

PROGRAMA INVESTIGA I+D+i  
AÑO ACADÉMICO 2022-2023

# **LA RADIACIÓN ESPACIAL Y SUS EFECTOS**

## **GUÍA INTRODUCTORIA**

María Jesús Rivas Martínez

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)

# 1 INTRODUCCIÓN

Podemos definir la radiación como la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas (“radiación electromagnética”) o de partículas subatómicas que se desplazan a gran velocidad (“radiación corpuscular”).

Cuando hablamos de “radiación espacial” nos referimos a la que podemos detectar en el Espacio y también a la que, procedente del Espacio o derivada de esta, está presente en la Atmósfera y en la superficie terrestre afectando, por tanto, no sólo a nuestras misiones espaciales sino también a nuestra vida diaria.

La radiación espacial en el medio interplanetario que rodea la Tierra tiene dos fuentes: el Sol por un lado y, por otro, eventos energéticos que tienen lugar en el exterior del Sistema Solar, hablándose en el segundo caso de radiación cósmica o rayos cósmicos (galácticos o extragalácticos en función de cuál sea su origen).

El Sol, nuestra estrella, emite radiación electromagnética en todo el espectro y radiación corpuscular que se denomina viento solar; ambos se expanden por la Heliosfera afectando a los cuerpos del Sistema Solar que se encuentran a su paso. El viento solar arrastra consigo al campo magnético solar, y ambos interactúan con el campo magnético de la Tierra dando lugar a una situación de equilibrio en la que se crea una burbuja magnética alrededor de la Tierra denominada Magnetosfera.

El Sol presenta ciclos de aproximadamente 11 años en los que su actividad pasa por un máximo y un mínimo. Además, el Sol presenta variaciones continuas y a menudo impredecibles en sus emisiones de radiación y campo magnético. Cuanto mayor sea la actividad solar, menor es la penetración de los rayos cósmicos en la Heliosfera y al revés.

La Magnetosfera terrestre desvía gran parte de la radiación corpuscular espacial que, si llegara a la superficie terrestre, sería letal. Sin embargo, no constituye ningún filtro para la propagación de radiación electromagnética. Algunas partículas de alta energía que consiguen atravesar los límites de la Magnetosfera, se acumulan dentro de esta en zonas llamadas “cinturones de radiación”, que hay que tener en cuenta en el diseño de las misiones espaciales.

La Atmósfera contribuye a la protección de la vida tal y como la conocemos disminuyendo la energía y, por tanto, la peligrosidad de la radiación corpuscular que consigue atravesar la Magnetosfera. Filtra, además, la radiación electromagnética espacial y sólo deja llegar a la superficie terrestre ciertas longitudes de onda.

Los cuerpos celestes que tienen atmósfera y magnetosfera (sólo algunos) tienen su propia protección frente a la radiación espacial. Los que no tienen, están expuestos en superficie a los mismos niveles de radiación que soportaría una nave que viajara por el espacio interplanetario.

En el caso de la Tierra, la vida está adaptada a los niveles de radiación espacial que, tras superar los filtros de la Magnetosfera y la Atmósfera, alcanzan la superficie terrestre. Pero, ¿qué ocurre con las tecnologías que desarrollamos?, ¿son sensibles a la radiación que llega del Espacio? Y, ¿qué ocurre con las personas y las tecnologías cuando abandonan la superficie terrestre?

La radiación espacial, cuando interactúa con la materia, si tienen suficiente energía producirá en ella efectos que pueden llegar a ser muy perjudiciales. Nos centraremos en esta guía en la radiación espacial de alta energía, suficiente para producir daños importantes en la

materia, ya que es la que se analiza en profundidad cuando se planifica una misión espacial. Se denomina “radiación ionizante”, porque es capaz de producir ionización en los átomos de los materiales en los que penetra. En adelante, el término “radiación espacial” hará referencia a la radiación espacial de alta energía exclusivamente.

La disciplina científica que estudia el estado del medio espacial en función de la actividad solar, se denomina “Meteorología Espacial”, e incluye el análisis de los niveles de radiación en el entorno de interés para nuestras misiones. Se invierte mucho esfuerzo a nivel mundial para conocer y predecir los fenómenos que tendrán lugar en el Sol y que afectarán a todo cuerpo presente en la Heliosfera.

Nos centraremos en esta guía en la interacción de la radiación espacial con el entorno terrestre, si bien cualquier misión espacial que se desarrolle en otro ámbito (Marte, Júpiter,...) requeriría su propio análisis de radiación.

Del mismo modo, esta guía sólo considera los efectos de la radiación espacial cuando interacciona con materiales inertes. El análisis de los efectos sobre los seres vivos es fundamental, pero no está incluido en este texto que constituye sólo una breve introducción al estudio de la radiación espacial y sus efectos.

## 2 LA RADIACIÓN ESPACIAL

### 2.1 El sistema Sol – Tierra

Para entender el origen, la propagación y los efectos de la radiación espacial, conviene tener claros unos conceptos básicos relativos al Sol y la Tierra. El Sol es la principal fuente de radiación espacial a la que la Tierra está sometida y moduladora de la segunda. La Tierra tiene dos escudos protectores que anulan, moderan o modifican la influencia de la radiación espacial sobre nosotros. Un breve repaso a las características de ambos cuerpos celestes es fundamental para entender el entorno de radiación espacial al que estamos sometidos.

#### 2.1.1 Datos generales del Sol

El Sol es una estrella y, por tanto, está formado por plasma en equilibrio hidrostático. Como en todas las estrellas, su masa es suficientemente grande para que en su interior se produzca energía mediante fusión nuclear, reacción en la que el hidrógeno se transforma en helio. Está situada en el brazo de Orión de la Vía Láctea y tarda 226 millones de años en completar una vuelta de traslación alrededor del núcleo de esta.



Figura 1. Situación del Sol en la Vía Láctea. Fuente: NASA.

El radio del Sol mide 698.450 km y está situado a una distancia de la Tierra de 149,6 millones de km. Su movimiento de rotación es diferencial, con distinta velocidad en función de la latitud. El eje de rotación del sol está inclinado  $7^{\circ}$  respecto a la perpendicular al plano de la eclíptica.

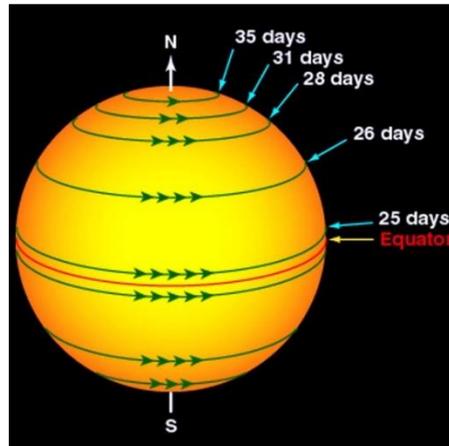


Figura 2. Rotación diferencial del Sol. Fuente: NASA.

### 2.1.2 Estructura del Sol

El Sol tiene una estructura de capas con distintos tamaños y temperaturas.

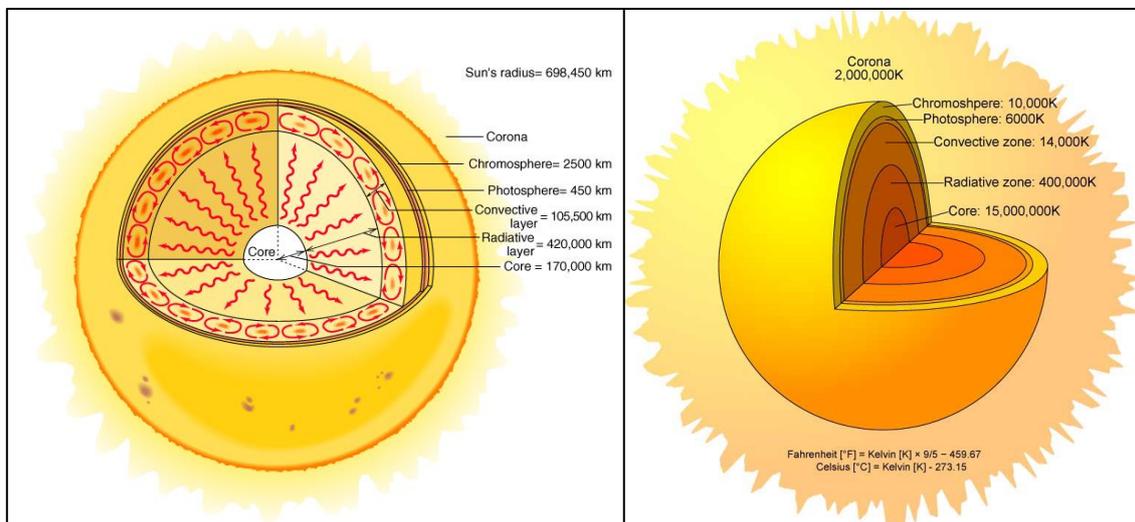
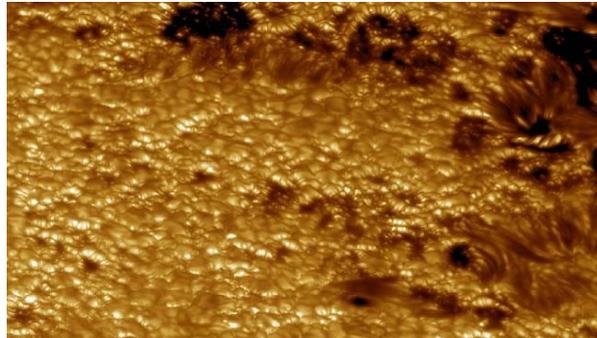


Figura 3. Tamaño y temperatura de las distintas capas del Sol. Fuente: ESO, ESA.

Las características principales de las distintas capas son:

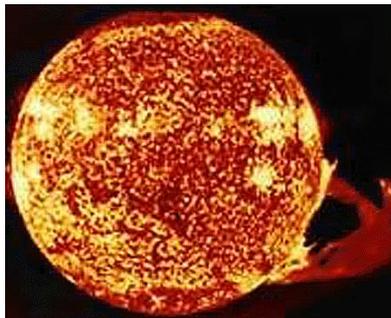
- **Núcleo:** en él se genera energía por fusión nuclear.
- **Zona radiativa:** los fotones generados en el núcleo transportan la energía hacia el exterior, siendo continuamente absorbidos y reemitidos.

- Zona convectiva: columnas de plasma caliente ascienden hasta la superficie, se enfrían y vuelven a descender.
- Fotosfera: capa delgada que percibimos como la superficie del Sol. En ella se observa granulación.



*Figura 4. Granulación solar. Fuente: NASA.*

- Cromosfera: tenue y de color rojizo, sólo se ve en los eclipses. En ella se producen distintos fenómenos como las espículas, protuberancias y playas.



*Figura 5. Protuberancia. Fuente: INTEF.*

- Corona: capa de gran extensión, temperaturas altas y de bajísima densidad. En ella se producen plumas y bucles o lazos, entre otros fenómenos.



*Figura 6. Bucle coronal. Fuente: Windows2universe.*

### 2.1.3 Campo magnético solar

En la Fotosfera aparecen y desaparecen unas zonas activas denominadas manchas solares; son zonas oscuras cuya abundancia varía de forma más o menos periódica dando lugar a los ciclos solares, con un periodo de variación de unos 11 años aproximadamente. Cuando hay más manchas se habla de máximo solar y cuando apenas hay manchas es el mínimo del ciclo.

En los mínimos solares el campo magnético del Sol es prácticamente dipolar, similar al que formaría un dipolo magnético. En cada mínimo solar la polaridad Norte-Sur es inversa a la del mínimo anterior. Entre mínimos, el campo magnético sufre una inversión gradual que se traduce en la alteración del campo magnético en la superficie y en la consecuente formación de zonas activas.

### 2.1.4 Eventos energéticos solares

En el Sol se producen continuamente fenómenos muy energéticos que se suman a las características descritas anteriormente, y que alteran su emisión de radiación y campo magnético. Se pueden citar, entre otros los siguientes:

- Manchas solares. Son la manifestación más importante de la actividad solar. Aparecen como zonas oscuras situadas en la Fotosfera y pueden observarse a simple vista o proyectadas sobre una pantalla. Tienen dimensiones y formas muy variables con diámetros de 2.000 a más de 100.000 km. Puede distinguirse una parte más oscura, la umbra, situada en el interior de una región llamada penumbra, gris y con forma irregular. Una mancha aparece, se desarrolla y deja de observarse en un tiempo que puede variar entre unas horas y varios meses. El hecho de que las manchas solares puedan observarse y contarse con facilidad ha hecho que se usen como indicadores del ciclo solar.

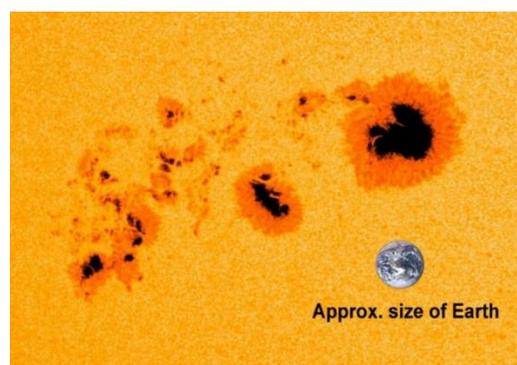


Figura 7. Manchas solares. Fuente: NASA.

- Fulguraciones. Son erupciones que se producen en la Cromosfera, en las que se emite radiación electromagnética en todo el espectro, siendo el fenómeno más violento observado en el Sistema Solar. Normalmente se emiten también partículas de alta energía.

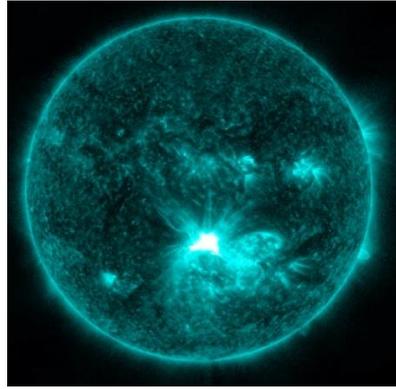


Figura 8. Fulguración solar. Fuente: NASA.

- Eyecciones de masa coronal (CME – Coronal Mass Ejections) son enormes expulsiones de plasma y campo magnético desde la Corona. Pueden estar constituidas por millones de toneladas de material que se desplazan desde el Sol a velocidades que oscilan entre los 250 km/s y los 3.000 km/s. Pueden tardar entre varias horas y varios días en alcanzar nuestro planeta, expandiéndose la CME en tamaño según se propaga desde el Sol.

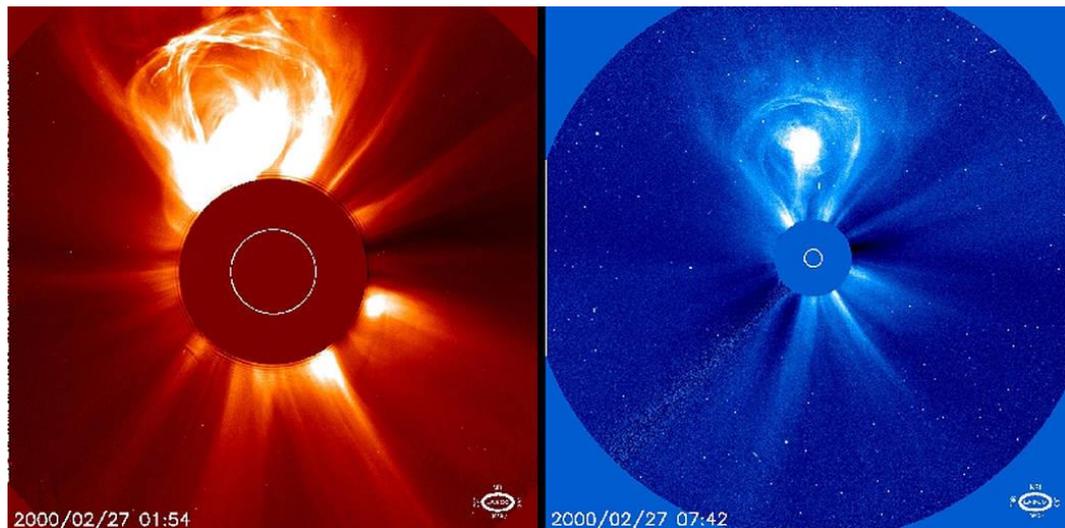


Figura 9. CME captada por SOHO. Fuente: NASA.

- Agujeros coronales. Son zonas de la Corona más frías, menos densas y más oscuras. De ellos surge viento solar rápido, con el doble de velocidad que el viento solar normal. Se sitúan normalmente en los polos del Sol, aumentando en número y tamaño y extendiéndose hacia latitudes más bajas en las proximidades del mínimo solar.

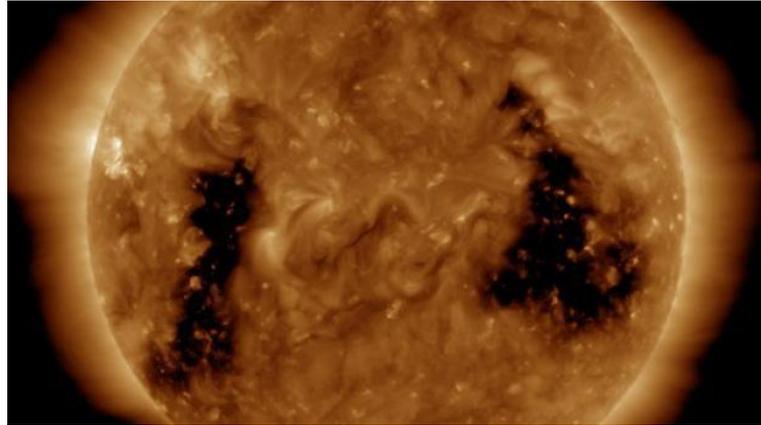


Figura 10. Agujeros coronales. Fuente: NOAA.

### 2.1.5 Datos generales de la Tierra

La Tierra es el quinto planeta en tamaño del Sistema Solar, y el mayor de los rocosos con un radio de 6.371 km. Su órbita alrededor del Sol define el plano de la eclíptica y su distancia al Sol (149,6 millones de km) define la *ua* (unidad astronómica), unidad de medida utilizada en astronomía. A esa distancia, la radiación electromagnética emitida por el Sol tarda 8 minutos en alcanzar nuestro planeta.

### 2.1.6 Estructura de la Tierra

La Tierra está formada por cuatro capas principales:

- Núcleo interno: es una esfera sólida de hierro y níquel con un radio de 1.221 km. Su temperatura es de 5.400 °C.
- Núcleo externo: rodeando al interno, con un grosor de 2.300 km; su composición es hierro y níquel en estado líquido.
- Manto: capa caliente y viscosa de unos 2.900 km, formada por una mezcla de rocas fundidas.
- Corteza: sólida, de aproximadamente 30 km de grosor en tierra y de unos 5 km en el fondo marino.

### 2.1.7 Campo magnético terrestre

La Tierra tiene un campo magnético formado por la suma de varias contribuciones:

- Campo dipolar: formado por efecto dinamo debido a corrientes de convección en el núcleo externo impulsadas por el flujo de calor procedente del núcleo interno.
- Campo debido a corrientes presentes en la Atmósfera y la Magnetosfera.
- Campo debido a anomalías magnéticas en la corteza.
- Campo magnético interplanetario, procedente del Sol arrastrado por el viento solar.

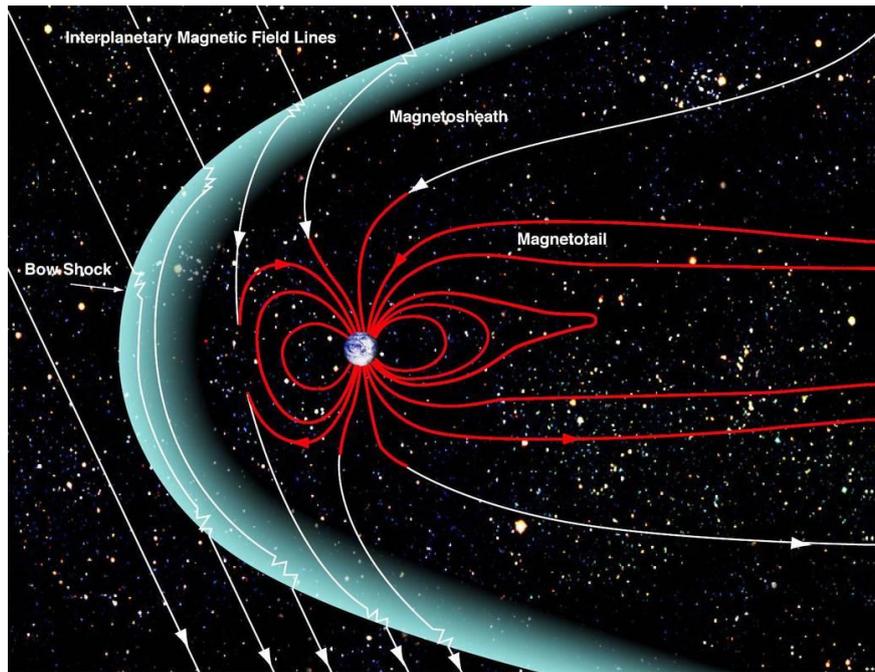


Figura 11. Magnetosfera terrestre. Fuente: NASA.

La suma de estas contribuciones configura la Magnetosfera, zona que rodea la Tierra en la cual el campo magnético terrestre domina el movimiento del plasma presente en el medio interplanetario. Tiene forma y tamaño asimétrico estando su límite situado en el lado de día a unos 10 radios terrestres, extendiéndose la Magnetocola (Magnetotail) en el lado de noche a unos 220 radios terrestres. La Magnetosfera desvía la mayor parte del viento solar procedente del Sol protegiendo a la Tierra de sus efectos.

### 2.1.8 Atmósfera terrestre

La Atmósfera es la envoltura gaseosa que cubre la Tierra y que está sujeta a la fuerza gravitatoria de esta. Es una mezcla de gases, llamada aire, y de partículas sólidas y líquidas en suspensión llamadas aerosoles. Puesto que la densidad del aire disminuye gradualmente, el límite superior de la Atmósfera no está claramente definido, pudiendo encontrarse gas sujeto a gravedad a unos 10.000 km de altura. El 75% de la Atmósfera se encuentra en los primeros 11 km de altura desde la superficie terrestre.

En la Atmósfera se distinguen capas, habiendo clasificaciones diferentes según el criterio que se use. La siguiente figura muestra la estructura térmica de la Atmósfera:

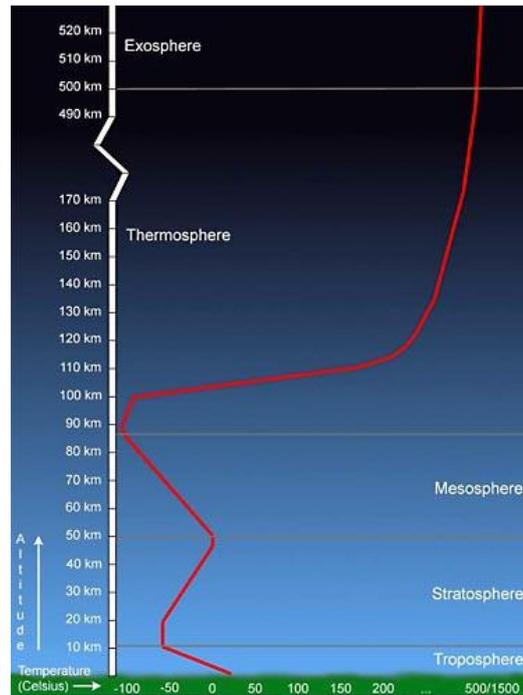


Figura 12. Estructura térmica de la Atmósfera. Fuente: NASA.

Una parte muy importante de la Atmósfera es la Ionosfera: es una zona ionizada situada entre los 60 y los 2.000 km de altura. Constituye una capa muy importante para las comunicaciones a grandes distancias mediante ondas de radio. Al ser un plasma, en ella se crean corrientes que contribuyen a modelar y configurar el campo magnético terrestre.

## 2.2 Radiación espacial

En el medio interplanetario la radiación espacial procede del Sol y del exterior del Sistema Solar, denominándose en este último caso radiación cósmica o rayos cósmicos. Ambas se suman, pero están anticorrelacionadas: cuando el flujo procedente del Sol aumenta, disminuye el de rayos cósmicos y viceversa, siendo el Sol y su actividad, por tanto, los que determinan el ambiente de radiación que nos rodea en el Espacio.

La **radiación procedente del Sol** es tanto electromagnética como corpuscular:

- **Radiación electromagnética:** los fotones generados en las reacciones de fusión que tienen lugar en el núcleo solar, después de un viaje que puede durar entre cien mil y un millón de años, alcanzan la superficie y ahí consiguen escapar gracias a la menor densidad de las capas externas del Sol.
- **Viento solar (radiación corpuscular):** debido a la gran diferencia de presión entre la Corona y el medio interplanetario, el plasma solar puede escapar a la atracción gravitatoria dando lugar a una corriente permanente de partículas cargadas. El viento solar está formado

fundamentalmente por protones, iones de helio otros iones pesados y electrones. Cuando alcanza la Tierra, su velocidad es aproximadamente de 400 km/s.

Los **rayos cósmicos** son partículas cargadas de muy alta energía que, procedentes de la galaxia o de fuera de ella, penetran en el Sistema Solar. Su flujo está anticorrelacionado con la actividad solar debido a su interacción con el viento solar. Están formados por protones, electrones y núcleos ionizados. Su flujo es isotrópico y bajo, pero incluyen partículas de muy alta energía que pueden perjudicar seriamente a la materia con la que interaccionan.

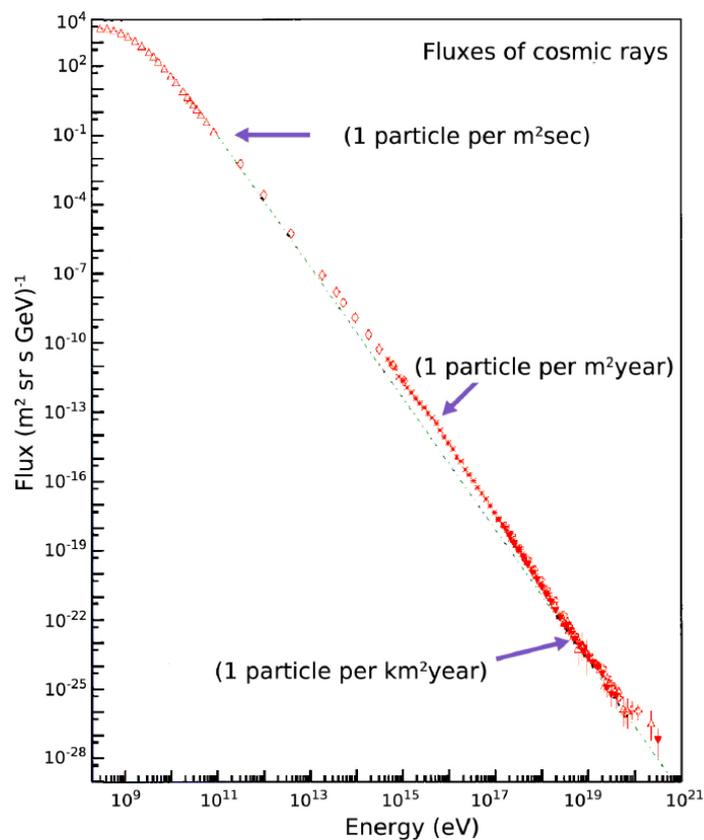


Figura 23. Flujo de rayos cósmicos. Fuente: ResearchGate.

Cuando la radiación solar (electromagnética y corpuscular) y los rayos cósmicos (radiación corpuscular) alcanzan el entorno terrestre (planeta + Atmósfera + Magnetosfera), se producen las siguientes interacciones:

- La radiación electromagnética atraviesa la Magnetosfera sin interaccionar con ella. Sin embargo, al llegar a la Atmósfera, esta sólo dejará llegar a la superficie terrestre algunas longitudes de onda, filtrando las restantes en mayor o menor medida.

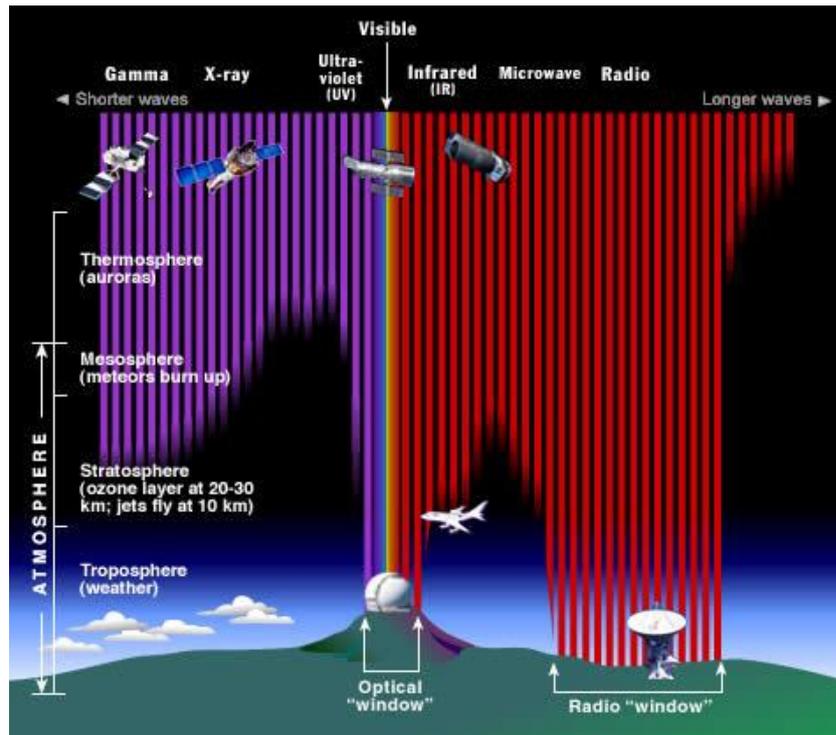


Figura 34. Opacidad de la Atmósfera a las distintas longitudes de onda. Fuente: NASA.

En el caso de la radiación gamma de alta energía (improbable) la interacción de los fotones incidentes con las partículas atmosféricas daría lugar a una cascada de partículas cuyo resultado sería disipar la energía incidente para disminuir los potenciales efectos en la superficie.

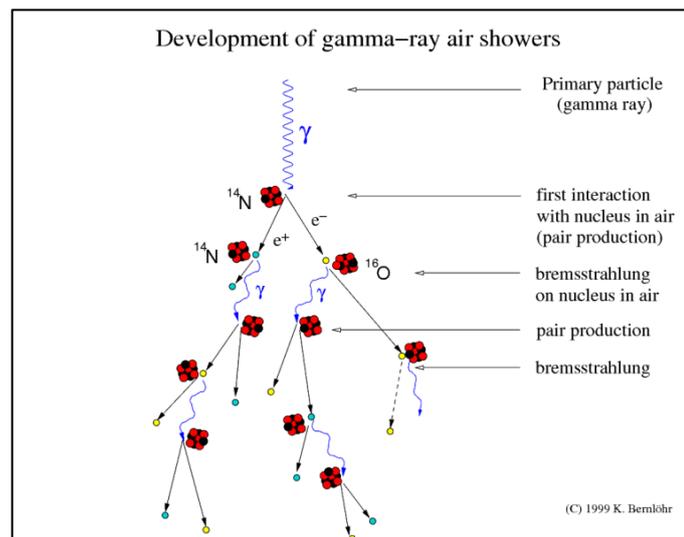


Figura 45. Cascada atmosférica originada por un fotón gamma. Fuente: Max Plank Institut.

- La radiación corpuscular es prácticamente desviada en su totalidad por la Magnetosfera. Las partículas que consiguen entrar se quedan atrapadas girando alrededor de las líneas de campo magnético. Estas partículas atrapadas dan lugar a los denominados **cinturones de radiación**, bautizados como Cinturones de Van Allen en el caso de la Tierra, zonas de radiación corpuscular de alta energía de gran importancia para las órbitas habituales de nuestros satélites artificiales.

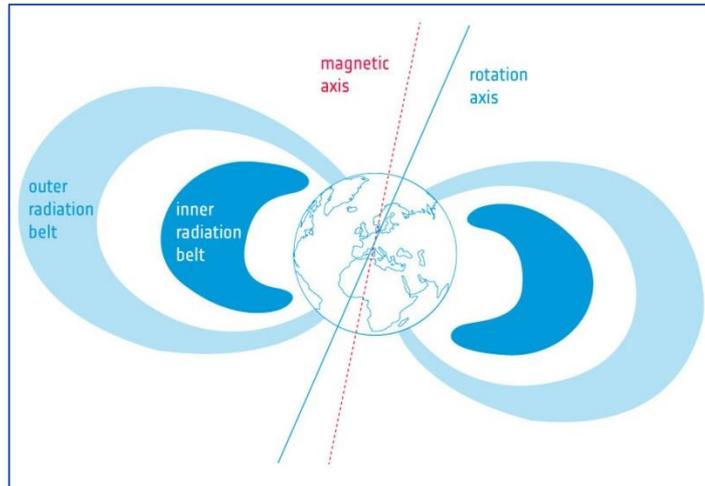


Figura 56. Cinturones de Van Allen. Fuente: ESA.

Algunas partículas conseguirán llegar a la Atmósfera. Las de menor energía interactuarán de diversas formas con los gases atmosféricos y su energía se disipará de esta manera; las auroras son la manifestación de la colisión de electrones con los átomos de oxígeno y nitrógeno del aire. Las partículas más energéticas originan **cascadas atmosféricas** que repartirán la energía incidente en superficies mayores, disminuyendo sus efectos.

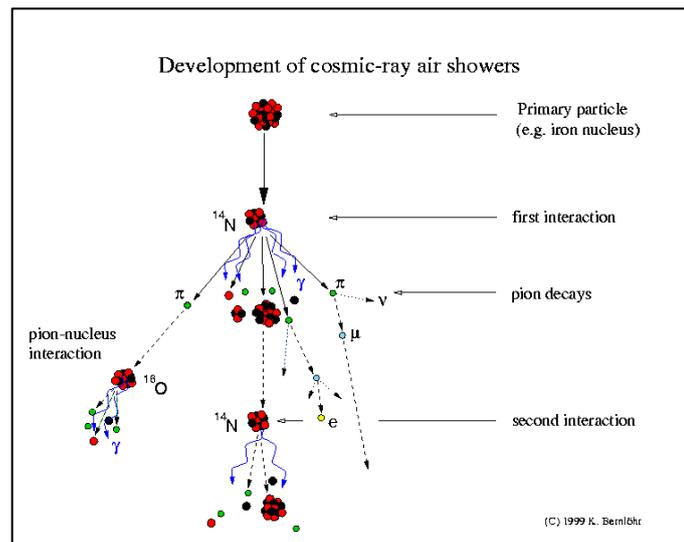


Figura 17. Cascada atmosférica originada por una partícula cargada. Fuente: Max Plank Institut.

### 3 EFECTOS DE LA RADIACIÓN ESPACIAL EN LAS TECNOLOGÍAS

Cuando la radiación espacial interacciona con nuestras tecnologías, deposita en ellas su energía produciendo distintos efectos. Pueden citarse, entre otros, los siguientes:

- Efectos producidos por radiación espacial electromagnética

Los fotones de muy alta energía pueden alterar las propiedades de la materia cuando impactan contra ella, y producir partículas cargadas secundarias que interaccionarían con la materia produciendo los mismos efectos que la radiación corpuscular.

Por otro lado, la radiación electromagnética que viene del Sol también puede afectar a nuestros desarrollos tecnológicos de manera indirecta, alterando el estado de equilibrio del sistema Sol-Tierra. Así, por ejemplo, cuando un fenómeno energético solar hace que se produzca un incremento de la radiación X y EUV que alcanzan la Ionosfera, se distorsiona la ionización de esta, lo que genera problemas en las comunicaciones radio y en las comunicaciones por satélite. La señal de los sistemas de navegación (GPS, GALILEO, GLONASS) se ve igualmente alterada por el mismo motivo.

- Efectos producidos por radiación corpuscular

Las partículas energéticas que penetran en la Magnetosfera y la Atmósfera son peligrosas para astronautas y para los vuelos de alta latitud, produciendo importantes efectos sobre los materiales y tecnologías. Afectan a los lanzamientos de satélites ocasionando interferencias en el sistema de control de los vehículos. Generan ionización anómala en la Ionosfera, produciendo absorción de ondas de radio que dan lugar a apagones que duran días y afectando también a la señal de los sistemas de navegación por satélite.

Respecto a su interacción con los materiales y tecnologías, producen en ellos múltiples efectos, siendo los más importantes la ionización y los desplazamientos de los átomos de su posición de equilibrio en las redes. Estos efectos microscópicos se traducen en la alteración de propiedades macroscópicas eléctricas, ópticas, mecánicas y de otros tipos que degradan las tecnologías e incluso pueden anular totalmente su funcionamiento. En algunos casos, fallos producidos por la radiación pueden suponer importantes problemas de seguridad para las personas, como ocurriría en una misión espacial en la que falla alguno de sus sistemas vitales o en instalaciones críticas terrestres que pudieran verse afectadas por partículas espaciales que alcanzan la superficie o secundarias derivadas de estas.

En el ámbito de la electrónica, se analizan los efectos de la radiación en función de ciertos parámetros (TID - Total Ionizing Dose, DDD – Displacement Damage Dose, SEE – Single Event Effects) que se cuantifican, analizan y ensayan de distintas formas durante el desarrollo de las misiones espaciales.

Aunque es común y obligatorio considerar, evaluar y mitigar estos efectos en las misiones espaciales, en algunos casos puede ser necesario considerarlos también en los desarrollos tecnológicos que operarán en superficie o en la Atmósfera. Como ya se ha mencionado, la vida en la Tierra está adaptada a los niveles de radiación espacial que consiguen llegar a la superficie. Sin embargo, la tecnología está en continua evolución. Los nuevos materiales, la miniaturización y otros factores pueden hacerla más sensible a la interacción con la radiación, por lo que debe tenerse en cuenta este fenómeno en los nuevos desarrollos.

## 4 MITIGACIÓN

Las medidas de mitigación tratan de minimizar los efectos que produce la radiación sobre la materia. Pueden ser de distintos tipos:

- Monitorización y modelado de los fenómenos y efectos que se producen en la Heliosfera.
- Herramientas de “now-cast” y “forecast” para predicción de la situación del entorno espacial.
- Desarrollo de nuevos materiales y dispositivos menos sensibles a la radiación espacial.
- Blindajes de protección.

## 5 CONCLUSIONES

La radiación espacial está presente, no sólo en el Espacio, sino también en la Atmósfera y, normalmente en forma de partículas secundarias, también en la superficie terrestre. Dado que interacciona con la materia, es fundamental estudiarla y conocer los efectos nocivos que produce para poder mitigarlos.

Desde un punto de vista tecnológico, la radiación espacial supone un importante problema para las misiones espaciales, por lo que debe ser tenida en cuenta en el desarrollo de cualquier proyecto de este tipo. Otras tecnologías diseñadas para operar en la superficie terrestre o en la Atmósfera podrían ser también sensibles a los niveles de radiación procedente del Espacio que tendrán que soportar, por lo que esta debería ser considerada en los casos vulnerables.

Respecto a su impacto en organismos vivos, aunque este tema no se ha considerado en esta guía, la protección de los astronautas en las misiones tripuladas y las dosis recibidas por las tripulaciones de aviones (fundamentalmente en vuelos polares) o en futuras misiones turísticas que tengan lugar en la Atmósfera, hacen muy necesario el avance en el conocimiento de la radiación espacial y sus efectos.

## 6 TEMAS DE REFLEXIÓN

- ¿Cuáles son las características fundamentales de una onda electromagnética? ¿Qué es el “espectro electromagnético”? ¿Qué es un campo magnético?, ¿y el efecto dinamo? ¿Qué son las partículas subatómicas?
- ¿Cuál es la diferencia entre Heliosfera y Sistema Solar? ¿Qué cuerpos del Sistema Solar tienen magnetosfera?, ¿y atmósfera?
- ¿Qué es la clasificación de estrellas MKK? Según ella, ¿qué tipo de estrella es el Sol?
- ¿En qué consiste el programa de Seguridad Espacial de la Agencia Espacial Europea?, ¿contempla la “Meteorología Espacial” como uno de sus temas de análisis?
- ¿Qué efectos produce la radiación en los humanos y cuáles son las magnitudes que se usan para medirlos? ¿Y en otros seres vivos?
- Cuando volamos en avión, ¿cuánta radiación recibimos?
- ¿Cuánta radiación recibirán los astronautas de la misión Artemis?

- ¿Cuánta radiación recibirán los astronautas que viajen a Marte?
- ¿Qué herramientas de simulación se utilizan para analizar los niveles de radiación presentes en distintos entornos?
- ¿Qué materiales son más resistentes a los efectos de la radiación espacial?

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- NASA, National Aeronautics and Space Administration, USA  
<https://www.nasa.gov/>  
[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/spaceweather/index.html#q11](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/spaceweather/index.html#q11)  
[https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/sf\\_radiation\\_stu\\_bob.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/sf_radiation_stu_bob.pdf)  
<https://radhome.gsfc.nasa.gov/>
- ESA, European Space Agency  
<https://www.esa.int/>  
[https://www.esa.int/Space\\_Safety/Space\\_weather](https://www.esa.int/Space_Safety/Space_weather)
- NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration, USA  
<https://www.noaa.gov/>  
<https://www.swpc.noaa.gov/>
- Australian Space Academy  
<https://www.spaceacademy.net.au/>