agua (H_2O) (Michaelian, 2021). La luz UV-C “suave” tenía la energía suficiente por fotón para modificar los enlaces covalentes de carbono simples y dobles, aunque no tenía la energía necesaria para ionizar o fragmentar estas moléculas (Michaelian, 2009a, 2011, 2017, 2021, 2022).

La evidencia geoquímica indica que la luz UV-C estuvo presente en la superficie de la Tierra antes del surgimiento de la vida, hace hace 3.9×10^9 años y persistió durante al menos 1.5×10^9 años, formando los primeros organismos constituidos por pigmentos orgánicos. Posteriormente, los organismos evolucionaron hacia una fotosíntesis oxigénica, que liberó pigmentos de UV-C (oxígeno y ozono) en la atmósfera y resultó en la formación de una capa de ozono protectora en la estratósfera por lo que se abrieron nuevas oportunidades para disipar otras longitudes en la superficie (French y cols., 2015). A través de rutas biosintéticas más complejas y no covalentes, que condujeron a la

disipación de más fotones de longitudes de onda, de menor energía pero mayor intensidad, surgieron los primeros seres vivos que lograron estructurar pigmentos de luz visible. Esto permitió a toda la materia viva extenderse sobre la superficie terrestre y adaptarse a un espectro más amplio de luz solar.

A medida que estas moléculas se volvieron más diversas y especializadas, promovieron la formación de rutas biosintéticas cada vez más complejas y capaces de disipar más rápidamente la energía de excitación electrónica al estado base, gracias a la selección termodinámica de la disipación. Estas rutas no solo estaban dirigidas a disipar la radiación UV-C y otras regiones ultravioleta, sino que, finalmente, evolucionaron para abarcar todo el espectro de longitud de onda corta de la luz solar, extendiéndose hasta el borde rojo. Esto les confirió la capacidad de convertirse en productos finales fotoestables en la región más relevante del espectro solar (Michaelian, 2023).

Es importante destacar que las diferentes longitudes de onda de la radiación solar dan lugar a una variedad de procesos irreversibles en el origen de la vida. Por ejemplo, las longitudes de onda más cortas en el rango de UV-C “duro”, con menos de 205 nm, provocan la disociación de precursores como el cianuro de hidrógeno (HCN) y el cianógeno (NCCN). Esto resulta en un aumento de la entropía estructural de los fragmentos disociados en el agua.

Por otro lado, las longitudes de onda de UV-C “suave”, que se encuentran entre 205 nm y 285 nm, y las de UV-B, entre 285 nm y 325 nm, tienen energías cercanas a los enlaces covalentes de carbono. Estas longitudes de onda inducen la estructuración disipativa de moléculas fundamentales de la vida, como las nucleobases, aminoácidos, ácidos grasos, por mencionar algunos ejemplos. La energía de los fotones absorbidos se disipa en forma de calor a través de las rutas (intersecciones cónicas) en las moléculas que se han estructurado de esta manera óptima.

Finalmente, las longitudes de onda UV-A y las del espectro visible no tienen suficiente energía para reconfigurar los enlaces covalentes de carbono. En este caso, las moléculas precursoras se mantienen intactas, y la producción de entropía resulta de la transmisión y dispersión de los fotones incidentes en un ángulo sólido mayor (Michaelian y Cano Mateo, 2022).

Según la TDT, la evolución termodinámica impulsa un desplazamiento gradual de las longitudes de onda de los fotones emitidos (en la superficie del planeta) hacia el infrarrojo, y existe evidencia empírica que respalda la existencia de esta selección hacia estados de mayor disipación en la naturaleza en diversas escalas de tiempo y tamaño. Algunos ejemplos que respaldan la idea de que la selección disipativa es un proceso real en la naturaleza que impulsa la evolución hacia estados de mayor eficiencia en la disipación de energía libre, incluyen:

1. A lo largo del ciclo de vida de la hoja de una planta, se ha observado un aumento en la eficiencia de absorción y disipación de fotones (Gates, 1980).
2. La proliferación de la vida fotosintética en la Tierra y su correlación con la sucesión de ecosistemas (Ulanowicz y Hannon, 1987; Schneider y Kay, 1994).
3. Un aumento general en la eficacia de la biósfera en la disipación de fotones, que incluye desde los efectos de las plantas en el ciclo del agua, (Kleidon, 2008; Michaelian, 2012a) hasta la dispersión de nutrientes por parte de los animales, lo cual es necesario para la síntesis de pigmentos.

Durante el origen de la vida, ésta dependía del potencial de los fotones de UV-C “suave” en el ambiente, lo que permitió la estructuración disipativa de las moléculas fundamentales en respuesta a esta radiación. A medida que la vida evolucionó hacia formas más complejas, esta evolución

siempre estuvo vinculada al potencial de luz externo, pero con un cambio gradual hacia regiones con mayor intensidad de fotones, como el UV-A y las longitudes de onda visibles. Este cambio en la absorción de fotones llevó al surgimiento de mecanismos de selección termodinámica más complejos y, en última instancia, a una estructuración disipativa más sofisticada. El potencial de los fotones solares desempeñó un papel crucial en el origen y la evolución de la vida como procesos termodinámicos fuera del equilibrio (Michaelian, 2023).

En la actualidad, una abundante cantidad de material biológico, conocido como fitoplanctón (microorganismos como cianobacterias y diatomeas), flota en la superficie de los océanos de la Tierra. Además, existen virus, fragmentos de RNA y DNA, pigmentos, lípidos y otros componentes orgánicos en la superficie. Estos microorganismos y moléculas desempeñan un papel crucial en la absorción y disipación de la luz solar; absorben una parte significativa de la luz solar y la convierten en calor, que luego se transfiere a la superficie del agua y al aire. Si la superficie del océano careciera de este material orgánico, solo se absorbería fuertemente la luz infrarroja y ultravioleta lejano, mientras que el resto del espectro solar se reflejaría o transmitiría hacia el espacio o las profundidades oceánicas. La existencia de este conjunto de microorganismos y moléculas permite la absorción también de partes del espectro visible y ultravioleta cercano del Sol (Chaplin, 2016).

La presencia de material biológico en la superficie de los océanos tiene un impacto importante en el flujo de energía en la Tierra, permitiendo la absorción y disipación de energía solar, contribuyendo a los procesos que aumentan la producción global de entropía. La conversión de la energía lumínica en calor resulta en un aumento de la temperatura en la superficie del agua, lo que a su vez conduce a la evaporación del agua. Este vapor de agua contribuye al ciclo del agua, lo que implica una mayor disipación de energía y, por lo tanto, un aumento en la producción global de entropía.

La evaporación es un proceso disipativo adicional, ya que la energía térmica se utiliza para convertir el agua líquida en vapor, que luego participa en el ciclo del agua, un segundo proceso disipativo acoplado que aumenta aún más el desplazamiento de la luz incidente hacia el infrarrojo. Este ciclo de absorción de luz solar por plantas, fitoplanctón y la interacción con el ciclo del agua, genera un fenómeno de acoplamiento autocatalítico de diferentes procesos termodinámicos irreversibles (esenciales para la biósfera). Esto constituye otro ejemplo de cómo la vida y sus interacciones con el entorno están vinculados a la termodinámica y la producción de entropía sobre la Tierra. Estos fenómenos resultan en una estructuración disipativa más compleja y un aumento significativo en la producción global de entropía (Michaelian, 2012a).

La distribución de pigmentos orgánicos en diferentes partes del planeta es un factor crucial para la eficiente absorción de luz solar. Diferentes especies de plantas, fitoplancton y cianobacterias presentan pigmentos específicos que les permiten absorber la luz en diferentes rangos de longitud de onda. Esta diversidad de pigmentos y la distribución geográfica de las especies contribuyen a una mayor absorción y disipación de fotones en todo el planeta. La evolución en la biosfera no está orientada a optimizar la supervivencia de un solo proceso irreversible (como un gen, individuo o especie), sino a optimizar la disipación de fotones en la biosfera en su conjunto. Los seres vivos y los procesos vitales contribuyen a esta disipación al absorber y convertir la energía de la radiación solar en diversas formas alrededor del globo.

3.4. Fundamentos de la Teoría de la Disipación Termodinámica (TDT)

La perspectiva de la TDT aborda el surgimiento de la vida desde el punto de la termodinámica, que representa un marco teórico (basado en las leyes fundamentales de la naturaleza) que es posible aplicar a fenómenos y gran cantidad procesos fuera de equilibrio. La TDT se basa en las leyes de conservación, la segunda ley de la termodinámica y la termodinámica irreversible, que desempeñan un papel esencial en la descripción de la evolución de la materia y la formación de estructuras disipativas. Especialmente con sistemas no lineales, se puede describir la dinámica de la estructuración disipativa con bases sólidas para la comprensión de cómo la materia evoluciona en interacción con su entorno, como los sistemas biológicos, desde una perspectiva física. La TDT brinda una perspectiva unificada para comprender tanto el origen de la vida como su evolución posterior, ayuda a comprender cómo la vida en la Tierra, evoluciona y se adapta para disipar eficazmente la energía solar y aumentar la producción de entropía en toda la superficie del planeta (Michaelian, 2016, 2023).

La teoría plantea que las moléculas fundamentales de la vida se originaron inicialmente como pigmentos que se organizaron de manera óptima como estructuras para la disipación de fotones UV-C en la superficie de los océanos. Por tanto, la vida se originó durante la era Arqueana a partir de precursores más simples y comunes presentes en el agua, para producir pigmentos en el rango de UV-C. Su principal función era absorber la radiación UV-C y emitir fotones de menor energía (disiparla como calor) en el entorno circundante. En este contexto, la disipación conlleva la distribución de la cantidad conservada (la energía de los fotones), a través de un mayor número de grados de libertad microscópicos (excitación de modos vibracionales de las moléculas en el agua), lo que implica la generación de entropía que caracteriza cualquier estructura disipativa y proceso irreversible (Michaelian, 2023).

La evolución de la vida no es independiente de los procesos abióticos en su entorno. El potencial de fotones solares, junto con los principios termodinámicos, especialmente la segunda ley, y las leyes de conservación, impulsan, transforman y seleccionan estos procesos disipativos irreversibles. La evolución, tanto biótica como abiótica, está impulsada por la demanda termodinámica de aumentar la disipación de fotones, lo que equivale a incrementar la producción de entropía. La vida en la Tierra es una respuesta termodinámica a la necesidad de disipar la energía libre solar de manera más eficiente, dadas las condiciones del planeta (Michaelian y Cano Mateo, 2022).

La selección termodinámica natural se convierte en un mecanismo unificador para explicar cómo los sistemas vivos y no vivos interactúan en la biosfera. En lugar de considerar a la vida como algo independiente de las leyes físicas y químicas, la teoría disipativa muestra cómo la vida es una manifestación natural de la termodinámica y cómo los seres vivos están interconectados con su entorno. En conjunto, las interacciones entre procesos bióticos y abióticos están relacionadas con la disipación de fotones y la producción de entropía en la biosfera, contribuyen a la complejidad de los ecosistemas y a la regulación de la energía y los nutrientes en la Tierra. Destaca la importancia de la información genética y la capacidad de adaptación de los seres vivos para la formación y estabilidad de la biosfera. Las especies, a lo largo de la evolución, han acumulado información genética relacionada con la forma en que absorben y disipan la energía solar. Esta flexibilidad genética permite a los seres vivos ajustarse a diferentes condiciones ambientales, lo que les permite evolucionar hacia estados más eficientes y adaptables en términos de la disipación de la energía solar (Michaelian, 2012b; Michaelian y Simeonov, 2015; Michaelian, 2023).

La vida en la Tierra se origina y evoluciona a través de la estructuración disipativa de la materia en respuesta a la radiación solar, y la selección termodinámica que busca incrementar la disipación de fotones. Esta es una explicación con bases sólidas para el posible origen y la evolución de la vida en otras regiones del espacio. No es necesario suponer una vitalidad inherente en la materia biótica, ya que cualquier material puede estructurarse disipativamente, según la fuerza de sus enlaces atómicos y su interacción con luz en la región adecuada de longitudes de onda. En el planeta Tierra, la luz UV-C “suave” desempeñó un papel esencial en la formación de las moléculas fundamentales, que eventualmente permitieron la complejidad de la vida tal como la conocemos en la biosfera, donde la selección termodinámica sigue dependiendo en gran medida de la disipación de fotones UV-C. Esto plantea la cuestión sobre la posibilidad de hallar vida basada en carbono, similar a la nuestra: en planetas alrededor de estrellas que no emiten una cantidad significativa de fotones de UV-C “suave”, podría ser mucho más complicado o incluso improbable (Michaelian, 2023).

La exploración de la habitabilidad de exoplanetas tiene en cuenta múltiples factores: la radiación de su estrella, la presencia de agua, la composición atmosférica y otros elementos. En última instancia, la existencia de vida en otros rincones del Universo dependerá de una intrincada interacción entre las condiciones específicas de cada planeta, su estrella anfitriona y los factores ambientales, químicos y físicos particulares de cada entorno.

3.5. Biología, Química y Astro-biología

El carbono es fundamental para la vida en la Tierra y seguramente para la vida allá fuera también. Es el cuarto elemento más abundante del Universo y tiene propiedades que consiguen formar cadenas de miles millones de piezas enlazadas y plegadas, por ejemplo, el DNA.

El agua es vital para toda la vida en la Tierra, pero no podemos descartar que haya sitios del Universo donde se haya formado vida con otras reacciones químicas usando un disolvente distinto, como el amoníaco o etano. El hidrógeno es el elemento más abundante del Universo y el oxígeno es el tercero, se combinan fácilmente y se detectan señales de agua en abundancia en el Universo, por ejemplo, en lunas de Júpiter. No se conoce ningún otro líquido con las propiedades del agua en las condiciones terrestres. Por esto, si hay una mínima probabilidad de encontrar vida en otra parte del Universo será porque estará basada en agua y carbono, ya que en otro caso no sabemos qué buscar.

Las moléculas de agua han acaparado los esfuerzos en la búsqueda de vida, ya que es crucial para la vida en la Tierra, lo que llevó al concepto de zona habitable. La zona habitable alrededor de una estrella es la región donde los planetas orbitan a la distancia adecuada para tener agua en fase líquida en la superficie. Esto puede ayudar a reducir las opciones sobre dónde buscar detalladamente, pero no constituye una firma biológica confiable e infalible.

La posibilidad de encontrar formas de vida basadas en elementos diferentes al agua y el carbono, como el silicio y otro disolvente, se menciona como un tema de gran interés. Esto agrega un nivel de diversidad en la búsqueda de vida, aunque plantea preguntas sobre cómo se podrían detectar e identificar estas formas de vida y qué características específicas podrían revelar su existencia, al no estar familiarizados con su comportamiento.

Actualmente, se considera la búsqueda de vida en las lunas de Júpiter, lo que ya no coincide con el concepto de zona habitable ya que se considera que el agua líquida podría encontrarse bajo la superficie. Para este tipo de búsqueda de vida fuera del Sistema Solar aún falta tiempo para

establecer programas de estudio de lunas extrasolares. Por el momento, se hacen grandes avances en la exploración de exoplanetas y sus atmósferas en busca de señales de vida con la presencia de ciertos compuestos químicos.

Las características propias del planeta Tierra definieron la manera en que pudo originarse la vida y sus funciones. La Tierra recibe una cantidad estable de energía (luz) sin grandes emisiones muy energéticas, además de poseer una gran cantidad de agua, una atmósfera, minerales y vida sobre toda su superficie. Nuestro planeta, por el momento, es único en ese sentido, es distinto de los miles de planetas que se han confirmado que existen, de los exoplanetas que se han detectado muy pocos tienen características similares a la Tierra.

La idea de la habitabilidad de un planeta o su capacidad de albergar vida es peculiar, ya que la única referencia es la Tierra. La similitud de un planeta con la Tierra no garantiza su habitabilidad, pero se debe considerar el tamaño, la distancia a su estrella, la presencia de atmósfera y su composición. Los factores ambientales como la presión, el clima (que regula temperatura y distribución de agua) y la temperatura son críticos para determinar si un planeta es adecuado para la vida como la conocemos. Factores geológicos como la actividad volcánica, que proporciona calor y gases esenciales para la vida, la tectónica de placas (que regula clima a largo plazo, recicla los elementos necesarios para la vida y mantiene el ciclo del carbono), la composición química y biológica del suelo que contribuye a la riqueza de nutrientes y la atmósfera (mezcla de gases respirables) determinan la posibilidad de hospedar vida como la conocemos.

Una manera de detectar planetas es el método de tránsito. Cuando un planeta transita frente de su estrella y se observa la luz de la estrella se puede medir que disminuye. Y cuando el planeta pasa frente a la estrella, la luz que recibimos acaba de atravesar la atmósfera del planeta, en caso de haber atmósfera. Por lo tanto, si se consigue separar las luces y descomponer su espectro, es posible que se puedan detectar señales de los compuestos químicos que forman esta atmósfera. Es posible estudiar y caracterizar la composición de atmósferas planetarias e intentar deducir que hay vida. Conocer la complejidad molecular en una atmósfera podría ser suficiente indicio de vida en otro planeta.

Las biofirmas más convincentes deberían ser combinaciones de gases específicos. Si en una atmósfera planetaria descubrimos grandes cantidades de oxígeno y metano (cómo se detectarían en la Tierra) probablemente habrá vida. El oxígeno y metano son incompatibles, el oxígeno es muy reactivo y degrada el metano, para que existan simultáneamente debe haber fuentes constantes que los renueven. La fuente constante que genera el oxígeno es la fotosíntesis en plantas y bacterias. Las fuentes constantes que renuevan el metano son el vulcanismo y sobre todo el metabolismo (la vida), ambas sustancias no coexistirían en equilibrio químico. La Tierra tiene una atmósfera muy desequilibrada, por lo que las combinaciones de gases que señalen atmósferas tan desequilibradas son un buen indicador de la presencia de vida.

Igualmente se buscan moléculas como el óxido nitroso que puede indicar actividad biológica, que en un planeta rocoso con proporciones de estos gases similares a la Tierra sería difícil de explicar de otra manera. Otra de estas señales es el sulfuro de dimetilo [DMS (CH_3)₂S] que se libera en la Tierra como subproducto de las reacciones metabólicas del planctón.

3.5.1. Moléculas Fundamentales de la Vida

Tras la formación de la Tierra hace unos 4 600 millones de años y después del bombardeo tardío hace 3 900 millones de años (Schidlowski, 1988), hubo que esperar un período de cientos de miles de años para que la superficie de la Tierra se enfriara lo suficiente, permitiendo la existencia de agua líquida. Este cambio de temperatura creó un ambiente propicio para el surgimiento de la vida tal como la conocemos. En ese entorno primitivo con una atmósfera rica en carbono, se dieron las condiciones necesarias para que se llevara a cabo la síntesis de las moléculas precursoras que luego darán origen a los primeros pigmentos orgánicos, las moléculas fundamentales de la vida (Michaelian, 2016).

Ferris y Orgel demostraron experimentalmente la posibilidad de sintetizar la nucleobase adenina, una molécula fundamental de la vida, a partir de compuestos más simples como el cianuro de hidrógeno (HCN) en agua tibia, utilizando luz ultravioleta (Ferris y Orgel, 1966). El hallazgo de estas moléculas fundamentales en meteoritos, cometas y en regiones como nubes de polvo y gas interestelar, sugiere que la luz ultravioleta es una fuente de energía común para su formación en diversas condiciones físicas (Michaelian, 2016).

Dentro de estas moléculas fundamentales se encuentran los ácidos nucleicos DNA y RNA. Además, también se incluyen nucleobases, azúcares, aminoácidos y ácidos grasos. Estas moléculas son fundamentales para la vida y participan en numerosas funciones celulares que permiten la supervivencia y el funcionamiento de los organismos vivos (Herrera, 2001). Las características de estas moléculas, como su energía de ionización, son el núcleo central de nuestra investigación (Michaelian, 2016).

Los carbohidratos son moléculas orgánicas compuestas por carbono, hidrógeno y oxígeno. Están presentes en forma de azúcares, una manera de almacenar energía que las células utilizan. Los carbohidratos desempeñan un papel fundamental en la obtención de energía para las células. Cuando se descomponen en el proceso de la respiración celular, liberan energía que se utiliza para diversas funciones celulares y como elementos estructurales.

Los lípidos son moléculas orgánicas que incluyen grasas, ácidos grasos y fosfolípidos. Tienen una estructura característica de cadenas de carbono. Los lípidos desempeñan múltiples funciones en las células. Forman parte de las membranas celulares, donde se organizan en una bicapa que controla el paso de sustancias dentro y fuera de la célula.

Los aminoácidos son fundamentales, con ellos se forman las proteínas. No se comprende la vida sin los aminoácidos porque las proteínas los necesitan. Las enzimas son proteínas, por lo tanto hechas de aminoácidos. Muchas hormonas son proteínas, muchas partes estructurales de la célula son proteínas y se necesitan proteínas para fabricar el DNA.

Las proteínas son moléculas esenciales para la vida y están compuestas por cadenas de aminoácidos. Tienen una gran cantidad de funciones en las células. Las enzimas son un tipo de proteína que actúa como catalizador para las reacciones químicas celulares, permitiendo que ocurran más rápido.

Los ácidos nucleicos, como el DNA (ácido desoxirribonucleico) y el RNA (ácido ribonucleico), son las moléculas que almacenan y transmiten la información genética. Están compuestos por cadenas de nucleótidos, compuestos orgánicos formados por una base nitrogenada, un azúcar y un grupo fosfato. El DNA controla la herencia y la síntesis de proteínas al proporcionar la información

genética necesaria. El RNA, por otro lado, juega un papel central en la síntesis de proteínas, actuando como intermediario entre el DNA y las proteínas.

Una célula está llena de millones de proteínas y moléculas más simples como el agua, en la que se producen miles de complejos procesos autoreplicantes gran cantidad de veces cada segundo. Al mantener este dinamismo que le concede la “vitalidad” reduce su entropía (al interior de la célula) trabajando constantemente para mantenerse separada de su entorno. Entre estos procesos mantiene la concentración de ciertas moléculas distintas en el interior y exterior expulsando excedentes. Para hacer estos cambios se requiere energía y obtenerla para utilizarla, lo que fue uno de los retos básicos para los primeros seres vivos que lo hicieron a través de reacciones químicas sencillas hasta la síntesis del ATP y el desarrollo de la fotosíntesis.

La vida supera la mera composición de moléculas fundamentales organizadas de forma específica. Involucra procesos macroscópicos dinámicos, como la movilidad, el metabolismo, la homeostasis, la replicación, la proliferación y la capacidad de mutar, evolucionar y adaptarse a diversos entornos. Por tanto, el origen de la vida abarca mucho más que la simple síntesis de moléculas fundamentales (Michaelian, 2023).

El metabolismo es el uso o la transformación de energía en los procesos necesarios de la vida de un organismo. Los animales, como los seres humanos, obtienen su energía a partir de la oxidación de alimentos (carbohidratos, grasas, proteínas).

La energía requerida para el metabolismo es vital para la supervivencia de todos los organismos vivos y representa una pequeña parte de la energía libre total disipada por la vida. La mayor parte de la energía libre que llega a la Tierra en forma de fotones solares se disipa como calor, gracias a la acción de pigmentos orgánicos en el agua. Aunque esta disipación de energía pueda parecer inútil a simple vista, en realidad, es fundamental en un Universo dinámico bajo los mandatos de la segunda ley de la termodinámica y para la existencia de la vida desde una perspectiva termodinámica.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Introducción

En esta sección, se presentan los resultados de la investigación sobre la relevancia de la emisión de luz UV-C en los distintos tipos de estrellas y su posibilidad de albergar planetas con condiciones adecuadas para la estructuración disipativa de moléculas orgánicas. Principalmente, se recopiló información sobre la energía de ionización de las moléculas fundamentales de la vida y el espectro de emisión de diferentes tipos de estrellas. A continuación, se detallan estos resultados clave:

1) La radiación electromagnética, con la energía necesaria para ionizar las moléculas fundamentales de la vida corresponde a las longitudes de onda menores a 205 nm. Se encuentra en la región de UV-C “duro” del espectro electromagnético.

2) Las estrellas de tipo F, G y K emiten en la región UV-C “suave” y no presentan emisión muy intensa en la región de UV-C “duro”.

4.2. Energías de Ionización de Moléculas Fundamentales

En la tabla 4.1, se presentan los resultados de las energías de ionización de las moléculas fundamentales para la vida (bases nitrogenadas, aminoácidos, azúcares y agua) y sus longitudes de onda correspondientes en el espectro electromagnético. A partir de éstas, es posible distinguir las estrellas con emisión de luz adecuada para albergar planetas con las condiciones necesarias para la no-ionización y compatible con la estructuración disipativa de estos pigmentos orgánicos primordiales.

Tabla 4.1: Energía de ionización de moléculas fundamentales.

Moléculas Fundamentales	Energía de ionización en agua [eV]	Longitud de onda [nm]	Categoría UV-C ¹
Adenina (de Vera y cols., 2021)	8.44	145	S-UVC
Guanina (de Vera y cols., 2021)	8.24	153	M-UVC
Thimina (de Vera y cols., 2021)	9.14	138	S-UVC
Citosina (de Vera y cols., 2021)	8.94	145	S-UVC
Uracilo (de Vera y cols., 2021)	9.5	132	S-UVC
Fenilalanina (Close, 2011)	8.72	138	S-UVC
Tirosina (Close, 2011)	8.19	161	M-UVC
Triptofano (Close, 2011)	7.43	170	M-UVC
Histidina (Close, 2011)	8.38	145	S-UVC
Azúcar (Improta y Douki, 2021)	Ribosa: 9.2	126	S-UVC
	Desoxirribosa: 9.1	132	
Ácidos grasos (Katsumata, 2005)	Ácido docosaheptaenoico: 8.75	142	S-UVC
Agua (Perry y cols., 2020)	10.19	106	S-UVC

¹ Las categorías S-UVC y M-UVC indican la magnitud de la longitud de onda en la región de UV-C “duro”. S-UVC denota la longitud de onda corta (120-160 nm) y M-UVC la longitud de onda media (160-210 nm).

Con estas energías de ionización conocemos la energía necesaria para destruir estas moléculas y la longitud de onda correspondiente en el espectro electromagnético. Todas se encuentran debajo de 205 nm (en la región de UV-C “duro”), y la mayoría se encuentran en la región S-UVC de bajo de 150 nm. La luz de las categorías S-UVC y M-UVC induce la destrucción de las moléculas fundamentales para la vida.

4.3. Tipos de Estrella

Para conocer el espectro de los fotones emitidos por cada tipo de estrella (característico por su temperatura superficial promedio), se utilizaron programas de radiación de cuerpo negro basados en la ecuación de Planck. Luego, a partir de la información obtenida con el simulador de espectro *SPECTRAL CALCULATOR -HIGH-RESOLUTION SPECTRAL MODELLING* (GATS, 2022), se calculó el flujo para diferentes tipos de estrella sobre una superficie a distancia equivalente a la de la Tierra. Así, se conoce la cantidad de energía que recibe en condiciones similares de tamaño y distancia a su estrella, tanto en el rango de 10 nm a 205 nm, donde ocurre la ionización de las moléculas basadas en carbono, como de 205 nm a 285 nm, donde puede ocurrir la estructuración disipativa.

En primer lugar, se determinaron los valores clave en los espectros de varios tipos de estrellas que se presentan en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4 y se ilustran en las gráficas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7. Esto se logró utilizando el simulador de espectros de Planck (GATS, 2022), a partir de la función de cuerpo negro.

La tabla 4.2 presenta, a partir de la clasificación de estrellas y su temperatura promedio, la información de la emisión total.

Tipo de estrella (Temperatura promedio [K])	Emisividad radiante [W/m ²]	Radiancia [W/m ² /sr]	Radiancia espectral máxima [W/m ² /sr/μm]	Longitud de onda de pico [nm]
O (45 000)	2.32527e+ 11	7.40156e+ 10	7.55792e+ 11	64.3945
B (20 000)	9.07284e+ 09	2.88797e+ 09	1.31066e+ 10	144.888
A (8 750)	3.32396e+ 08	1.05805e+ 08	2.10078e+ 08	331.172
F (6 750)	1.17717e+ 08	3.74704e+ 07	5.7393e+ 07	429.297
G (5 500)	5.18888e+ 07	1.65167e+ 07	2.06136e+ 07	526.864
K (4 000)	1.45165e+ 07	4.62076e+ 06	4.19411e+ 06	724.438
M (2 750)	3.24305e+ 06	1.0323e+ 06	644174	1053.73

Tabla 4.2: Emisión de cada tipo de estrella

A partir de la temperatura superficial promedio de cada tipo de estrella que se introdujo en el simulador, se obtuvo la información sobre la cantidad de luz en unidades de vatio por metro cuadrado de la superficie de la estrella por estereorradián (W/m²/sr) en total en los dos rangos espectrales UV-C “duro” y “suave”. También, se obtuvieron los siguientes datos para cada tipo de estrella: la emisividad radiante en unidades de vatio por metro cuadrado (W/m²), la radiancia en unidades de vatio por metro cuadrado por estereorradián (W/m²/sr), la radiancia espectral máxima en unidades de vatio por metro cuadrado por estereorradián por micrómetro emitido (W/m²/sr/μm) y la longitud de onda en nanómetros (nm) correspondiente al pico espectral.

Junto a estos valores y al especificar dos longitudes de onda en el programa: 150 nm y 260 nm. se obtuvieron los siguientes datos para cada una de estas longitudes de onda: la radiancia espectral en unidades de vatio por metro cuadrado por estereorradián por micrómetro emitido (W/m²/sr/μm), el número de fotones por julio (photons/J) en esa longitud de onda y la radiancia en las bandas espectral que abarcan desde 10 nm a 205 nm y desde 205 nm a 285 nm, en unidades de vatio por metro cuadrado por estereorradián (W/m²/sr).

Las tablas 4.3 y 4.4, contienen la información de emisión de luz UV-C “dura” y “suave” respectivamente. Incluyen la temperatura promedio de cada tipo de estrella, su producción en una longitud de onda específica y total en esa región, y el valor del “flujo en la superficie” de la Tierra.

La nueva variable llamada “flujo en la superficie” se obtuvo multiplicando la radiancia particular en la banda por el ángulo sólido subtendido por el Sol en la superficie de la Tierra. El valor de este ángulo sólido se calculó como aproximadamente 6.77e- 05 estereorradianes. Esta variable representa la cantidad de energía que emite la estrella y se recibe por metro cuadrado de superficie en un planeta similar a la Tierra a la misma distancia de su anfitriona, en las diferentes bandas espectrales.

Tipo de estrella (Temperatura Promedio [K])	Radiancia espectral en 150 nm [W/m ² /sr/μm] [7.55118e+ 17 photons/J]	Radiancia en banda (10 nm - 205 nm) [W/m ² /sr]	Flujo superficie [W/m ²]
O (45 000)	2.11166e+ 11	6.67498e+ 10	4.51896e+ 6
B (20 000)	1.30691e+ 10	1.49021e+ 09	1.00887e+ 05
A (8 750)	2.72099e+ 07	4.64544e+ 06	3.14496e+ 02
F (6 750)	1.05712e+ 06	320538	2.17004e+ 01
G (5 500)	41835.7	24535.1	1.66103
K (4 000)	60.4402	155.842	1.05505e- 02
M (2 750)	0.0011159	0.0420707	2.84819e- 06

Tabla 4.3: Emisión estelar en la banda 10 nm-205 nm, (UV-C “duro”) de ionización.

Tipo de estrella (Temperatura Promedio [K])	Radiancia espectral en 260 nm [W/m ² /sr/μm] ([1.30887e+ 18 photons/J])	Radiancia en banda (205 nm - 285 nm) [W/m ² /sr]	Flujo superficie [W/m ²]
O (45 000)	4.1419e+ 10	3.82578e+ 09	2.59005e+ 05
B (20 000)	6.72394e+ 09	5.62474e+ 08	3.80795e+ 04
A (8 750)	1.79992e+ 08	1.22854e+ 07	8.31722e+ 02
F (6 750)	2.75923e+ 07	1.75606e+ 06	1.18885e+ 02
G (5 500)	4.28063e+ 06	260854	1.76598e+ 01
K (4 000)	98378.6	5883.45	3.98309e- 01
M (2 750)	182.775	12.3423	8.35574e- 04

Tabla 4.4: Emisión en la banda 205 nm-285 nm, (UV-C “suave”) para la estructuración disipativa.

Se nota que las estrellas más calientes, de tipo O, B y A, tienen una emisión muy energética, de grandes órdenes de magnitud en ambas regiones. Comparando las tablas 4.3 y 4.4, se ve que en las estrellas tipo O y B la emisión de longitudes de onda ionizantes es varias veces mayor que la de longitudes de onda para la estructuración disipativa, por lo que quedan lejos de nuestro interés. En cambio, las estrellas tipo A presentan más del doble de emisión en longitudes de onda que promueven la estructuración disipativa que en las de ionización; sin embargo, su emisión en la región de ionización sigue siendo demasiado alta, por lo que tampoco son propicias para nuestro interés.

Por otro lado, las estrellas tipo F emiten en longitudes de onda para la estructuración disipativa casi 5 veces más intensamente que en las de ionización. Igualmente, las estrellas tipo G emiten en la banda de 205-285 nm con una intensidad 10 veces mayor que en la de 10-205 nm. Esto las hace compatibles con la estructuración disipativa para el origen y evolución de la vida, según la TDT. Además, las estrellas tipo G destacan ya que el Sol, la única estrella en la que conocemos vida, es una estrella de este tipo.

También las estrellas tipo K muestran una emisión 37 veces más intensa, en las longitudes de onda que fomentan la producción de estructuras disipativas, que en las que provocan la destrucción de las moléculas fundamentales para la vida. Aunque su pico se encuentra en el borde del visible y

su emisión en UV no es muy intensa, igualmente son candidatas para la estructuración disipativa de pigmentos UV-C y para hospedar planetas donde se pueda dar el origen de la vida como la conocemos.

Finalmente, las estrellas más frías, tipo M, no se consideran relevantes porque su emisión en las longitudes de onda de interés para la estructuración disipativa es muy poco intensa, solo 1/25000 lo que estrellas tipo G. Este hecho tiene mucha importancia para la comunidad astrobiológica porque hasta ahora sólo han enfocado su búsqueda de vida en estrellas de tipo M por la facilidad para observar las atmósferas de los planetas en estas estrellas. Los datos presentados aquí, tomados en el contexto de la teoría disipativa del origen de la vida, indican que no van a encontrar señales o firmas de vida en estas estrellas (Ver sección 4.4.2).

4.3.1. Emisión de Estrellas en UV-C

Se presentan los espectros en las gráficas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 correspondientes a cada tipo de estrella, que muestran la emisión en las regiones de UV-C “duro” y “suave”; con lo que se ilustran gráficamente los resultados presentados en las Tablas anteriores. Estas son gráficas de espectros de cuerpo negro de estrellas. Por supuesto que son aproximaciones, ningún sistema real es un cuerpo negro perfecto, pero la superficie de una estrella se acerca. Los cuerpos negros tienen emisividades = 1.

Tipo de Estrella O

Las estrellas más calientes, con una temperatura promedio superficial de 45,000 grados Kelvin. Presentan un pico intenso en la región de UV-C “duro”.

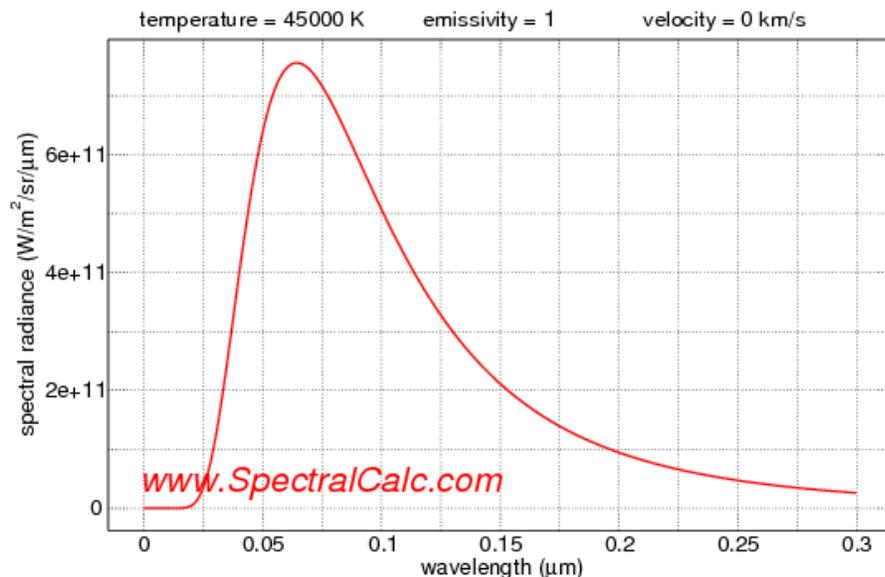


Figura 4.1: Espectros de estrellas de tipo O entre 10 nm - 285 nm.

Tipo de Estrella B

Las estrellas tipo B, igualmente muy calientes, con temperatura promedio de 20,000 grados Kelvin presentan muy fuerte emisión en la región UV-C “duro”.

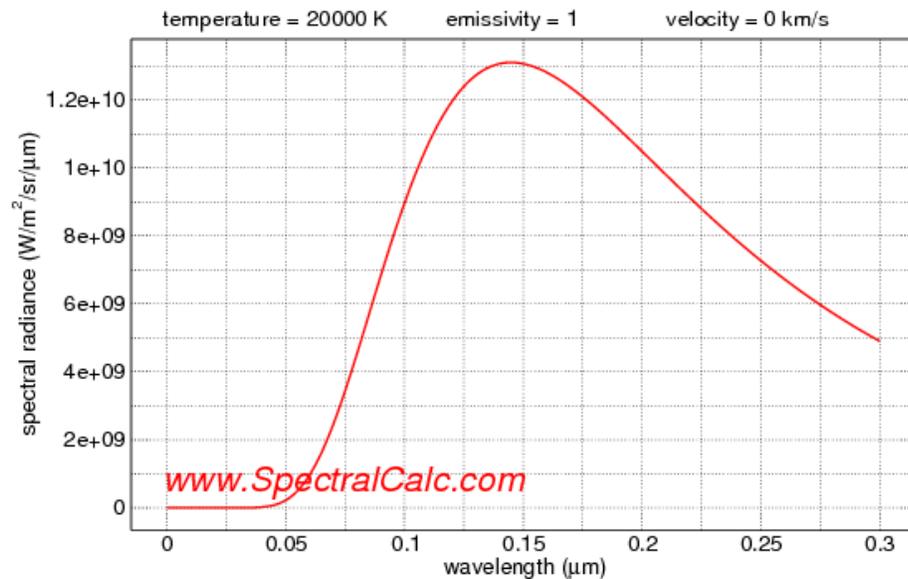


Figura 4.2: Espectros de estrellas de tipo B entre 10 nm - 285 nm.

Tipo de Estrella A

Las estrellas tipo A aunque no son tan calientes como las anteriores, con una temperatura promedio de 8,750 grados Kelvin, presentan fuerte emisión en ambas regiones UV-C “duro” y “suave”.

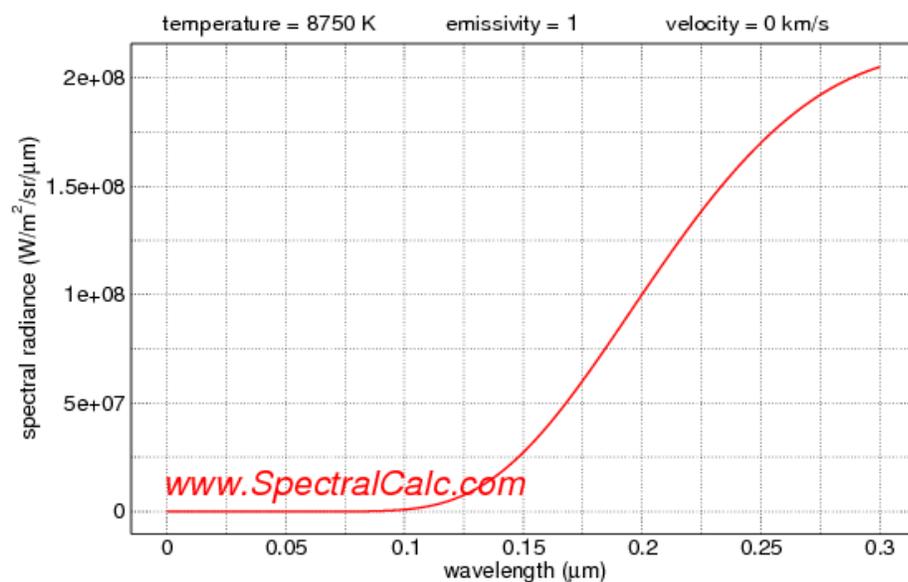


Figura 4.3: Espectros de estrellas de tipo A entre 10 nm - 285 nm.

Tipo de Estrella F

Las estrellas de tipo F, con una temperatura promedio de 6,750 grados Kelvin, siguen presentando emisión en la región de UV-C “duro” pero considerablemente inferior a la región de UV-C “suave”.

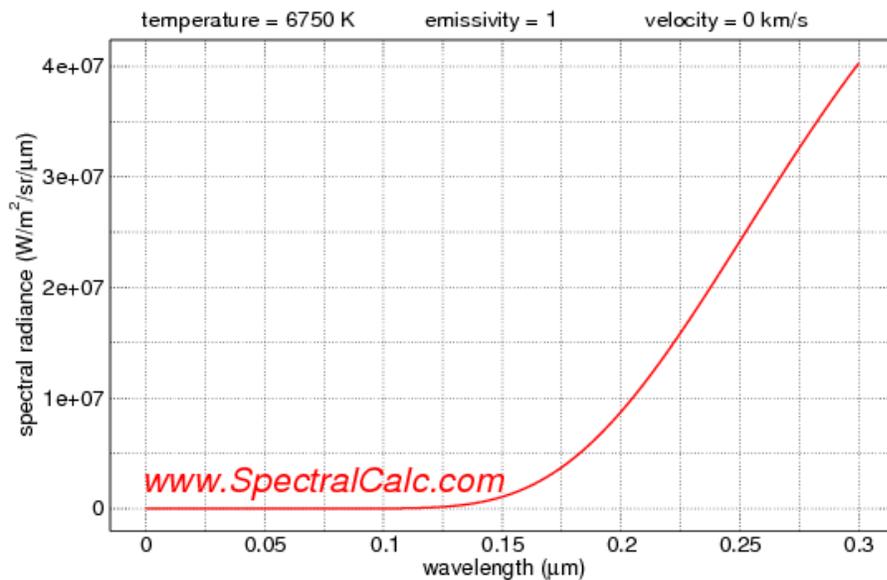


Figura 4.4: Espectros de estrellas de tipo F entre 10 nm - 285 nm.

Tipo de Estrella G

Las estrellas tipo G, como el Sol, con temperatura promedio de 5,500 grados Kelvin, presentan mucha más emisión en la región de UV-C “suave” que en la región de UV-C “duro”.

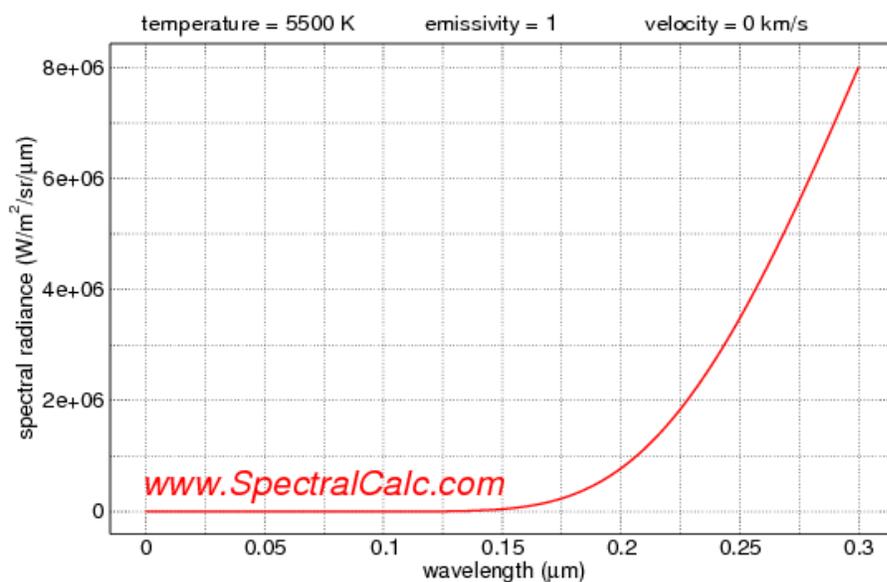


Figura 4.5: Espectros de estrellas de tipo G entre 10 nm - 285 nm.

Tipo de Estrella K

Las estrellas tipo K, con temperatura promedio de 4,000 grados Kelvin, aún presentan fuerte emisión de UV-C “suave” ya que el pico de intensidad se ha desplazado hacia longitudes de onda más largas.

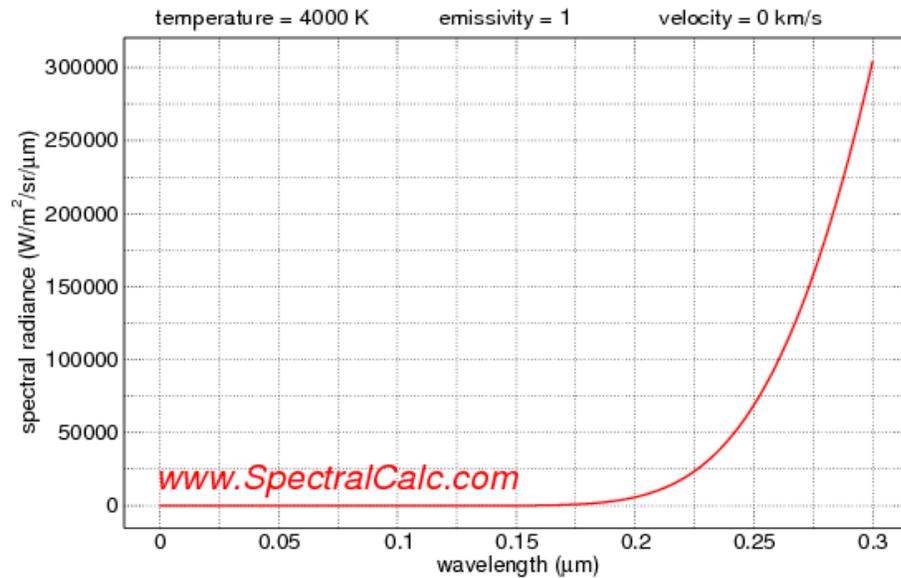


Figura 4.6: Espectros de estrellas de tipo K entre 10 nm - 285 nm.

Tipo de Estrella M

Las estrellas tipo M, las más frías, con temperatura promedio de 3000 grados Kelvin, presentan muy débil emisión en ambas regiones, UV-C “duro” y “suave”.

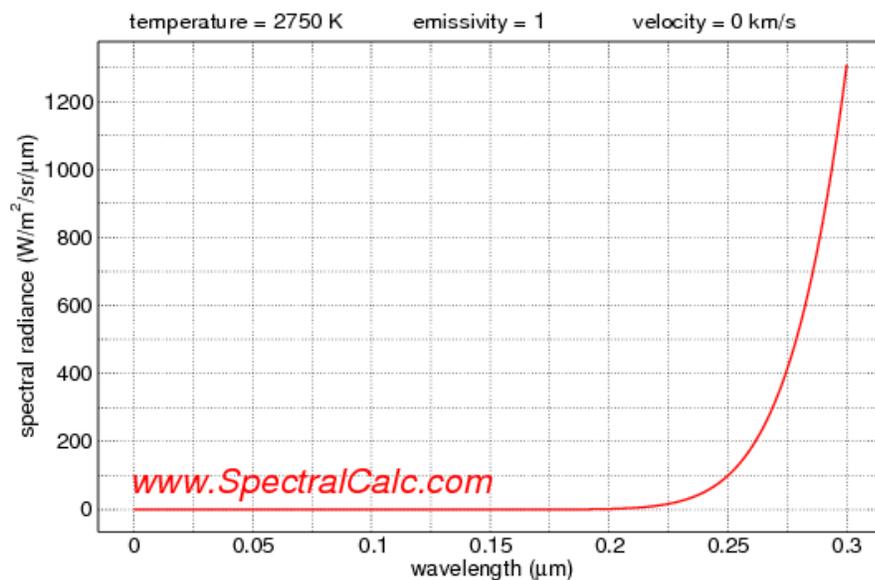


Figura 4.7: Espectros de estrellas de tipo M entre 10 nm - 285 nm.

4.3.2. Gráficas de Espectros Estelares en la Superficie de un Planeta Similar a la Tierra

Para obtener las gráficas 4.8 y 4.9 presentadas en esta sección se asume que hay planetas similares a la Tierra ubicados a una distancia óptima de sus estrellas anfitrionas, de manera que reciben un flujo de energía total equivalente al que recibe nuestro planeta. Esto implica que dichos mundos albergan en su superficie agua en sus estados líquido y gaseoso, brindando las primeras condiciones esenciales para la existencia de la vida tal como la conocemos con una atmósfera indicada.

Se utilizó un programa específico desarrollado por K. Michaelian (Michaelian, 2009b, 2010) para calcular los espectros en la superficie de los planetas. Este programa, que considera la dispersión de Rayleigh para una atmósfera dos veces más densa que nuestra atmósfera actual, con el doble de cantidad de vapor de agua, y los coeficientes de absorción dependientes de la longitud de onda para los otros gases y sus densidades (Sagan, 1973), fue utilizado para generar las gráficas. Los otros gases no absorben en esta región de longitudes de onda. Las densidades de los gases se obtuvieron comparándolas con los datos del artículo de Sagan. Una copia del programa escrito en Fortran aparece como Apéndice de esta tesis.

El objetivo de este análisis es examinar los espectros de luz que la superficie de este planeta recibiría de diferentes tipos de estrellas. Al hacerlo, se utiliza una lista de energías de ionización de algunos elementos relevantes para la vida, lo que permite evaluar si las condiciones de luz para la vida, similares a las de la Tierra, serían probables o no.

Sabemos que es suficiente un pequeño pico de UV-C “suave” para producir pigmentos estructurados disipativamente a base de carbono, también que es necesario que la superficie del planeta esté protegida de las longitudes de onda de UV-C “duro”, menores a 205 nm. El proceso para generar estas gráficas consta de dos etapas clave.

Espectros Estelares en ausencia de Atmósfera

En primer lugar, la creación de la gráfica que representa los espectros de seis distintos tipos de estrellas, en ausencia (o en la parte superior) de la atmósfera del planeta. Para esto, en el programa se establece el coeficiente de absorción molar $\mu = 0$, que en este contexto, está relacionado con los gases en la atmósfera. Al fijar este valor se indica que no hay absorción de luz por parte de ningún gas en la atmósfera, por lo que equivale a obtener el espectro de la luz estelar que se vería en la parte superior (o en ausencia) de la atmósfera, es decir el espectro de cuerpo negro a cierta temperatura como los anteriores (ver sección 4.3.1).

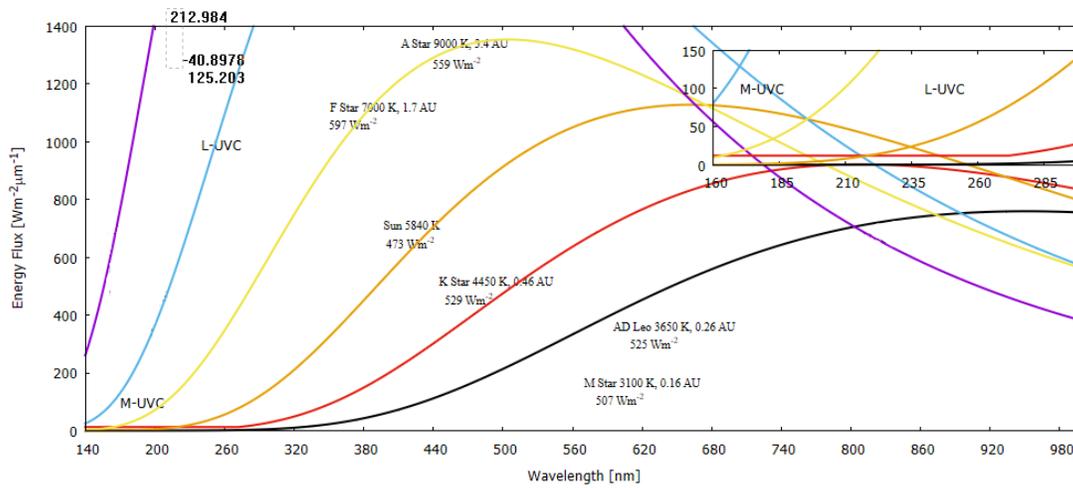


Figura 4.8: Espectros estelares en la atmósfera superior de un planeta.

Espectros Estelares en la Superficie del Planeta con Atmósfera

La siguiente parte consiste en realizar la gráfica que ilustra los espectros de los diferentes tipos de estrella en la superficie de un planeta, dentro de una atmósfera con gases en condiciones similares a las de la Tierra primigenia. Esta gráfica proporciona la información necesaria para un análisis sobre la viabilidad de las condiciones propicias para la vida en exoplanetas según su tipo de estrella anfitriona, y es de gran relevancia para investigaciones relacionadas con astrobiología y la habitabilidad en otras regiones del espacio.

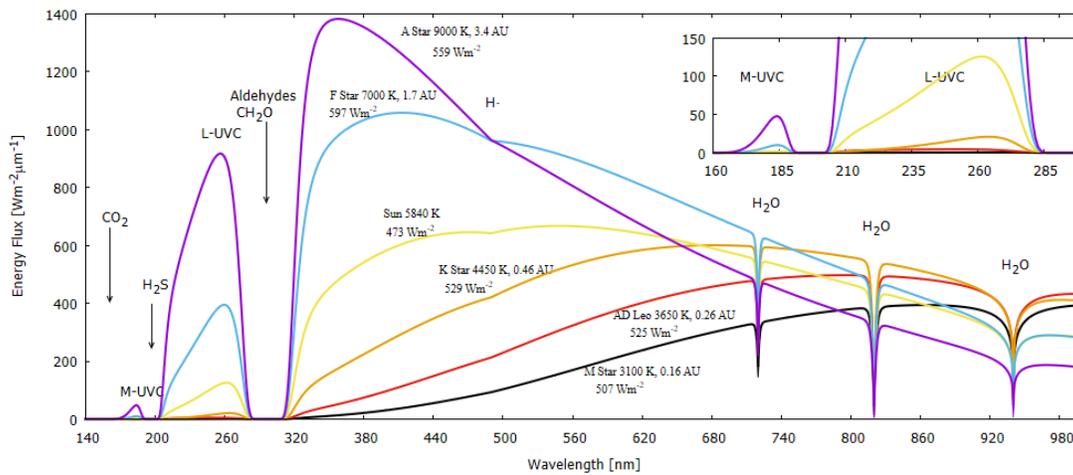


Figura 4.9: Espectros en la superficie de planeta con atmósfera similar a la de la Tierra.

Se aprecia notablemente la absorción debida a la atmósfera con agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfhídrico (H_2S) entre otros. La absorción en los gases provoca la ausencia de luz con longitudes de onda menores a 170 nm, de 190 nm a 205 nm, de 290 nm a 320 nm y líneas características de estos. Por un lado, esto asegura la producción y protección de las moléculas fundamentales de la vida, por la presencia de luz entre 210 y 290 nm de UV-C “suave” (ver figura 3.1) para su estructuración disipativa, además que todas sus energías de ionización se encuentran debajo de 170 nm (ver tabla 4.1) que han sido absorbidas. Por otro lado, la región que se encuentra

entre 170 y 190 nm es parte de la región M-UVC que es peligrosa para los enlaces covalentes de carbono porque provoca ionización.

En las estrellas de tipo A se tiene producción y destrucción de moléculas fundamentales por la emisión de M-UVC, mientras que en las estrellas tipo F, G y K que emiten en el rango UV-C “suave” y casi nada en UV-C “duro”, solamente se tiene producción. También es claro que no habrá vida como la conocemos en estrellas tipo M por la ausencia de emisión en el UV-C “suave” para la estructuración disipativa de pigmentos orgánicos.

4.4. Discusión de los resultados

4.4.1. Estrellas Candidatas Cercanas para albergar planetas con Estructuración Disipativa

Hasta el día de hoy se conocen más de 5000 planetas extra-solares. Se han descubierto planetas de todo tipo, mucho más masivos que el gigante Júpiter del Sistema Solar, hasta planetas del tamaño de la Tierra ó menos. Mientras más pequeña es la masa o radio de un planeta es más difícil detectarlo y que retenga una atmósfera.

En el método de tránsito, la luminosidad disminuye hasta 1-2 % si el planeta es gigante, por lo que requiere monitorear la intensidad luminosa durante mucho tiempo buscando atenuaciones periódicas, lo que implica mediciones muy estables que se logran con los telescopios espaciales. Este método permite conocer el radio (pero no la masa) del planeta y hacer espectroscopia de su atmósfera, lo que requiere los mejores telescopios, muchas señales y análisis de datos. Se pueden detectar moléculas y a partir de esta información espectrográfica generar modelos de atmósfera, clima, nubosidad, entre otros factores.

Por otro lado, el método de velocidad radial nos permite conocer su masa pero no su radio. Este método permite detectar planetas masivos (gaseosos gigantes) cerca de su estrella. Si se logra observar un planeta con ambos métodos se pueden conocer a detalle sus propiedades internas.

El método de imagen directa se diferencia de los anteriores que infieren la existencia de un planeta y sus propiedades a partir de su influencia en la luz de su estrella pero no detectan la propia emisión de luz del planeta. En contraste, este método observa el planeta directamente, ya sea por la luz que refleja de su estrella ó por la luz emitida térmicamente por el planeta. Permite la detección de planetas, la caracterización espectroscópica de sus atmósferas y hace posible una determinación completa de sus características orbitales por astrometría. Es la única técnica con la que se puede realizar la combinación de detección, caracterización espectroscópica y determinación de características orbitales. Por este método se han observado 82 exoplanetas (NASA Exoplanet Archive, 2024b).

Los instrumentos para la imagen directa deben separar la luz del exoplaneta de la de su estrella a pesar de ser mucho más tenue. Para exoplanetas similares a la Tierra es complicado por la pequeña proporción de contraste del flujo planeta-estrella en las longitudes de onda visibles y la pequeña separación entre ambos. Para esto se implementan coronógrafos y ocultadores externos. Tomar la imagen directa de un planeta habitable es por definición difícil ya que deberían ser relativamente chicos, fríos y cercanos a su estrella (lo que permite que sean habitables) como la Tierra.

Los métodos actuales son capaces de determinar, sobre todo, la masa o el tamaño del plane-

ta, pero es necesario poderlos diferenciar más detalladamente para lograr inferir su similitud con la Tierra (océanos, continentes, atmósfera adecuada). En otro caso podríamos detectar un planeta como Venus muy similar y cercano a la Tierra, pero con un efecto invernadero extremo y temperaturas demasiado altas para albergar vida.

Nuestro Sol es una estrella entre miles de millones que forman la Vía Láctea que solo es una galaxia en el Universo observable. Dado el abismal abanico de posibilidades nos preguntamos cuántos más planetas como la Tierra puede haber en el espacio. La gran variedad de sistemas extra-solares que pueden existir es fascinante y prometedora, podría detectarse cualquier tipo de planeta mientras obedezca las leyes de la física, evidentemente. Sin embargo, entre todos los sistemas planetarios detectados, ninguno se asemeja demasiado al Sistema Solar. Con las técnicas actuales sigue siendo complicado detectar este tipo de sistema planetario.

Las propiedades que conocemos de los planetas extra-solares que se han detectado corresponden a la capacidad que tenemos para descubrirlos. Hay planetas y propiedades que aún no podemos observar por retos técnicos y tecnológicos. En este sentido, los planetas similares a los del Sistema Solar aún se encuentran en la categoría de indetectables por su periodo orbital y su radio. Pero, es posible encontrar “súper Tierras” cuyo radio es mayor al de la Tierra, planetas gigantes y planetas calientes.

Identificamos las estrellas de tipo F, G y K como las candidatas más prometedoras para albergar planetas con condiciones adecuadas para la estructuración disipativa de moléculas orgánicas. En el sitio abierto (NASA Exoplanet Archive, 2024a), encontramos la base de datos de exoplanetas confirmados, en la que podemos filtrar las estrellas de tipo F, G y K cercanas, a menos de 100 años luz, con planetas de masa menor a la de Júpiter y mayor a la de Marte .

Nombre(Estrella)	Planetas	Método	Tipo Estrella	T Efectiva [K]	Masa[M_{\odot}]	Distancia[ly]
GJ 143	2	Transito	K4.5	4640.0	0.73	53.24
GJ 9827	3	Transito	K6 V	4219.0	0.64	96.754
HD 207496	1	Transito	K2.5 V	4819.0	0.8	77.003
HD 207897	1	Transito	K0 V	5070.0	0.8	92.294
HD 97658	1	V Radial	K1	5170.0	0.77	70.334
TOI-2018	1	Transito	K V	4174.0	0.57	91.3216
TOI-2134	2	Transito	K5 V	4580.0	0.74	73.787
TOI-836	2	Transito	K V	4552.0	0.68	89.7128
HD 39091	3	Transito	G0 V	6037.0	1.09	59.597

Tabla 4.5: Estrellas similares cercanas con planetas detectados

Encontramos nueve estrellas diferentes, con al menos un exoplaneta detectado, que deben ser estudiados en caso de lograr obtener datos sobre sus atmósferas. Estas estrellas deben ser el blanco de futuras observaciones e investigaciones en la búsqueda de vida similar a la de la Tierra. Los planetas rocosos son los más prometedores ya que la superficie solida brinda un entorno donde el agua, los minerales, la atmósfera y la energía estelar interactúan. Se deben observar sus atmósferas en busca de indicadores de habitabilidad o de alteraciones causadas por la presencia de vida, como vapor de agua, oxígeno, metano u ozono.

Caracterizar las atmósferas de estos planetas es un paso esencial para comprender la demografía de planetas extrasolares, las posibles señales de vida y para refinar el cálculo del espectro de luz

en la superficie de otros planetas (ver figura 4.9). Consiste principalmente en detectar especies de gas molecular y nubes en la atmósfera, determinando su abundancia y restringiendo la presión y temperatura superficial del planeta con lo que se infiere su composición. Los dos requisitos mínimos para esto es lograr detectar los gases bio-firmas con espectroscopia remota y obtener una muestra significativa de planetas.

Los retos técnicos y tecnológicos que se encuentran en esta dirección, se deben principalmente a la resolución de los telescopios que deben cumplir tres métricas esenciales en su sensibilidad para poder detectar atmósferas directamente. Deben ser suficientemente grandes para obtener espectros de baja resolución de un exoplaneta, con una buena proporción de señal a ruido en longitudes de onda características de los gases bio-señales. Deben ser capaces de observar los planetas en la zona habitable de la estrella, que puede ocupar una zona diminuta cercana a la estrella. Los instrumentos deben ser capaces de suprimir o ignorar el brillo deslumbrante de la estrella huésped, lo que requiere mucha estabilidad (inalcanzable en la Tierra). Solo los telescopios espaciales alcanzan la sensibilidad, resolución y estabilidad requeridas.

El telescopio espacial James Webb (JWST) puede desempeñar un papel crucial en la investigación de la composición de las atmósferas de exoplanetas. Gracias a su avanzado instrumental, como el espectrógrafo NIRSpec y la cámara NIRCам, el JWST puede realizar observaciones espectroscópicas en el infrarrojo cercano, lo que permite detectar la presencia de moléculas clave, como agua (H_2O), metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y ozono (O_3), entre otras. Estas observaciones son fundamentales para estudiar la habitabilidad de exoplanetas y la posibilidad de encontrar firmas biológicas.

Hasta la fecha, el JWST ha realizado observaciones reveladoras de WASP-39b, un exoplaneta gigante gaseoso. Estas observaciones han confirmado la presencia de dióxido de carbono en su atmósfera, algo que no había sido posible con telescopios anteriores. Este avance supone un gran paso hacia la caracterización atmosférica de exoplanetas más pequeños y posiblemente habitables (Team, 2023).

Otro caso importante es el sistema TRAPPIST-1, donde el JWST ha observado al exoplaneta TRAPPIST-1c, un planeta rocoso similar a la Tierra. Utilizando la técnica de fotometría de eclipses secundarios, el equipo pudo medir la temperatura del planeta, lo que permitió inferir que probablemente carece de una atmósfera significativa, ya que los resultados sugieren una superficie compuesta de roca desnuda (Zieba, Kreidberg, Ducrot, y cols., 2023). El JWST también ha observado otros planetas como TRAPPIST-1e, un mundo rocoso en la zona habitable de su estrella, donde se espera obtener información detallada sobre la posible presencia de agua y otras moléculas que indiquen un ambiente adecuado para la vida.

Estos descubrimientos destacan la capacidad del JWST para estudiar las atmósferas exoplanetarias, proporcionando una ventana a la habitabilidad y evolución atmosférica de estos mundos. Estos resultados son esenciales para la comprensión de planetas fuera de nuestro sistema solar y la búsqueda de vida.

4.4.2. Estructuración Disipativa de la Vida en Marte

Probablemente la atmósfera temprana de Marte contenía azufre e hidrógeno debido a la esperada mayor actividad volcánica en el joven planeta. La presencia de H_2S podría haber proporcionado cierta protección contra la radiación UV-C de longitud de onda corta. El metano habría tenido

una vida corta en la atmósfera superior, transformándose fotoquímicamente con N_2 en cianuro de hidrógeno (HCN) y cianógeno ($NCCN$) debido a los fotones UV-C de longitud de onda corta en la atmósfera alta (Dodonova, 1966; Mahaffy y cols., 2012).

La estructuración disipativa de adenina (y otras bases) es fuertemente dependiente de la temperatura (Michaelian, 2021). Es necesaria la presencia de agua líquida para la formación de vida, y parece haber evidencia de esta en Marte durante al menos 500 millones de años después de su formación. Un escudo magnético también es necesario para proteger las moléculas de las partículas ionizantes. El campo magnético de Marte se apagó hace aproximadamente 3.7 mil millones de años. Marte pudo haber tenido un núcleo líquido durante unos 500 millones de años, dependiendo de la cantidad del metal sodio presente en su interior (Franz, King, y Gaillard, 2019).

Aunque se podrían haber producido pigmentos y complejos, el proceso de selección UVTAR para el ADN o ARN requiere altas temperaturas para la desnaturalización sin enzimas del ADN y ARN (80°C y 45°C , respectivamente), lo cual era poco probable en Marte por su distancia al Sol. Las presiones de la protoatmósfera resultante son difíciles de determinar. Las presiones atmosféricas afectarían la cantidad de luz UV-C que llega a la superficie de Marte (Franz y cols., 2019).

Nuestra teoría sugiere tres primeras etapas en la formación de la vida:

- 1) Pigmentos orgánicos (Michaelian, 2024),
- 2) Asociación de pigmentos orgánicos con moléculas antena, como ADN y aminoácidos (Mejía Morales y Michaelian, 2020), y
- 3) UVTAR (Michaelian y Santillan, 2019).

El Dr. Serguei M. Pershin, investigador principal del experimento LIDAR del NASA Mars Polar Lander, afirma haber descubierto pigmentos orgánicos en Marte relacionados con organismos fotosintéticos antiguos. Los pigmentos que el Dr. Pershin podría haber encontrado son porfirinas derivadas de la clorofila y hopanoides de carotenoides, que se encuentran en depósitos sedimentarios de 3.5 mil millones de años, aunque estos resultados aún no han sido confirmados (DiGregorio, 2000).

Además de la radiación ionizante, la intensa radiación ultravioleta que atraviesa la delgada atmósfera de Marte produce una abundancia de iones de oxígeno en la superficie marciana, que destruye moléculas orgánicas, los bloques fundamentales de la vida, según los investigadores del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA en Pasadena, California (Hardin, 2000).

Los científicos han utilizado un instrumento innovador llamado “Escaneo de Entornos Habitables con Raman y Luminiscencia para Orgánicos y Químicos” (SHERLOC) para mapear la distribución de moléculas orgánicas y minerales en superficies rocosas. SHERLOC emplea espectroscopía Raman y fluorescencia ultravioleta profunda para medir simultáneamente la dispersión Raman débil y las emisiones de fluorescencia fuertes, proporcionando información crucial sobre la composición orgánica de Marte. SHERLOC ha analizado 3 superficies naturales y 5 áreas de roca erosionada en el cráter Jezero, identificando fosfatos, silicatos amorfos, olivino, sulfatos y carbonatos. Estas detecciones revelan la historia de este cráter cuando estaba lleno de agua líquida hace más de 3 mil millones de años. Además, SHERLOC ha detectado firmas de fluorescencia que corresponden a orgánicos aromáticos nativos de las rocas, con distribuciones espaciales que sugieren polvo planetario o colocalización con diferentes minerales. Estos hallazgos son un avance importante en la exploración del Planeta Rojo y preparan el terreno para investigaciones futuras sobre la posibilidad de vida extraterrestre. (Bhartia, Beegle, DeFlores, y cols., 2021; University of Florida, 2023; Beegle y cols., 2022).

Eigenbrode et al. reportan datos de SAM (Sample Analysis at Mars) que proporcionan evidencia concluyente de la presencia de compuestos orgánicos—compuestos tiofénicos, aromáticos y alifáticos—en muestras de perforación del cráter Gale de Marte. En un artículo relacionado, Webster et al. reportan una fuerte variación estacional del metano atmosférico, la molécula orgánica más simple, en la atmósfera marciana (ten Kate, 2018; Eigenbrode y cols., 2018; Webster y cols., 2018).

Diversos productos de pirólisis, incluidos compuestos tiofénicos, aromáticos y alifáticos liberados a altas temperaturas (500° a 820°C), fueron detectados directamente mediante el análisis de gases desprendidos. También se observaron tiofenos mediante cromatografía de gases y espectrometría de masas. Su presencia sugiere que la sulfuración ayudó a la preservación de la materia orgánica (Eigenbrode y cols., 2018).

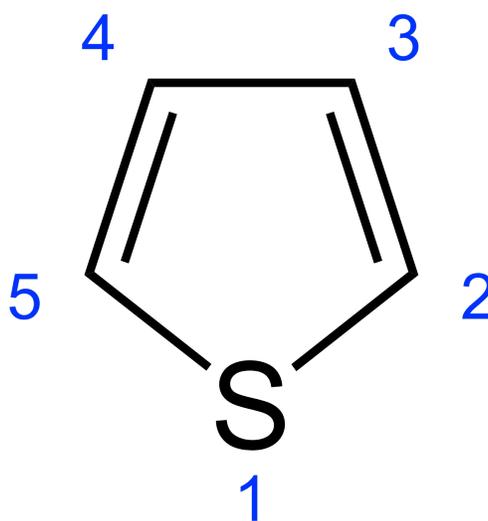


Figura 4.10: Fórmula esquelética de la molécula de tiofeno, un heterociclo aromático de cinco miembros con cuatro carbonos y un azufre. Se muestra la convención de numeración para los derivados (por ejemplo, ácido 3-tiofeno acético). Esta molécula absorbe en el UV-C “suave” (Ver Fig.4.11)

Derivados de tiofeno han sido detectados en niveles de nanomoles en sedimentos marcianos de 3.5 mil millones de años por el rover Curiosity en el cráter Gale, lo que representa un hito importante en la búsqueda de materia orgánica en Marte (Voosen, 2018). El análisis de muestras mediante cromatografía de gases-espectrometría de masas reveló la presencia de moléculas aromáticas y alifáticas, incluidos compuestos de tiofeno (Eigenbrode y cols., 2018). Se estima que el 5% de las moléculas orgánicas contienen azufre, planteando la posibilidad de una firma biológica antigua (Heinz y Schulze-Makuch, 2020). Futuros análisis, como los que llevará a cabo el rover Rosalind Franklin, ayudarán a esclarecer si estas moléculas tienen un origen biológico (CNN, 2020; Wikipedia contributors, 2024).

El tiofeno tiene una intersección cónica para la disipación, implicándolo como un buen candidato para la estructuración disipativa de pigmentos orgánicos en el UV-C en la superficie de Marte (Ver Fig.4.11)(Wu y cols., 2010).

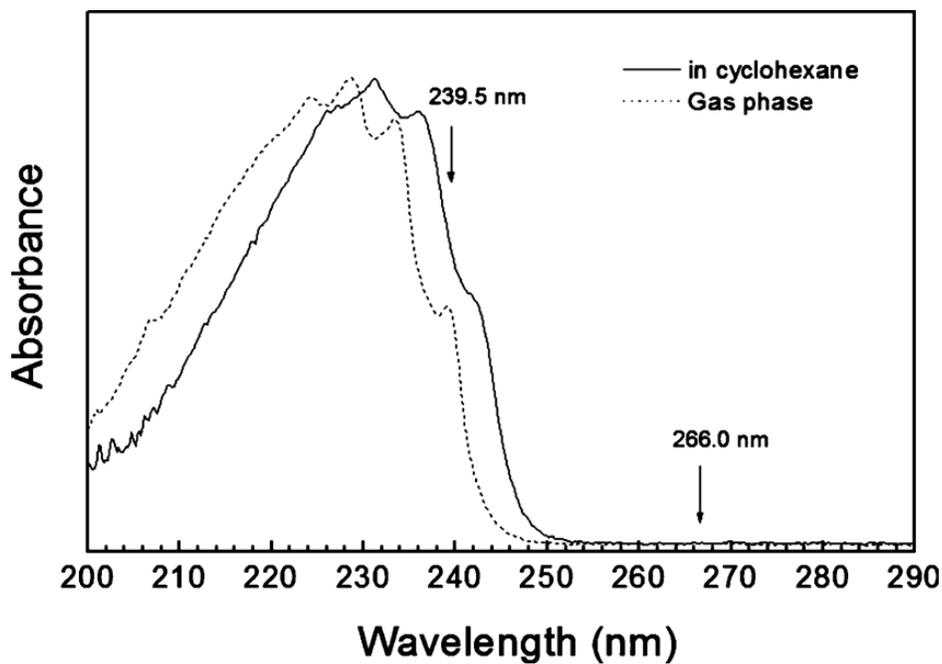


Figura 4.11: Espectros UV del tiofeno en fase gaseosa (línea de puntos) y en solución de ciclohexano (línea sólida). Se muestran las longitudes de onda de excitación empleadas para los experimentos de resonancia de Raman por encima de los espectros.

En resumen, la vida en Marte probablemente solo llegó a las etapas uno o dos de nuestra teoría, pero probablemente no avanzó hasta la etapa tres (es decir, estructuración de pigmentos orgánicos y sus compuestos, pero sin formación de ácidos nucleicos).

Capítulo 5

Discusión y Conclusiones

5.1. Implicaciones de los Tipos de Estrellas en la Búsqueda de Vida en Exoplanetas

Este trabajo culmina con la selección de estrellas candidatas para albergar planetas con condiciones adecuadas para la vida. Se realizó un análisis basado en la emisión estelar en diferentes regiones del espectro UV-C para evaluar la habitabilidad de estos mundos distantes.

Se analizó la emisión de las estrellas en la región de UV-C “suave”, que es crucial para la estructuración disipativa deseada, y en longitudes de onda menores del UV-C “duro”, que son perjudiciales para las moléculas fundamentales por la ionización no deseada. Igualmente, se graficaron sus espectros y finalmente se obtuvieron también algunos de estos espectros en la superficie de un planeta sin atmósfera y con una atmósfera similar a la de la Tierra en el origen de la vida.

Se analizaron detalladamente las condiciones espectrales y los flujos de luz para clasificarlas según su compatibilidad con la estructuración disipativa de las moléculas fundamentales de la vida. Se puede notar la emisión significativa en longitudes de onda ionizantes, en el rango perjudicial de longitudes de onda menores a 205 nm del UV-C, por lo que se descartan las estrellas más calientes de tipo O, B y A.

Esto plantea interrogantes sobre la habitabilidad de los planetas que orbitan estas estrellas y sugiere que deberíamos considerar otros tipos de estrellas debido a la alta emisión de radiación debajo de 205 nm, se vuelve claro que su radiación de UV-C “duro” supera ampliamente los niveles seguros para las moléculas fundamentales de la vida. Esto sugiere que incluso el agua (en cualquier forma) tendría dificultades para existir en los planetas que orbitan estas estrellas.

En este punto, se destaca de manera esencial el papel del agua en la habitabilidad de un planeta. El agua, en sus estados líquido y gaseoso, es fundamental para la vida tal como la conocemos. La existencia de agua líquida en la superficie de un planeta es un requisito previo para la formación y evolución de la vida. Dado que la vida en la Tierra se basa en el carbono con sus interacciones covalentes en un entorno de disolvente acuoso y moléculas como el RNA y el DNA, la presencia de agua se convierte en un factor crítico para determinar su compatibilidad con la TDT.

En contraste, las estrellas de tipo F, G y K emergen como candidatas más prometedoras. Estas estrellas emiten más intensamente en longitudes de onda que favorecen la estructuración disipativa

de moléculas fundamentales para la vida, en lugar de ionizarlas. A pesar de que aún tienen una emisión significativa en la región de ionización, esta es mucho menor que la de sus contrapartes más calientes. Por lo tanto, es más probable que los planetas que orbitan estrellas de tipo F, G y K alberguen condiciones adecuadas para la estructuración disipativa de los primeros pigmentos orgánicos fundamentales para la vida, mientras cuentan con una atmósfera indicada para absorber las longitudes de onda ionizantes y mantenga la superficie protegida.

Las estrellas tipo M, las más frías, con una temperatura promedio de 3000 grados Kelvin, presentan una emisión muy débil en ambas regiones del UV-C, tanto "duro" como "suave". Este bajo nivel de emisión es insuficiente para la estructuración disipativa de pigmentos orgánicos. Por este motivo, aunque las estrellas tipo M han sido objeto de interés en la búsqueda de vida debido a la facilidad para observar las atmósferas de los planetas que las orbitan, los datos presentados aquí sugieren que es improbable encontrar señales o firmas de vida en estos entornos bajo la teoría disipativa del origen de la vida.

La discusión se extiende para establecer criterios más precisos en la búsqueda de vida en exoplanetas. Más allá de la presencia de agua, es crucial que la proporción de radiación recibida y emitida por el planeta se asemeje a la de la Tierra. Esto asegura que se cumplan las condiciones necesarias para la existencia de agua en estado líquido y gaseoso, esenciales para la evolución de la vida y una atmósfera dinámica.

Se hace referencia a las moléculas que sabemos que están asociadas con la vida en la Tierra al hablar de la búsqueda de firmas biológicas en las atmósferas de exoplanetas. Se pueden detectar desde lejos usando espectroscopia, midiendo la variación en la intensidad de la luz de su estrella anfitriona en algunas longitudes de onda, durante un tránsito. Diferentes tipos de moléculas absorben luz en longitudes de onda características, por lo que observar que la intensidad disminuye en ciertas longitudes de onda indica la presencia de una sustancia determinada.

Se explica cómo la tasa de producción de entropía se propone como una biosignatura para detectar vida en exoplanetas a partir de la dinámica y el equilibrio químico de su atmósfera. Esta medida ofrece una perspectiva única para identificar indicios de vida y podría ser una de las pistas que los científicos deberían seguir al analizar exoplanetas en busca de señales de vida.

Si los resultados indican que una estrella y su planeta tienen condiciones adecuadas para la vida, se podría motivar el desarrollo de misiones espaciales destinadas a estudiar más a fondo esos sistemas estelares y planetarios. Se enfatiza la relevancia de considerar tipos específicos de estrellas para concentrar los esfuerzos en la búsqueda de vida y se insta a futuras investigaciones, colaboraciones en este campo de estudio apasionante a tomar en cuenta la utilidad de la TDT.

La búsqueda de vida en el espacio continúa siendo un objetivo fundamental y emocionante, y estos hallazgos abren nuevas posibilidades en la exploración de exoplanetas en busca de vida. Para esto, es importante colaborar con otros científicos y equipos de investigación en el campo de la astrobiología, la exploración espacial y la búsqueda de exoplanetas habitables, especialmente aquellos involucrados en la misión del telescopio James Webb.

Se enfatiza la relevancia de compartir los datos y teorías presentados en este estudio para influir en la dirección de la búsqueda de vida en el espacio. También, la importancia de considerar la termodinámica de la estructuración disipativa como un enfoque clave para la búsqueda de biosignaturas se subraya.

Se exploran los desafíos que enfrentan los científicos al analizar las atmósferas de exoplanetas. La

complejidad de estudiar atmósferas en frente de estrellas muy brillantes se señala como un obstáculo significativo. A pesar de estos desafíos, la comunidad científica está ansiosa por aprovechar las capacidades de estudiar y resolver espectros del Telescopio Espacial James Webb para obtener una visión más clara de los exoplanetas y sus atmósferas.

5.2. Conclusiones

Las conclusiones de nuestra investigación se presentan a continuación, igualmente destacamos las implicaciones y claves a seguir:

1. La formación de estrellas y sistemas planetarios parece ser un proceso independiente de la temperatura estelar o su clasificación. Esto sugiere que es posible que cualquier estrella (de tipo F, G o K) tenga un sistema planetario y al menos un planeta en su zona habitable. El próximo paso en esta investigación es identificar las biosignaturas específicas en planetas que orbitan estas estrellas candidatas.

2. Las estrellas más calientes (O, B, A) emiten longitudes de onda ionizantes del UV-C, mientras que las estrellas de temperatura intermedia (F, G, K) emiten en la región favorable para la estructuración disipativa. Por lo tanto, las estrellas candidatas para la estructuración disipativa son de tipo F, G y K. También se descartan las estrellas tipo M por ausencia de emisión en esta región.

Esta tesis representa el inicio de un proceso continuo de investigación en este campo. Los resultados y conclusiones proporcionados aquí son fundamentales para futuras investigaciones sobre la búsqueda de vida en otros planetas.

Referencias

- Beegle, L. W., Bhartia, R., DeFlores, L., Abbey, W., Asher, S., Berger, E. L., ... Yingst, R. A. (2022, July). SHERLOC: Results of the first 350 sols of operations. En *Cospar 2022 - 44th scientific assembly*. Athens, Greece: NASA Johnson Space Center. Descargado de <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220002605> (Public distribution)
- Bhartia, R., Beegle, L. W., DeFlores, L., y cols. (2021). Perseverance's scanning habitable environments with raman and luminescence for organics and chemicals (sherloc) investigation. *Space Science Reviews*, 217(58). doi: 10.1007/s11214-021-00812-z
- Boulanger, E., Anoop, A., Nachtigalova, D., Thiel, W., y Barbatti, M. (2013). Photochemical steps in the prebiotic synthesis of purine precursors from hcn. *Angewandte Chemie International Edition*, 52, 8000–8003. doi: 10.1002/anie.201303246
- Callen, H. B. (1960). *Thermodynamics and an introduction to thermostatistics* (2.^a ed.). Wiley.
- Chaplin, M. (2016). Water structure and science. , 6201. (Available online: <https://water.lsbu.ac.uk/water> (accessed on 21 September 2023))
- Close, D. M. (2011). Calculated vertical ionization energies of the common -amino acids in the gas phase and in solution. *J. Phys. Chem. A*, 115(13), 2900–2912. Descargado de <https://doi.org/10.1021/jp200503z> doi: 10.1021/jp200503z
- CNN. (2020). *The curiosity rover found organic molecules on mars. this is why they're exciting.* <https://www.cnn.com/2020/03/06/world/curiosity-rover-mars-organic-molecules-scni/index.html>. (Accessed: 2024-09-04)
- de Vera, P., Abril, I., y Garcia-Molina, R. (2021). Excitation and ionisation cross-sections in condensed-phase biomaterials by electrons down to very low energy: application to liquid water and genetic building blocks. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 23, 5079–5095. Descargado de <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/cp/d0cp04951d#cit50> doi: 10.1039/D0CP04951D
- DiGregorio, B. E. (2000). *Russian scientist finds organic pigments on mars.* Online Article. 859 Willamette Street, Eugene, OR 97401, USA: Spectroscopy Magazine. Descargado de <https://www.icamsr.org/specmag220900.html> (Posted: 23:30 am EST, 22 September 2000)
- Dodonova, N. Y. (1966). Activation of nitrogen by vacuum ultraviolet radiation. *Russian Journal of Physical Chemistry, USSR*, 40(5), 523.
- Eigenbrode, J. L., y cols. (2018). Organic matter preserved in 3-billion-year-old mudstones at gale crater, mars. *Science*, 360(6393), 1096–1101. doi: 10.1126/science.aas9185
- Fang, X., y Wang, J. (2020). Nonequilibrium thermodynamics in cell biology: Extending equilibrium formalism to cover living systems. *Annu. Rev. Biophys.*, 49, 227–246.
- Ferris, J. P., y Orgel, L. E. (1966). An unusual adenine synthesis. *Journal of the American Chemical Society*, 88(5), 1074–1078. Descargado de <https://doi.org/10.1021/ja00957a050> doi: 10.1021/ja00957a050
- Franz, H. B., King, P. L., y Gaillard, F. (2019). Chapter 6 - sulfur on mars from the atmosphere to the core. En J. Filiberto y S. P. Schwenzer (Eds.), *Volatiles in the martian crust* (p. 119–183). Elsevier. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128041918000064> doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804191-8.00006-4>
- French, K., Hallmann, C., Hope, J., Schoon, P., Zumberge, J., Hoshino, Y., ... et al. (2015). Reappraisal of hydrocarbon biomarkers in archean rocks. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 112, 5915–5920.

- García Colin, L. (1990). *Introducción a la termodinámica clásica* (4.^a ed.). Editorial Trillas. (Reimpresión en 2012)
- Gates, D. (1980). *Biophysical ecology*. Springer: Berlin, Germany.
- GATS. (2022). *Spectral calculator*. Descargado de <https://www.spectralcalc.com> (Consulta realizada en enero 2022)
- Gilbert, W. (1986). The rna world. *Nature*, 319(618.).
- Hardin, M. (2000, 14 de September). *Experiment shows mars needs to take antioxidants for life*. Online Article. Pasadena, CA, USA: NASA Jet Propulsion Laboratory. Descargado de <https://www.jpl.nasa.gov/news/experiment-shows-mars-needs-to-take-antioxidants-for-life> (News Release: 2000-093)
- Heinz, J., y Schulze-Makuch, D. (2020). Thiophenes on mars: Biotic or abiotic origin? *Astrobiology*, 20(4), 552–561. doi: 10.1089/ast.2019.2139
- Herrera, M. (2001). *Biofísica, geofísica, astrofísica para qué sirve la física*. México: Fondo de Cultura Económica (FCE).
- Improta, R., y Douki, T. (Eds.). (2021). *Dna photodamage: From light absorption to cellular responses and skin cancer*. United Kingdom: Royal Society of Chemistry. (Chapter 3: DNA Photoionization: From High to low energies, by E. Balanikas and D. Markovitsi)
- Karam, P. (2003). Inconstant sun: how solar evolution has affected cosmic and ultraviolet radiation exposure over the history of life on earth. *Health Phys.*, 84, 322–333.
- Katsumata, S. (2005). A heI photoelectron spectroscopic study of polyunsaturated fatty acids. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 142(3), 265–269. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0368204804003676> (Modern Electron Spectroscopy of Atoms and Molecules. A collection of invited papers dedicated to Professor Katsumi Kimura in recognition of an esteemed research career spanning a 50-year period.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.elspec.2004.09.009>
- Kauffman, S. (1971). Cellular homeostasis, epigenesis and replication in randomly aggregated macromolecular systems. *J. Cybern.*, 1, 71–96.
- Kleidon, A. (2008). Entropy production by evapotranspiration and its geographic variation. *Soil Water Res.*, 3, S89–S94.
- Mahaffy, P. R., Webster, C. R., Cabane, M., y cols. (2012). The sample analysis at mars investigation and instrument suite. *Space Science Reviews*, 170, 401–478. doi: 10.1007/s11214-012-9879-z
- Martin, W., Baross, J., Kelley, D., y Russell, M. (2008). Hydrothermal vents and the origin of life. *Nat. Rev. Microbiol.*, 6, 805–814.
- Mejía Morales, J., y Michaelian, K. (2020). Photon dissipation as the origin of information encoding in rna and dna. *Entropy*, 22, 940.
- Michaelian, K. (2005). Thermodynamic stability of ecosystems. *Journal of Theoretical Biology*, 237(3), 323–335. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022519305001839> doi: 10.1016/j.jtbi.2005.04.019
- Michaelian, K. (2009a). Thermodynamic origin of life. *arXiv*. doi: arXiv:physics.gen-ph/0907.0042.
- Michaelian, K. (2009b, 06). Thermodynamic origin of life. *Earth System Dynamics Discussions*, 1. doi: 10.5194/esdd-1-1-2010
- Michaelian, K. (2010, 10). Homochirality through photon-induced melting of rna/dna: the thermodynamic dissipation theory of the origin of life. *Nature Precedings*, 5. doi: 10.1038/npre.2010.5177.1

- Michaelian, K. (2011). Thermodynamic dissipation theory for the origin of life. *Earth Syst. Dyn.*, *224*, 37–51.
- Michaelian, K. (2012a). Biological catalysis of the hydrological cycle: Lifes thermodynamic function. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, *16*, 2629–2645.
- Michaelian, K. (2012b). The biosphere; chapter 3, the biosphere: A thermodynamic imperative. *INTECH: London, UK*, *46*, 51–60.
- Michaelian, K. (2016). *Thermodynamic dissipation theory of the origina and evolution of life: Salient characteristics of rna and dna and other fundamental molecules suggest an origin of life driven by uv-c light* (ISBN 9781541317482. ed.). Self-published, CreateSpace: Mexico City, Mexico.
- Michaelian, K. (2017). Microscopic dissipative structuring and proliferation at the origin of life. *Heliyon*, *3*. doi: e00424
- Michaelian, K. (2021). The dissipative photochemical origin of life: Uvc abiogenesis of adenine. *Entropy*, *23*, 217.
- Michaelian, K. (2022). Non-equilibrium thermodynamic foundations of the origin of life. *Foundations*, *2*, 308–337. doi: <https://doi.org/10.3390/foundations2010022>
- Michaelian, K. (2023). The non-equilibrium thermodynamics of natural selection: From molecules to the biosphere. *Entropy*, *25*, 1059.
- Michaelian, K. (2024). *The pigment world*. Descargado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5647473/> (Department of Nuclear Physics and Application of Radiation, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Interior de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, C.P. 04510.; karo@fisica.unam.mx. Academic Editor: Version June 7, 2024 submitted to Life. © 2024 by the authors. Submitted to Life for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
- Michaelian, K., y Cano Mateo, R. (2022). A photon force and flow for dissipative structuring: Application to pigments, plants and ecosystems. *Entropy*, *24*, 76.
- Michaelian, K., y Santillan, N. (2019). Uvc photon-induced denaturing of dna: A possible dissipative route to archaean enzyme-less replication. *Heliyon*, *5*. doi: e01902
- Michaelian, K., y Simeonov, A. (2015). Fundamental molecules of life are pigments which arose and co-evolved as a response to the thermodynamic imperative of dissipating the prevailing solar spectrum. *Biogeosciences*, *12*, 4913–4937.
- Miller, S. (1953). A production of amino acids under possible primitive earth conditions. *Science*, *117*, 528–529.
- Miller, S., y Urey, H. (1959). Origin of organic compounds on the primitive earth and in meteorites. *Science*, *130*, 245.
- NASA Exoplanet Archive. (2024a). *Nasa exoplanet archive*. Descargado de <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html> (Consulta realizada el 17 de Febrero del 2024)
- NASA Exoplanet Archive. (2024b). *Planetary systems table*. Descargado de <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/TblView/nph-tblView?app=ExoTbls&config=PS> (Consulta realizaa el 30 de Agosto de 2024)
- Onsager, L., y Machlup, S. (1953). Fluctuations and irreversible processes. *Phys. Rev.*, *91*, 1505–1512.
- Perry, C., Zhang, P., Nunes, F. B., Jordan, I., von Conta, A., y Wörner, H. J. (2020). The ionization energy of liquid water revisited. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. Descargado

- de https://www.researchgate.net/publication/338813398_The_Ionization_Energy_of_Liquid_Water_Revisited doi: 10.1021/acs.jpcllett.9b03391
- Prigogine, I. (1967). *Introduction to thermodynamics of irreversible processes* (3.^a ed.). John Wiley Sons: New York, NY, USA.
- Prigogine, I., y Nicolis, G. (1967). On symmetry-breaking instabilities in dissipative systems. *J. Chem. Phys.*, *46*, 3542.
- Prigogine, I., y Nicolis, G. (1971). Biological order, structure and instabilities. *Q. Rev. Biophys.*, *4*, 107–144.
- Prigogine, I., Nicolis, G., y Babloyantz, A. (1972a). Thermodynamics of evolution i. *Phys. Today*, *25*, 23–28.
- Prigogine, I., Nicolis, G., y Babloyantz, A. (1972b). Thermodynamics of evolution ii. *Phys. Today*, *25*, 38–44.
- Sagan, C. (1973). Ultraviolet selection pressure on the early organisms. *J. Theor. Biol.*, *39*, 195–200.
- Schidlowski, M. (1988). A 3800-million-year isotopic record of life from carbon in sedimentary rocks. *Nature*, *333*, 313–318.
- Schneider, E., y Kay, J. (1994). Complexity and thermodynamics: towards a new ecology. *Futures*, *24*, 626–647.
- Simeonov, A., y Michaelian, K. (2017). Properties of cyanobacterial uv-absorbing pigments suggest their evolution was driven by optimizing photon dissipation rather than photoprotection. *arXiv*, *22*. doi: arXiv:1702.03588
- Team, J. T. E. C. E. R. S. (2023). Identification of carbon dioxide in an exoplanet atmosphere. *Nature*, *614*, 649–652. Descargado de <https://www.nature.com/articles/s41586-022-05269-w> doi: 10.1038/s41586-022-05269-w
- ten Kate, I. L. (2018). Organic molecules on mars. *Science*, *360*(6393), 1068. doi: 10.1126/science.aat2662
- Ulanowicz, R., y Hannon, B. (1987). Life and the production of entropy. *Proc. R. Soc. Lond. B*, *232*, 181–192.
- University of Florida. (2023, July 12). *New study reveals evidence of diverse organic material on mars*. ScienceDaily. Descargado de <https://www.sciencedaily.com/releases/2023/07/230712124609.htm> (Retrieved September 4, 2024 from www.sciencedaily.com/releases/2023/07/230712124609.htm)
- Voosen, P. (2018). Nasa rover hits organic pay dirt on mars. *Science*. doi: 10.1126/science.aau3992
- Webster, C. R., y cols. (2018). Background levels of methane in mars' atmosphere show strong seasonal variations. *Science*, *360*(6393), 1093-1096. doi: 10.1126/science.aaq0131
- Wikipedia contributors. (2024). *Thiophene*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Thiophene>. (Accessed: 2024-09-01)
- Wu, X.-F., Zheng, X., Wang, H., Zhao, Y., Dr, X., Phillips, D., . . . Fang, W.-H. (2010). A resonance raman spectroscopic and casscf investigation of the franck–condon region structural dynamics and conical intersections of thiophene. *The Journal of Chemical Physics*, *133*, 134507. doi: 10.1063/1.3480361
- Zieba, S., Kreidberg, L., Ducrot, E., y cols. (2023). No thick carbon dioxide atmosphere on the rocky exoplanet trappist-1c. *Nature*, *620*, 746–749. Descargado de <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06232-z> doi: 10.1038/s41586-023-06232-z

Programa Fortran

```
1      program EarthSolarSpectrum
2      implicit none
3      ! Program developed by K. Michaelian calculates the solar spectrum at earth's surface through time.
4      ! Adapted from "EmittedPhotonIntensity.f" and "LeafEntProd.f" also by K. Michaelian (/PNAS/programs)
5      ! See Wurfel and Ruppel, Solid State Phys. 18 (1985) 2987-3000.
6      ! 19/02/2014 K. Michaelian
7      ! 28/02/2018 Adapted to calculate spectrum for any star
8      ! Note: to get Top of Atmosphere spectra, uncomment the line \mu = 0.0
9      ! cd "C://Work/Life/Astrobiology/Programs"
10     ! gfortran -fcheck=all -o PlanetStarSpectrum4.e PlanetStarSpectrum4.f
11     ! -----Declare
12     real*8 h,hb,c,rk, pi, Omega, JeV, micrompm
13     real*8 Rs, Re, Des
14     real*8 rlambda, energy, enelec, rintensity, rintensity2,
15     + rintensity3, rintensity4, rintensity5, total, totalE,
16     + frac, totalLUV, frac2, frac3, totalMUV, totalSUV
17     real*8 wn, rlm, mu
18     real*8 Ts, R, T
19     real*8 time
20     real*8 mus, muH2S, muAld, muOz, mufac, muO2, muCO2s, muCO2l, muh
21     real*8 muH2O, muHi
22     real*8 Fr      !Fraction of solar radius
23     real*8 Tsv     !Temperatures of stars
24     real*8 Tmm     !Date since present, age
25     real*8 DisES
26     dimension Fr(6), Tsv(6), Tmm(4)
27     data Fr/0.6,0.7,0.83,1.0,1.34,1.7/  ! fraction of radius of Sun
28     data Tsv/3100.,3650.,4450.,5840.,7000.,9000./
29     data Tmm/3.85,2.9,2.2,0.0/
30     integer*4 i, kkk, jjj
31     parameter (h = 6.6261e-34, c = 3.0e8)
32     ! -----Input
33     open(unit=12, file="Spectra.dat")
34     open(unit=13, file="Ratios.dat")
35     open(unit=14, file="UV.dat")
36     write(13,*) '#####Age#####Temp
37 #####+###A.U.#####TotalEnergyW
38 #####+###TotalEarthSurfW/m^2#####UVCW/m^2
39 #####+###LUV/Total#####MUVC#####MUVC/Total###MUVC/UVC, SUV'
40     ! 1111 print*, "Enter time in Ga years ..."
41
42     read*, time
43     do jjj = 1,1  !1,4 !4          !Loop over dates since present
44         time = Tmm(jjj)
45     ! -----Compute
46     pi= 3.14159
47     h= 6.6261e-34 !Planck constant J.s
48     hb = h/(2.*pi)
49     JeV = 1.602e-19 !Joules per eV
50     c = 3.0e8 !speed of light m/s
51     rk = 1.38054e-23 !J/K
52     micrompm = 1.0e6 ! micrometers per meter
53     Rs = 6.96e8 !radius of Sun in m
54     Re = 6.37e6 !radius of Earth in m
55     DisES = 1.496e11 !distance Earth-Sun in m
56     ! Ts = 5840. !9000. !7000. !5840. !3100. !3650. ! 5840. !temperature of Sun's surface today
57     do kkk = 1,6  !1,6          !Loop over 6 star types
58         Des = 1.496e11 !distance Earth-Sun in m
59         Rs = 6.96e8 !radius of Sun in m
60         Rs = Rs*Fr(kkk)
61         Ts = Tsv(kkk)
62         Des=Des*(Tsv(kkk)/Tsv(4))**2.85 !Adjust distance for T^4 power output and radius of star
```

```

63 ! Omega = 6.77e-5 !sr solid angle to planet
64 continue
65 total = 0.0
66 totalE = 0.0
67 totalLUVVC = 0.0 ! UV-C 230-290 nm
68 totalMUVVC = 0.0 ! Vacuum ultraviolet 190-220 nm
69 totalSUVC = 0.0 ! for producing HCN in upper atmosphere 120-146 nm
70 ! Do loop over wavelength
71 do i = 20, 40000
72   rlambda = float(i)*1.e-9 !wavelength in meters
73   energy = h*c/rlambda !energy of photon in J
74   eneLevcv = energy/JeV !energy of photon in eV
75   wn = 1./rlambda/100. !wavenumber in inverse cm
76 ! write(6,*), rlambda*1.e9, wn
77   rlm = rlambda*1.e9 !wavelength in nm
78
79   if(time .gt. 3.84 .and. time .lt. 3.86)then !beggining of life
80     mus = -2.0*.280 - .05*(400./rlm)**4 !Mie + Rayleigh scattering
81     muh = 0.0 !organic haze
82     muOz = 0.0 ! ozone
83     muO2 = 0.0 ! O2
84     muCO2s = -800.0*dexp(-dabs(rlm -140.))**.5 ! CO2 short wavelength abs.
85 ! muCO2l = -2.*0.5 ! CO2 long wavelength abs.
86     muH2S = -200.0*dexp(-dabs(rlm -197.0))**.72 ! hydrogen sulfide
87     muAld = -580.*dexp(-dabs(297.-rlm)**.59) ! aldehydes
88     mufac = 2.0 ! factor for water concentration
89     muH2O = -.3*mufac*dexp(-dabs(rlm -720.0)**1.0)
90 +     -1.0*mufac*dexp(-dabs(rlm -820.0)**.8)
91 +     -.8*mufac*dexp(-dabs(rlm -940.0)**.3)
92 +     -5.0*mufac*dexp(-dabs(rlm -1100.0)**.5)
93 +     -4.0*mufac*dexp(-dabs(rlm -1380.0)**.3)
94 +     -5.0*mufac*dexp(-dabs(rlm -1870.0)**.3)
95 +     -5.0*mufac*dexp(-dabs(rlm -2700.0)**.3)
96     muHi = -.15*dexp(-dabs(rlm-490.)/150.)
97   else if(time .gt. 2.85 .and. time .lt. 2.95)then !beginning of organic haze
98     mus = -1.5*.280 - .05*(400./rlm)**4 !Mie + Rayleigh scattering
99     muh = -0.3 !Organic haze
100    muOz = 0.0 ! ozone
101    muO2 = 0.0 ! O2
102    muCO2s = -800.0*dexp(-dabs(rlm -140.))**.5 ! CO2 short wavelength abs.
103 ! muCO2l = -2.*0.5 ! CO2 long wavelength abs.
104    muH2S = -200.0*dexp(-dabs(rlm -197.0))**.72 ! hydrogen sulfide
105    muAld = -580.*dexp(-dabs(297.-rlm)**.59) ! aldehydes
106    mufac = 1.8 ! factor for water concentration
107    muH2O = -.3*mufac*dexp(-dabs(rlm -720.0)**1.0)
108 +     -1.0*mufac*dexp(-dabs(rlm -820.0)**.8)
109 +     -.8*mufac*dexp(-dabs(rlm -940.0)**.3)
110 +     -5.0*mufac*dexp(-dabs(rlm -1100.0)**.5)
111 +     -4.0*mufac*dexp(-dabs(rlm -1380.0)**.3)
112 +     -5.0*mufac*dexp(-dabs(rlm -1870.0)**.3)
113 +     -5.0*mufac*dexp(-dabs(rlm -2700.0)**.3)
114    muHi = -.15*dexp(-dabs(rlm-490.)/150.)
115   else if(time .gt. 2.1 .and. time .lt. 2.3)then !beginning of organic haze
116     mus = -1.2*.280 - .05*(400./rlm)**4 !Mie + Rayleigh scattering
117     muh = -0.1*0.3 !organic haze
118     muOz = -.15*9000.0*dexp(-(rlm -266.)/6.) ! ozone !15% present ozone
119     muO2 = -.15*.06*dexp(-dabs(rlm-450.)/350.) ! 15% present O2 levels
120     muCO2s = -500.0*dexp(-dabs(rlm -140.))**.5 ! CO2 short wavelength abs.
121 ! muCO2l = -1.2*0.5 ! CO2 long wavelength abs.
122     muH2S = -100.0*dexp(-dabs(rlm -197.0))**.72 ! hydrogen sulfide
123     muAld = -200.*dexp(-dabs(297.-rlm)**.59) ! aldehydes
124     mufac = 1.3 ! factor for water concentration
125     muH2O = -.3*mufac*dexp(-dabs(rlm -720.0)**1.0)
126 +     -1.0*mufac*dexp(-dabs(rlm -820.0)**.8)
127 +     -.8*mufac*dexp(-dabs(rlm -940.0)**.3)
128 +     -5.0*mufac*dexp(-dabs(rlm -1100.0)**.5)
129 +     -4.0*mufac*dexp(-dabs(rlm -1380.0)**.3)
130 +     -5.0*mufac*dexp(-dabs(rlm -1870.0)**.3)
131 +     -5.0*mufac*dexp(-dabs(rlm -2700.0)**.3)
132     muHi = -.15*dexp(-dabs(rlm-490.)/150.)
133   else if(time .eq. 0.0)then !today
134     mus = -.280 !scattering chemical
135     muh = 0.0 !organic haze
136     muOz = -9000.0*dexp(-(rlm -266.)/6.) ! ozone
137     muO2 = -.06*dexp(-dabs(rlm-450.)/350.) !oxygen
138     muH2S = 0.0 ! hydrogen sulfide
139     muAld = 0.0 ! aldehydes

```


Constantes Universales

Número π

$$\pi \approx 3.141592653589793238462643383279502884197169399375105820974944592307816406286208998628034825 \quad (1)$$

Constante de Planck (h)

$$h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J s} \quad (2)$$

Velocidad de la luz (c)

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad (3)$$

Constante de Wien (b)

$$b = 2.897771955 \times 10^{-3} \text{ m K} \quad (4)$$

Unidades

- W (W) - vatio
- m (m) - metro
- m² (m²) - metro cuadrado
- sr (sr) - estereorradián
- μm (μm) - micrómetro
- nm (nm) - nanómetro
- K (K) - kelvin
- J (J) - julio
- (ly) - año luz
- M_{\odot} - masa solar
- eV (eV) - electronvoltio