

Radiación cósmica

Javier Honrubia

Departamento de Física Aplicada

ETSIAE, UPM

Noviembre 2025

Importancia de las radiaciones ionizantes en el espacio

- La radiación cósmica supone un **riesgo** en el espacio:

$$\text{Riesgo} = \text{probabilidad} \times \text{daño.}$$

- Los rayos cósmicos que provienen de **galaxias lejanas** (*Galactic Cosmic Rays*, **GCR**) están formados por iones pesados que se desplazan a velocidades próximas a la de la luz.
- Los '**jets**' de **partículas cargadas** de alta energía **procedentes del sol** en los denominados *Solar Particle Events* (**SPE**), conocidos como "**llamaradas solares**", también representan un riesgo.
- Los iones muy energéticos pueden penetrar en la mayoría de los materiales, incluido el tejido humano.
- Estos iones pueden impartir una dosis de radiación lo suficientemente alta como para producir graves daños a seres vivos y componentes electrónicos.
- Por ejemplo: la dosis de radiación que un astronauta puede recibir durante un viaje a Marte se estima que es de, aproximadamente, 0.66 Sievert (aumento del riesgo de cáncer del $\approx 5\%$). El límite máximo durante toda su vida de un astronauta es de, aproximadamente, 1 Sievert.
- Los daños producidos a componentes electrónicos de naves espaciales por **GCR** y **SPE** también pueden ser muy importantes.

Dosis recibida en misiones espaciales

- Para órbitas LEO, el campo magnético terrestre protege las astronaves de las tormentas solares y de los rayos cósmicos.
- En órbitas LEO, p.e. la ISS, las dosis están en el rango de **0.4 a 1.1 mSv/día** incluyendo los efectos del blindaje. Para misiones de 6 meses en órbita, la dosis equivalente es de 70 a 500 mSv/año, que es muy alta. La dosis máxima permitida es de 50 mSv/año.
- En misiones a Marte, se producirán unas 2 tormentas solares durante el transcurso de la misión (150–250 días de viaje + 300–600 días de estancia), por lo que habrá que proteger a los astronautas de los SPE. Dosis de 1 - 2 Sv como mínimo

EL PAÍS

SOCIEDAD

CIENCIA »

Un astronauta recibiría al ir a Marte toda la dosis de radiación de su carrera

El 'Curiosity' ha medido el flujo de rayos cósmicos y partículas solares a los que se expondría la tripulación

ALICIA RIVERA | Madrid | 30 MAY 2013 - 20:00 CET

98

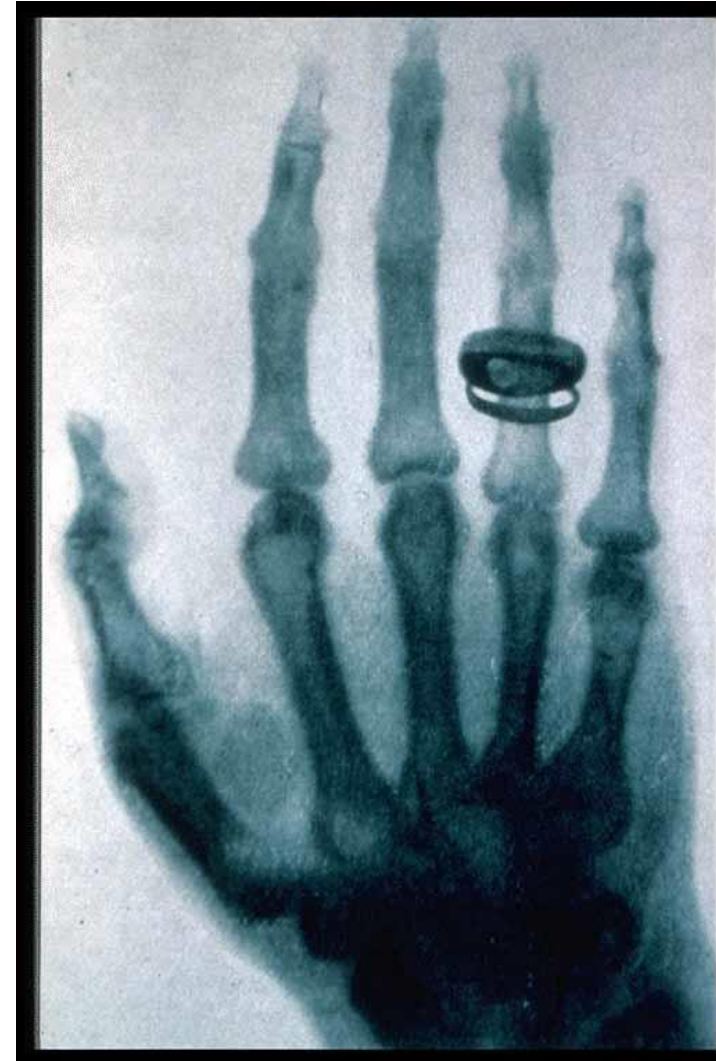
Archivado en: NASA Marte Curiosity Astronautas Agencias espaciales Exploración espacial Sondas espaciales Astronáutica Planetas Sistema solar Universo

Astronomía Ciencia

Contenido

- Tipos de radiaciones ionizantes.
- Efectos microscópicos de las radiaciones.
- Características de la radiación cósmica: número de partículas y espectro.
- Interacción de la radiación con la materia.
 - Partículas cargadas.
 - Radiación electromagnética.
 - Neutrones.
- Unidades radiológicas y límites de dosis.
- Protección frente a las radiaciones externas.
- Fuentes de radiación cósmica.
- Dosis máximas recomendadas por la NASA y la ESA.

Descubrimiento de los rayos X Wilhelm Roentgen (1845-1923)



Tipos de radiaciones

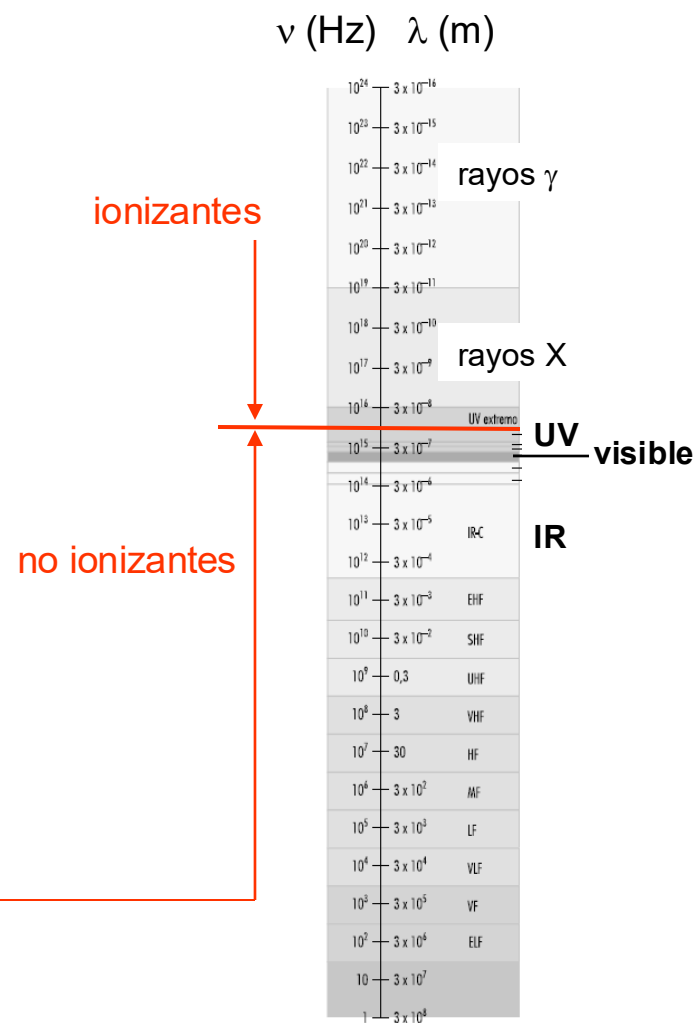
Radiaciones	Ionizantes	partículas	α
			β
			n
			iones
	No ionizantes	radiación EM	γ , X
			UV
			visible
			IR
			microondas
			RF

- Radiación electromagnética

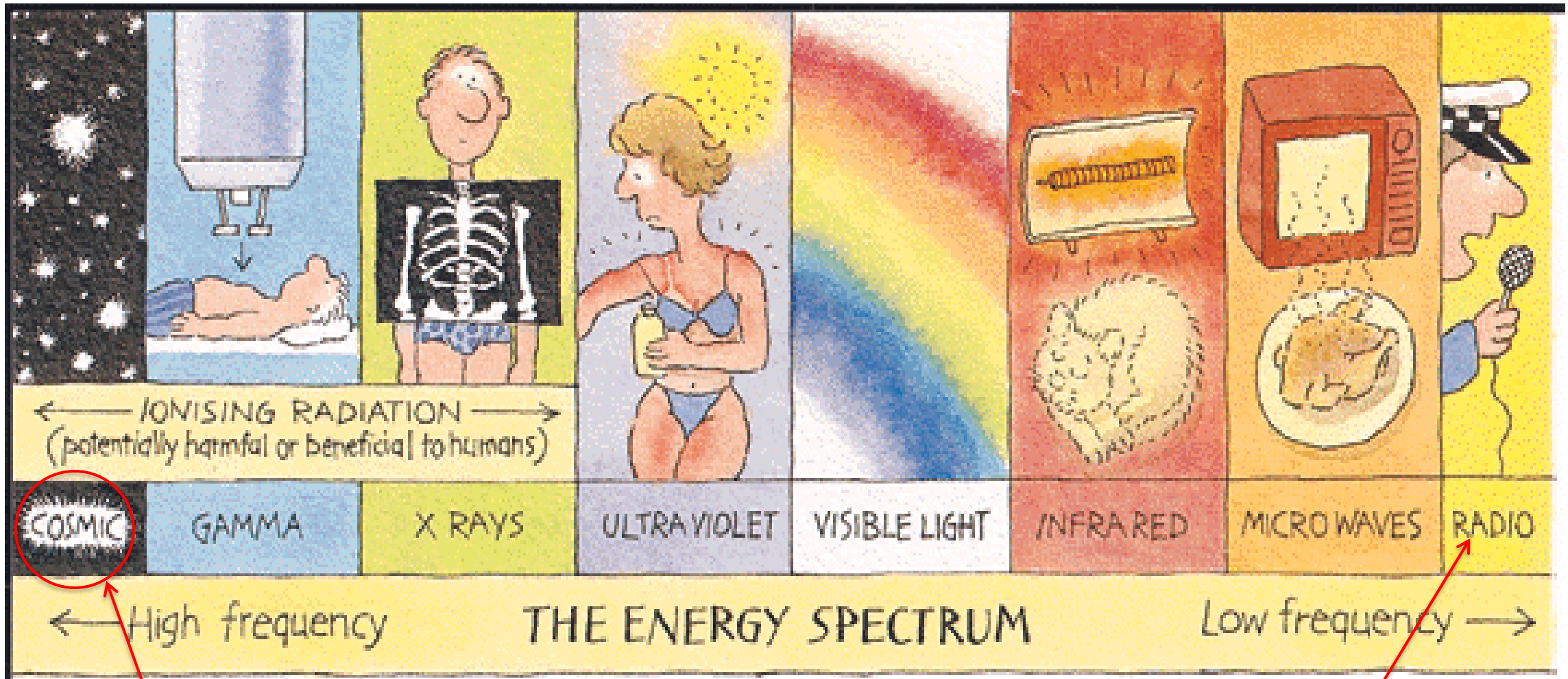
$$\mathbf{E} = \mathbf{h} \nu; \lambda = c/\nu$$

siendo $\mathbf{h} = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}^{-1}$ la constante de Planck,
 ν la frecuencia (Hz) y c la velocidad de la luz en el vacío
 ($c = 300.000 \text{ km/s}$).

- Energía de ionización = $2 \times 10^{-18} \text{ J}$ (12.5 eV),
 $\nu = 3 \times 10^{15} \text{ Hz}$, $\lambda = 100 \text{ nm}$



Ejemplos de radiaciones ionizantes

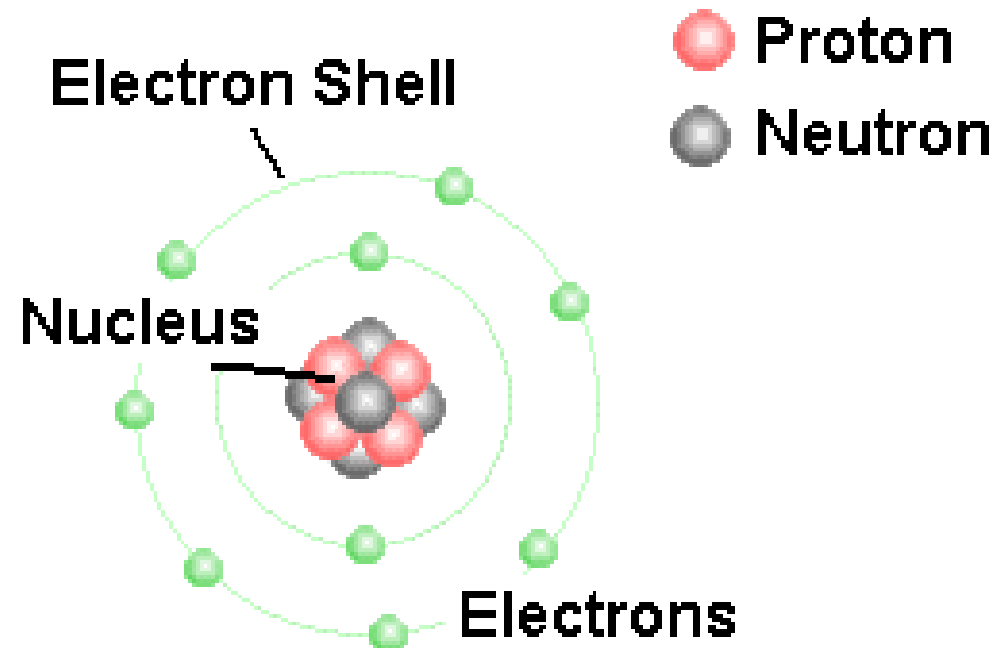


← Alta energía

Baja energía →

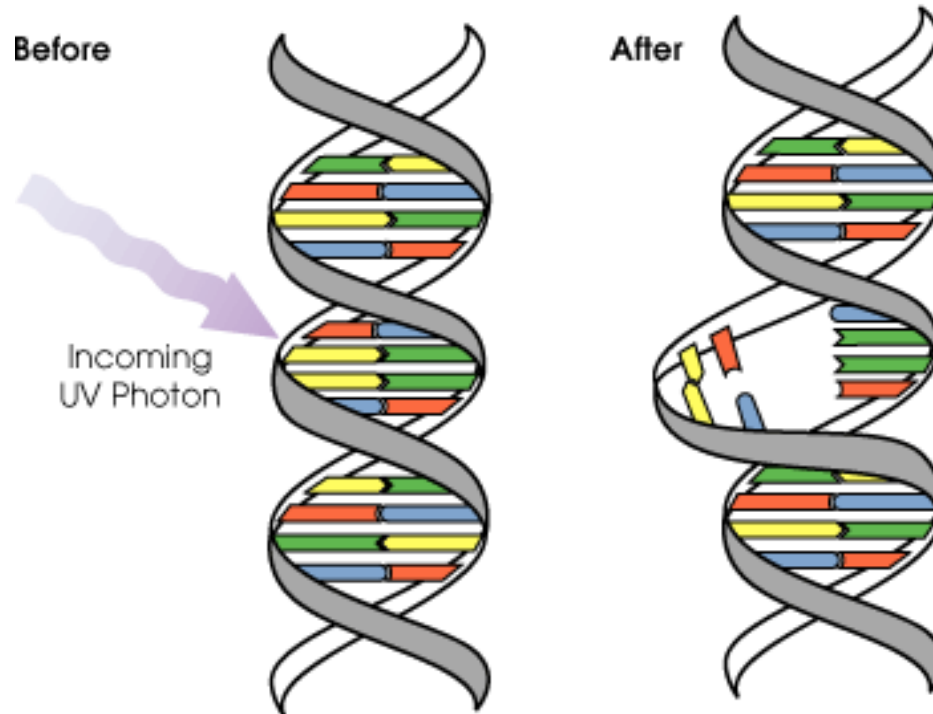
Origen de las radiaciones

- La radiación cósmica es de origen nuclear.
- Está compuesta por partículas cargadas energéticas (átomos totalmente ionizados + electrones) y radiación electromagnética.
- Los astronautas también están expuestos a neutrones secundarios producidos por reacciones nucleares de la radiación cósmica incidente con las estructuras de la nave o campamento espacial.



Efectos de las radiaciones ionizantes en los seres vivos

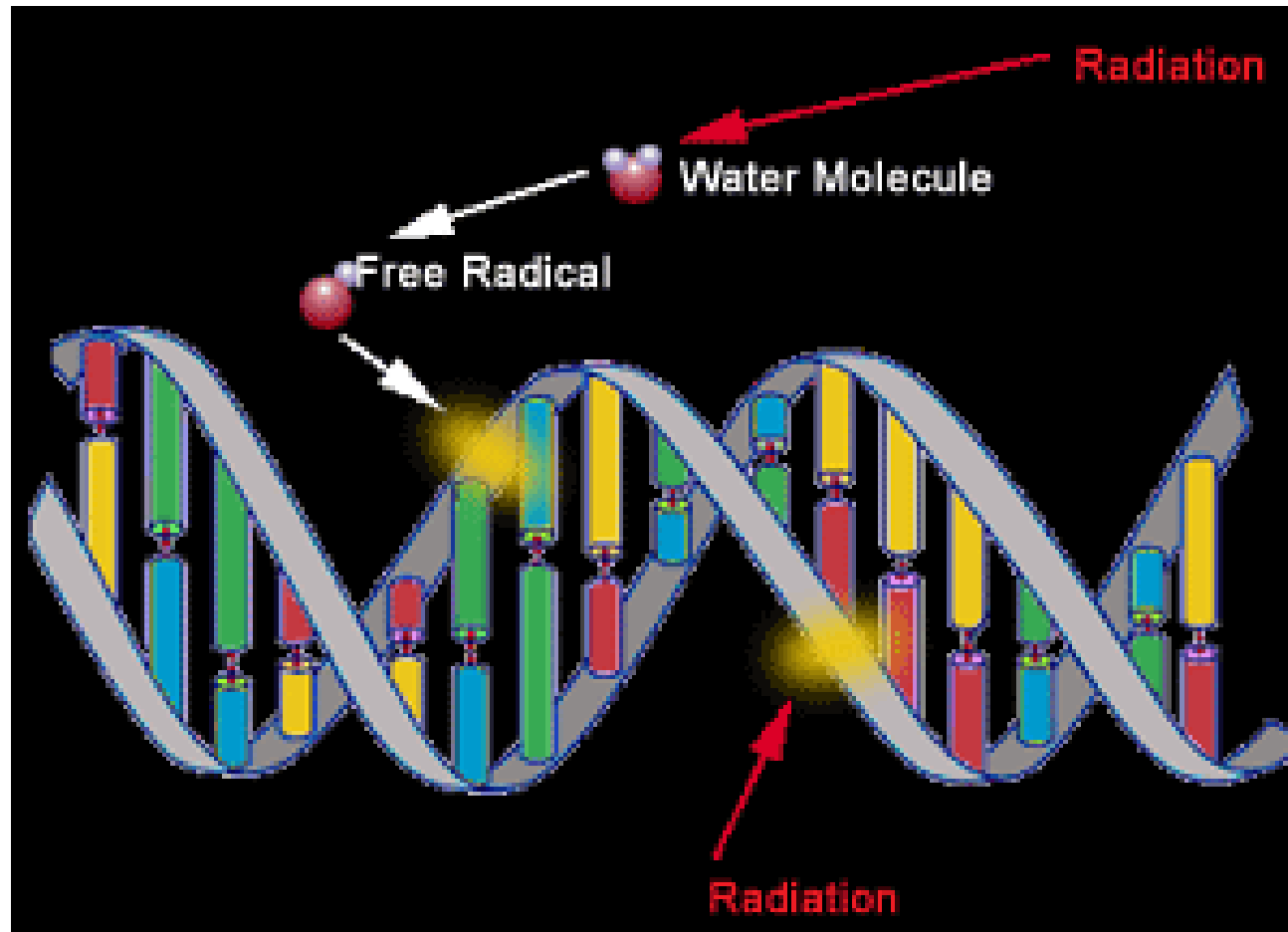
- Ruptura del DNA por interacción directa, produciendo anomalías en el funcionamiento celular.



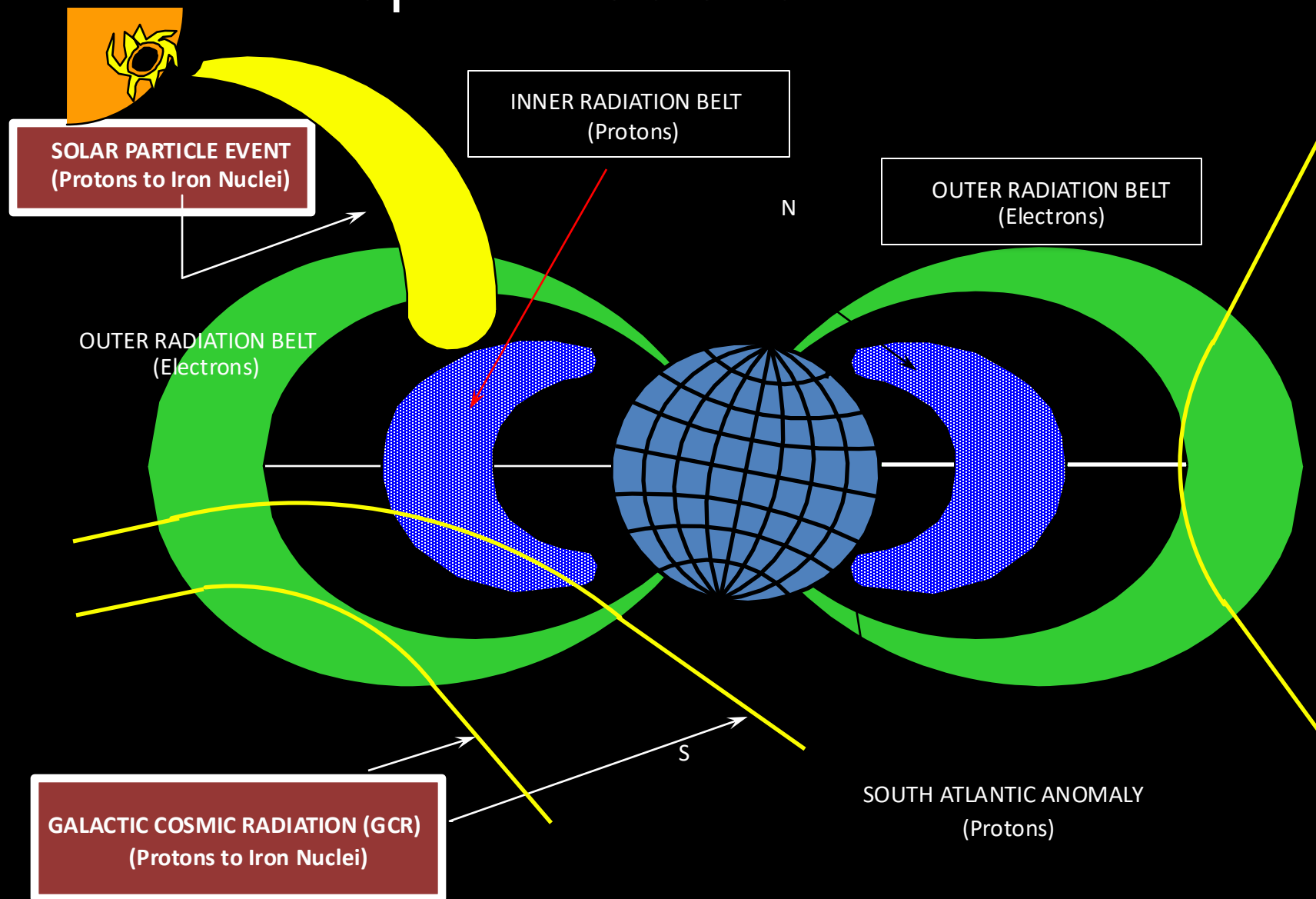
Ultraviolet (UV) photons harm the DNA molecules of living organisms in different ways. In one common damage event, adjacent bases bond with each other, instead of across the “ladder.” This makes a bulge, and the distorted DNA molecule does not function properly.

Los radicales libres también pueden producir daños en el DNA

- Los daños se producen no solamente por interacción directa de la radiación con el DNA. También son importantes los radicales libres producidos por las radiaciones ionizantes.



The Space Radiation Environment



Major sources of ionizing radiation of importance to manned missions in low-Earth orbit. Note the spatial distribution of the trapped radiation belts.

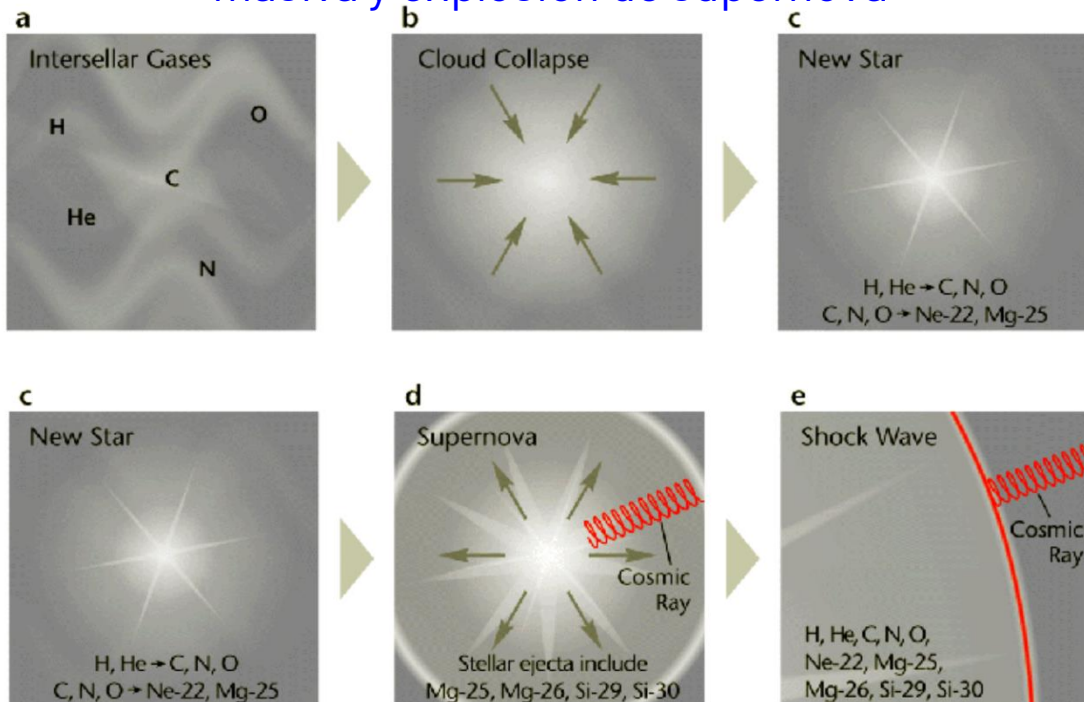
Interacción de la radiación con la materia

Fuente de GCR

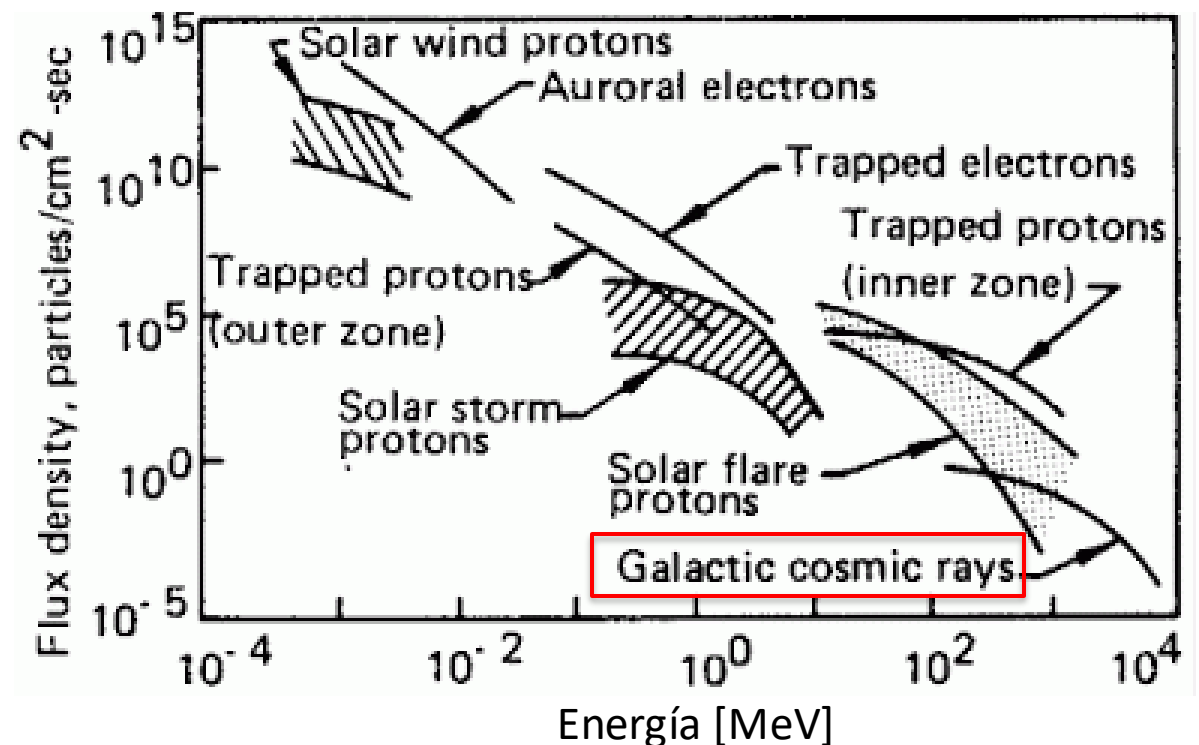
➤ Galactic Cosmic Rays (GCR)

- **Explosión de supernova**, disco de acreción de un agujero negro. (Lo veremos con más detalle si da tiempo.)
- **Protones (90%), partículas α (8%) y núcleos pesados (2%)**. Energías muy variables, **hasta 10 GeV/nucleón!**
Flujo muy inferior al viento solar o a las tormentas solares (SPE).
- Un gran número de rayos cósmicos son desviados por los campos magnéticos del Sol y la Tierra.

Secuencia de la formación de una estrella masiva y explosión de supernova



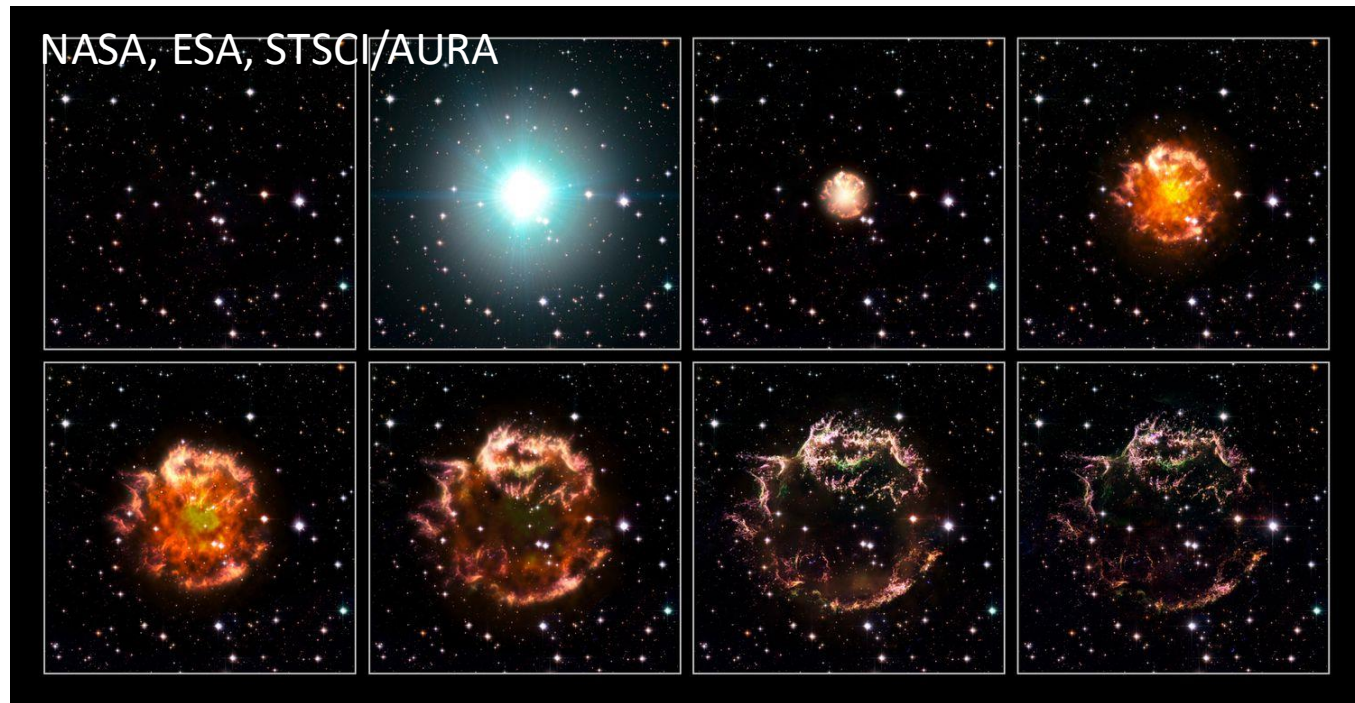
Flujo de energía y espectro de la radiación cósmica



Supernova

- Una supernova es una explosión estelar que ocurre durante las últimas etapas de una estrella masiva.
- La estrella original se colapsa en una estrella de neutrones, en un agujero negro, o se destruye por completo.
- La luminosidad máxima de una supernova puede ser comparable a la de una galaxia entera durante varias semanas o meses.
- El gas expulsado como consecuencia de la **explosión se expande hacia el medio interestelar**, proporcionando todos los elementos sintetizados durante toda la vida de la estrella y durante la misma explosión.

Casiopea A. Recreación de la secuencia desde la supernova de 1680 hasta el remanente actual, formado por la nebulosa visible con los fragmentos de la estrella que explotó.



Radiación cósmica Solar (SCR)

- El sol emite un **flujo continuo de partículas cargadas (plasma)** denominado **viento solar** formado, principalmente, por **protones** (núcleos de H) y **partículas α** (núcleos de He). Debido a su baja energía, el viento solar tiene poco efecto sobre las misiones espaciales.
- El sol también emite **partículas muy energéticas en las denominadas tormentas solares (SPE, Solar Particle Events)**. Esta emisión está directamente relacionada con las erupciones solares (**solar flares**) y las eyecciones de masa coronal (**CME, coronal mass ejections**). Los **SPE** están formados por **protones con energías de cientos de MeV, partículas α** y algunos núcleos pesados. Mucho más peligrosos para las misiones espaciales por su elevada energía. Afortunadamente, son fenómenos de relativamente baja frecuencia.

**Chorros de electrones magnetizados
en la corona solar**



**Violenta eyección de masa
en la corona solar**



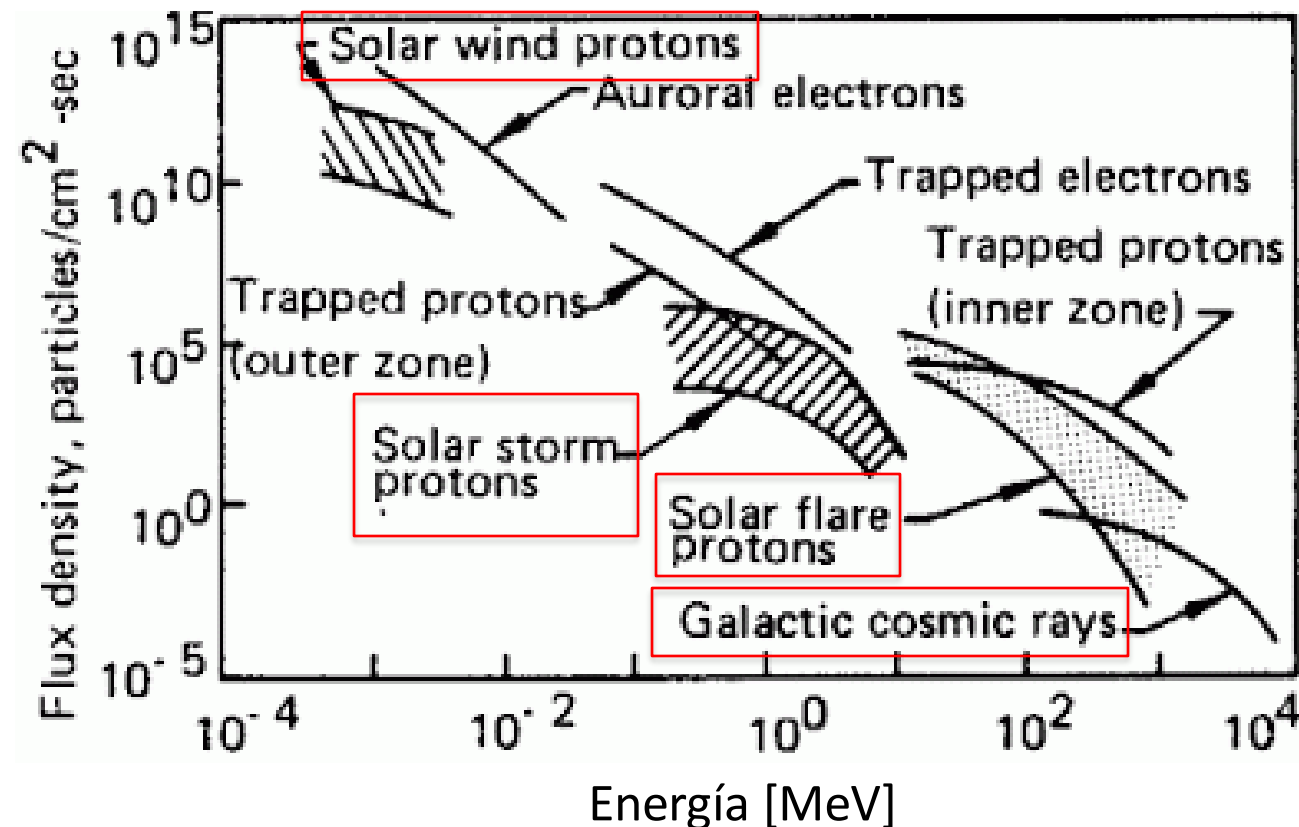
Radiación cósmica Solar (SCR)

- Existen evidencias de que la aceleración de iones y electrones puede producirse en las erupciones solares (**solar flares**) y, sobre todo, en las eyecciones de masa coronal (**CME**).
- Se ha encontrado que las partículas de alta energía (y las tormentas magnéticas en la Tierra) se producen principalmente en las CME.
- Se han medido protones, iones y electrones procedentes del sol con energías de hasta 100 MeV/nucleón. Son posibles mayores energías, hasta 500 MeV/nucleón, pero tienen lugar con mucha menor frecuencia. También se producen rayos X duros, rayos gamma y neutrones.
- Se ha observado que la emisión de partículas energéticas (electrones, protones y núcleos más pesados) depende de las manchas solares. La emisión tiene lugar cuando cambian rápidamente los campos magnéticos en dichas manchas y está normalmente acompañada de radiación electromagnética (rayos X y gamma).
- La emisión de partículas es más frecuente y con una mayor fluencia en el intervalo temporal comprendido entre dos años antes y cuatro años después del máximo solar. Las partículas más energéticas no se generan en la fase de máxima actividad solar.
- Lo veremos con más detalle al final si da tiempo.

Fuentes de radiación cósmica

- **Supernovas, Protones (90%), partículas α (8%) y núcleos pesados (2%).** Energías muy variables, **hasta 10 GeV por nucleón** (neutrones y protones)!!! Flujo muy inferior al viento solar o a los SPE.
- **Radiación solar** (SPE + viento solar).

Flujo de energía y espectro de la radiación cósmica



Interacción de partículas cargadas con la materia

Interacción de las partículas cargadas

– Clasificación.

- partículas cargadas **ligeras**: electrones (e^-) y positrones (e^+).
- partículas cargadas **pesadas**: protones, partículas α (${}_2\text{He}^4$) e iones pesados

– Mecanismo: interacción Coulombiana con electrones y núcleos del medio.

– Partículas pesadas: la **ionización** es el proceso principal.

- trayectoria prácticamente rectilínea
- alcance pequeño a energías de MeV: escaso poder de penetración (${}_2\text{He}^4$ de 4 MeV, 2.5 cm en aire).
- necesidad de protección frente a la irradiación interna (ingestión)

– Partículas ligeras (**electrones**): **ionización y emisión de radiación (bremsstrahlung)** (sólo electrones de alta energía en materiales pesados).

- trayectoria con grandes desviaciones
- mayor poder de penetración que los iones (**electrones de 3 MeV, 13 m en aire**).
- necesidad de protección frente a electrones primarios y a los fotones de bremsstrahlung: material ligero con espesor mayor que su alcance + capa fina de material pesado para absorber los fotones.

Paso de partículas cargadas por la materia

electrones



Camino recorrido
> Rango

iones

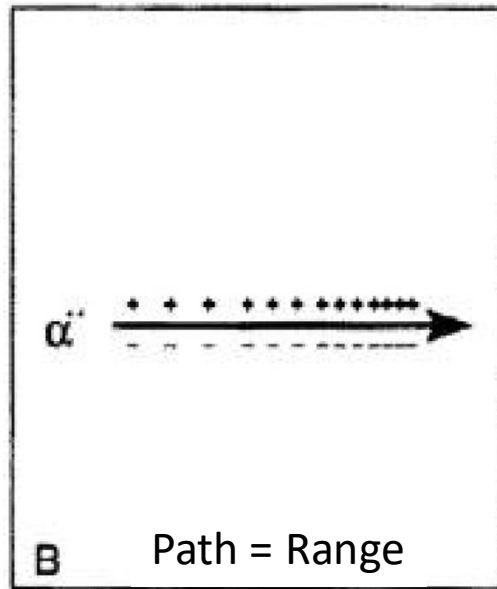


Camino recorrido
= Rango

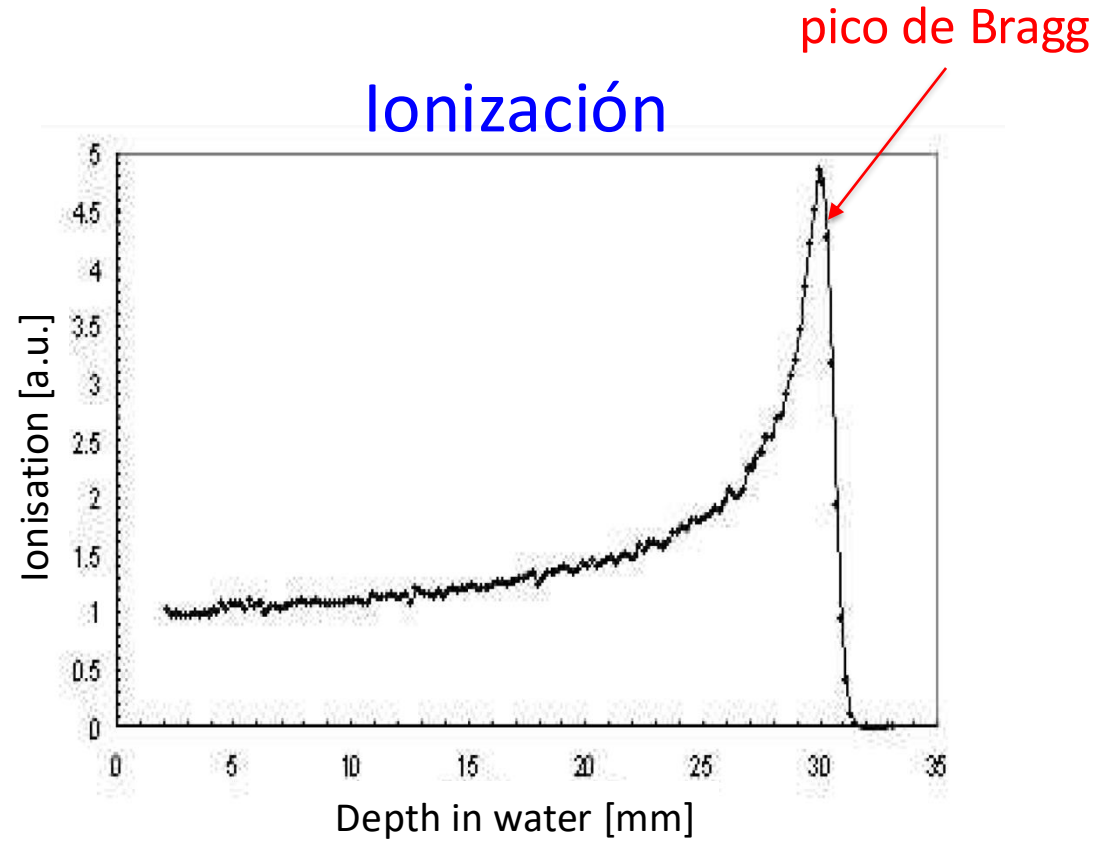
- **Poder de frenado** = energía perdida por unidad de camino recorrido = dE/dx .
- **Camino recorrido:** Mean Range: $S(T_0) = \int_0^{T_0} \left(\frac{dE}{dx}\right)^{-1} dE$
- **Rango:** penetración en la materia.

Paso de partículas pesadas por la materia

Trayectoria



Ionización



Poder de frenado de iones

- El **poder de frenado másico** se define como la pérdida de energía por unidad de camino recorrido multiplicado por la densidad del material ($dE/\rho dx$). Se expresa en MeV·m² / kg o más frecuentemente en MeV·cm²/g
- El **poder de frenado másico depende solo débilmente del material** (con la excepción del hidrógeno), ya que es proporcional a Z/A .
- En un amplio rango de energías, los poderes de frenado pueden describirse mediante la fórmula de *Bethe* con algunas correcciones:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n z^2 e^4}{m v^2} \left[\ln \left(\frac{2m v^2}{I^2 (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 \right]$$

donde el potencial de ionización I (eV) se puede aproximar por:

$$\frac{I}{Z} = 12 + \frac{7}{Z}, Z < 13 \quad \frac{I}{Z} = 9.76 + 58.8 Z^{-1.19}, Z \geq 13$$

siendo Z el número atómico del átomo blanco.

$$\beta = v/c$$

c = velocidad
de la luz

v = velocidad ion

m = masa del ion

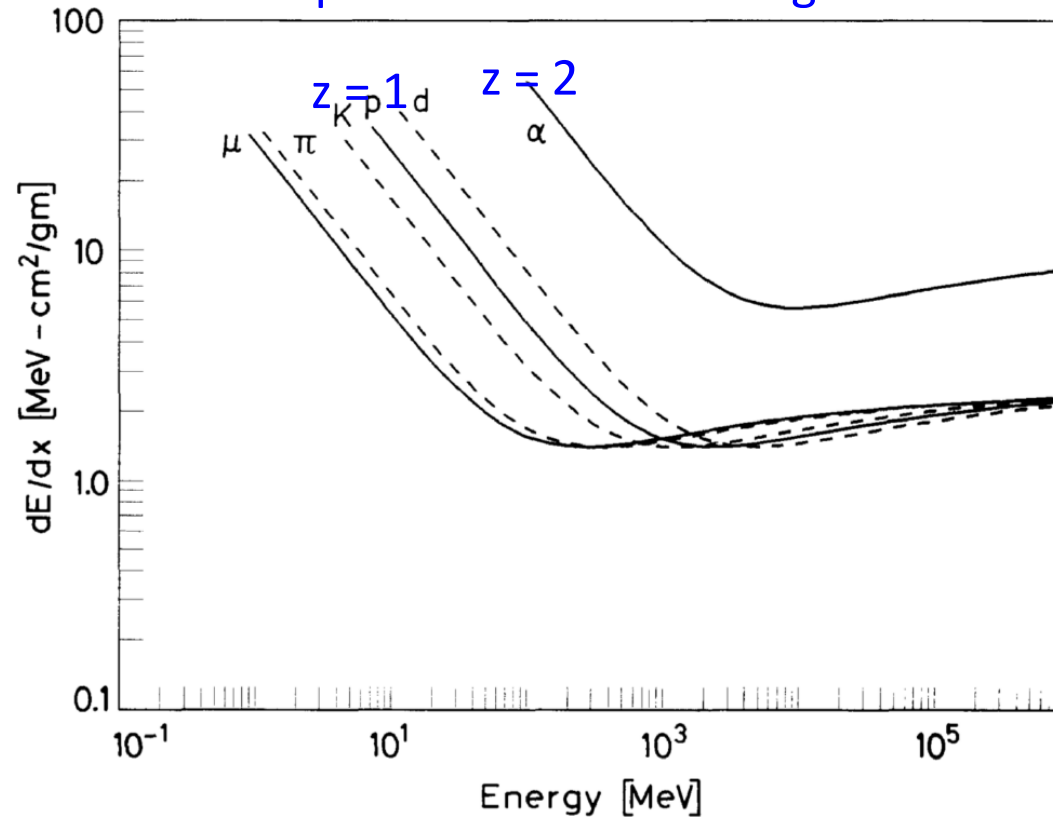
z = carga del ion

n = densidad electrónica
del blanco

Poder de frenado de iones

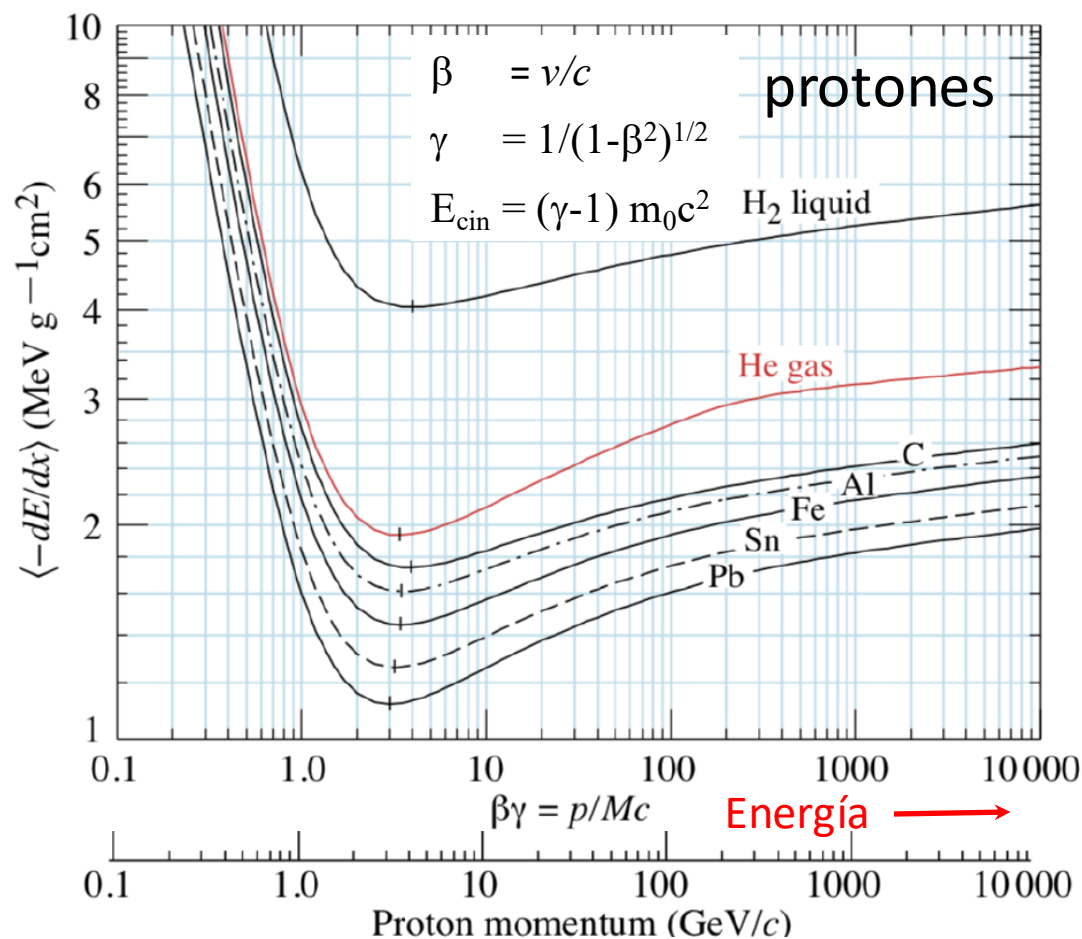
- A bajas energías, el poder de frenado está dominado por el término $1/v^2$, disminuyendo con la velocidad hasta $v = 0.96 c$, donde se alcanza un mínimo.
- El valor mínimo del poder de frenado es prácticamente el mismo para todas las partículas de la misma carga.
- A mayores energías, el poder de frenado aumenta debido al término $1/(1-\beta^2)$ en el logaritmo Coulombiano.

Dependencia con la energía



Dependencia de dE/dx con el material

- Mínimo poder de frenado para $\beta\gamma = 3.0 - 3.5$ (energías cinéticas 2.2 – 2.7 GeV, aprox).
- Energía total relativista $E_{\text{tot}} = (p^2c^2 + m_0^2c^4)^{1/2} = \gamma m_0c^2$. Energía cinética $E_{\text{cin}} = E_{\text{tot}} - m_0c^2 = (\gamma - 1) m_0c^2$.
- Masa en reposo del protón $m_p c^2 = 938.272 \text{ MeV} = 1836 m_e c^2$, m_e = masa en reposo del electrón.



Parámetros relativistas

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{cin}} + m_0c^2 = \gamma m_0c^2$$

$$\gamma = E_{\text{tot}} / m_0c^2 = 1/(1-\beta^2)^{1/2}$$

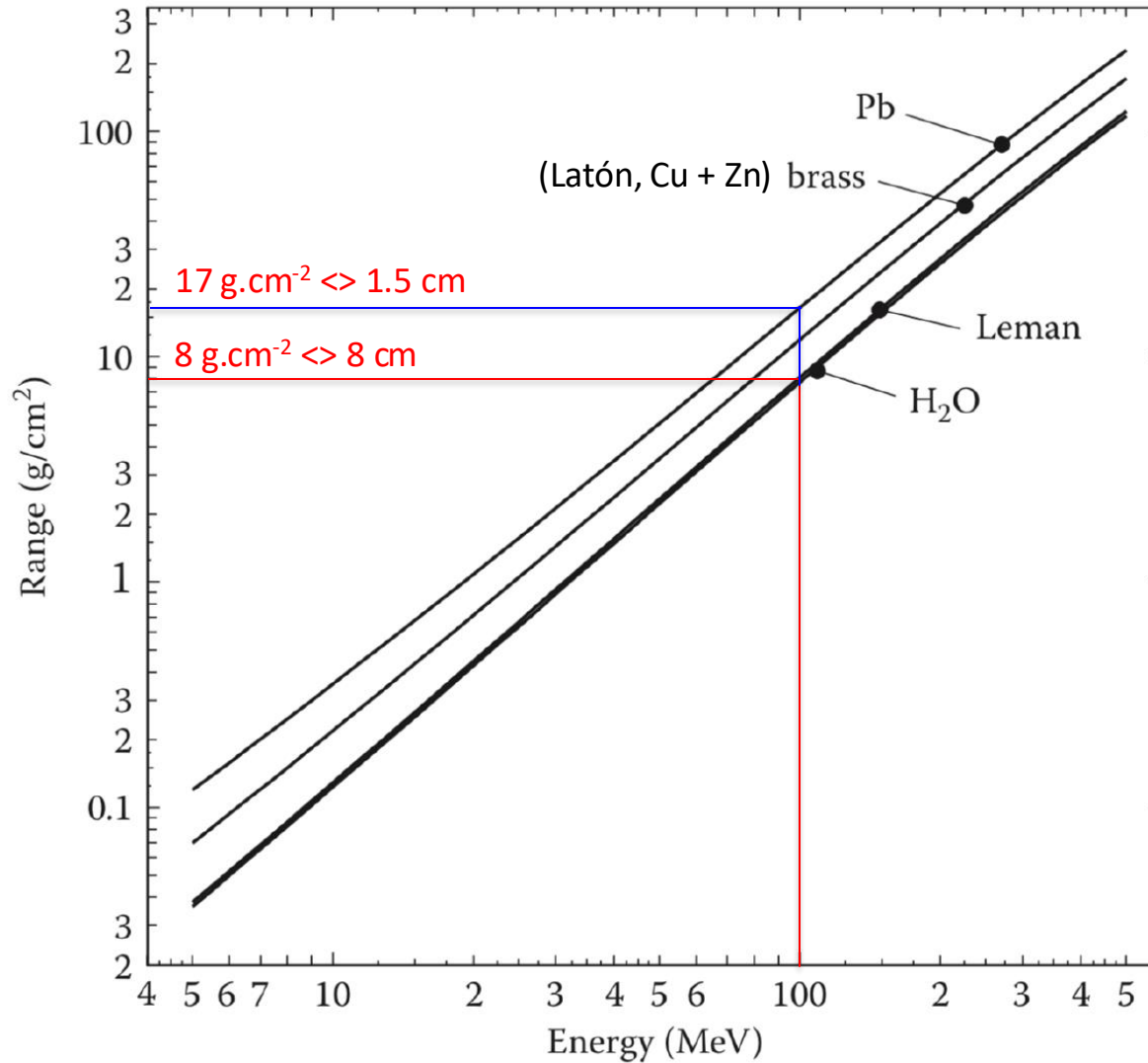
$$\beta = (1-1/\gamma^2)^{1/2} = v/c$$

$$c = \text{velocidad luz}$$

$$p = mv = \gamma m_0v$$

$$\beta\gamma = p / (m_0c)$$

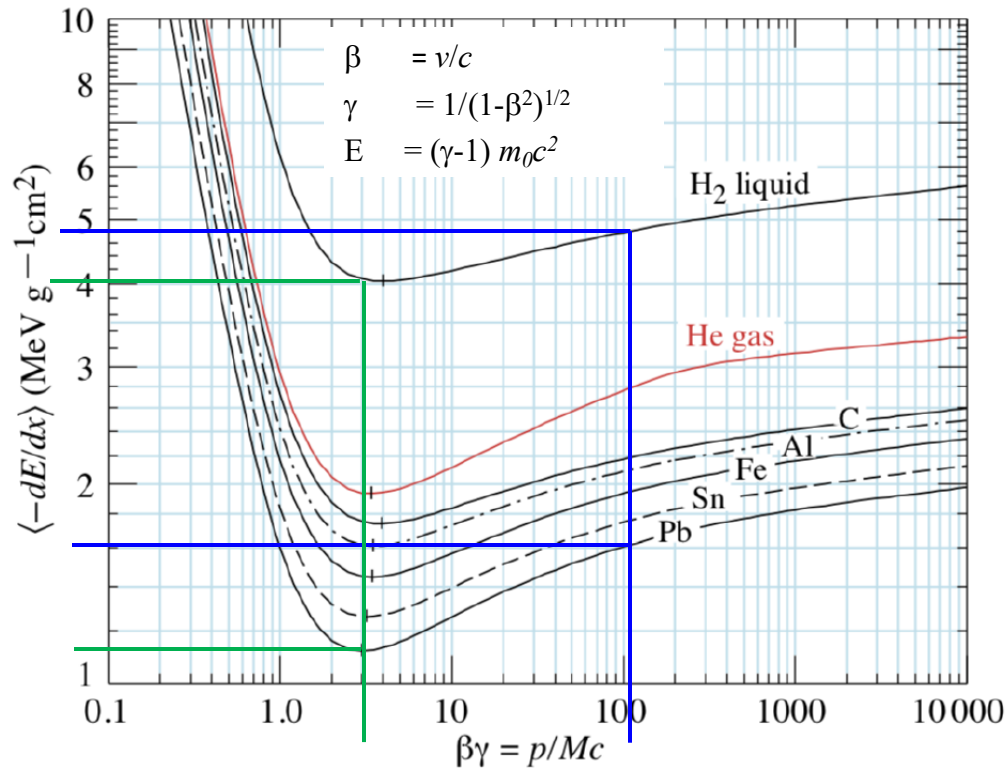
Rango de protones hasta 500 MeV en distintos materiales



$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho_2 \sqrt{A_1}}{\rho_1 \sqrt{A_2}}$$

Cuestiones

1. ¿En la interacción de un ión rápido con un átomo, lo más probable es una pequeña pérdida de energía del ión y que siga su trayectoria rectilínea?
2. La sección eficaz de dispersión elástica Coulombiana es fuertemente anisótropa.
3. Calcular el poder de frenado de protones de **energía total** 2 y 100 GeV en hidrógeno y plomo. Masa en reposo del protón = 938 MeV.



energía total = energía cinética + masa en reposo

$\gamma = \text{energía total} / \text{masa en reposo} (m_0 c^2)$

2 GeV

$$\gamma = (2 \times 10^3 + 938) \text{ MeV} / 938 \text{ MeV} = 3.13$$

$$\beta = (1 - 1/\gamma^2)^{1/2} = 0.947$$

$$\beta\gamma = 2.96$$

$$S_H = 4 \text{ MeV cm}^2/\text{g}, S_{Pb} = 1.1 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$$

100 GeV

$$\gamma = (10^5 + 938) \text{ MeV} / 938 \text{ MeV} = 107.6$$

$$\beta = (1 - 1/\gamma^2)^{1/2} = 0.999956$$

$$\beta\gamma = 107.59$$

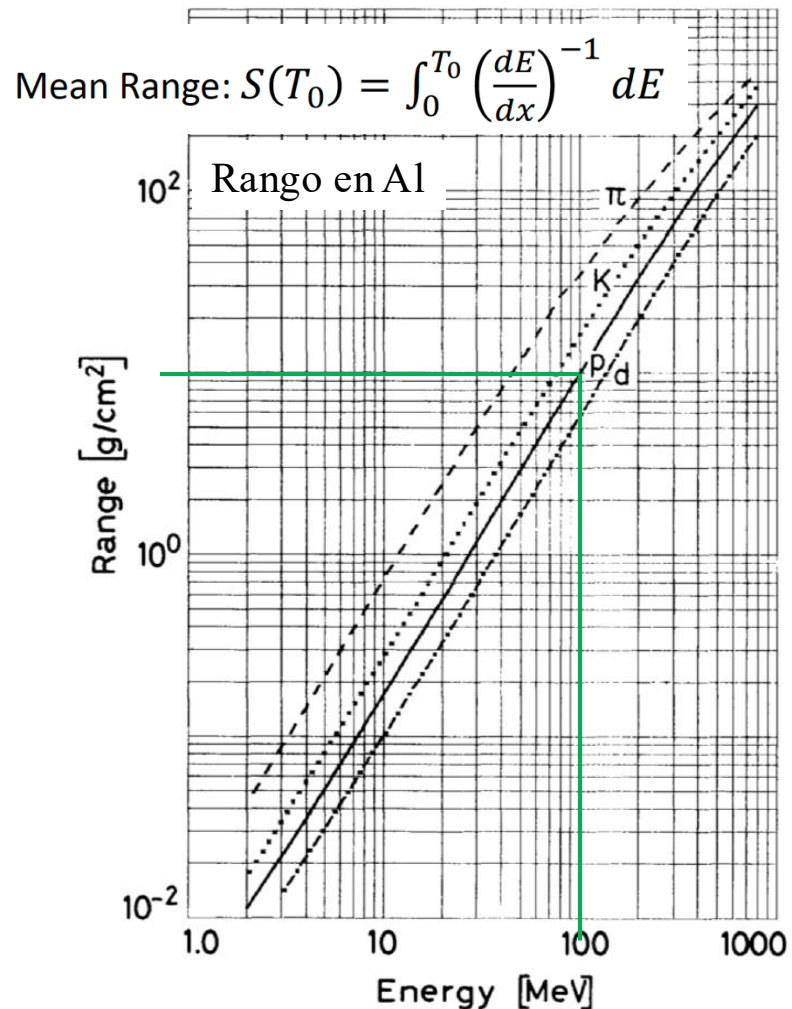
$$S_H = 4.8 \text{ MeV cm}^2/\text{g}, S_{Pb} = 1.6 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$$

Cuestiones

4. Definir el potencial medio de ionización/excitación que aparece en el poder de frenado de *Bethe* y dar una expresión aproximada para elementos ligeros.
5. La ionización máxima se produce cuando un ion entra en la materia.

Cuestiones

6. Determinar el rango de protones de 100 MeV en hidrógeno, aluminio y plomo. Determinar la masa de estos materiales necesaria para frenar un haz de protones de 100 MeV con una sección transversal $S = 1 \text{ m}^2$.



Tablas de rango de protones, iones de helio y electrones en la página web del NIST (*National Institute of Standard and Technology*):

<https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions>

Rango en H de las tablas NIST = 3.63 g/cm^2

Del gráfico y de las tablas NIST, Rango en Al = 10.01 g/cm^2

Rango en Pb de las tablas NIST = 16.52 g/cm^2

Masa de H = $3.63 \text{ g/cm}^2 \times S \text{ m}^2 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{m}^2 \times 10^{-3} \text{ kg/g}$

$$= \mathbf{36.3 \text{ kg}}$$

Masa de Al = $10.01 \text{ g/cm}^2 \times S \text{ m}^2 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{m}^2 \times 10^{-3} \text{ kg/g}$

$$= \mathbf{100.1 \text{ kg} = 2.76 \times 36.3 \text{ kg}}$$

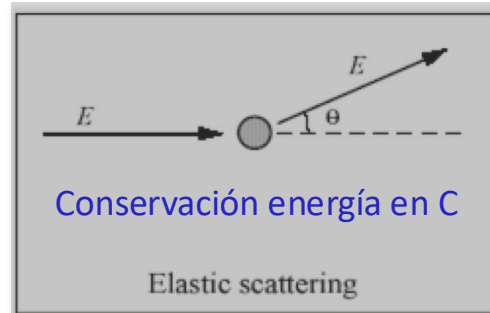
Masa de Pb = $16.52 \text{ g/cm}^2 \times S \text{ m}^2 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{m}^2 \times 10^{-3} \text{ kg/g}$

$$= \mathbf{165 \text{ kg} = 4.55 \times 36.3 \text{ kg}}$$

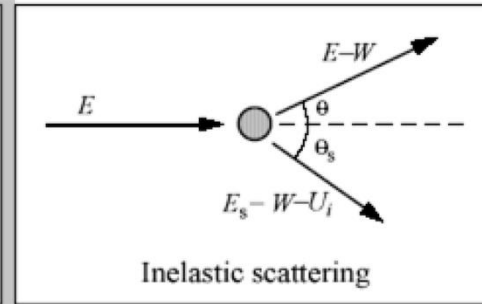
Interacción de electrones con la materia

➤ Procesos:

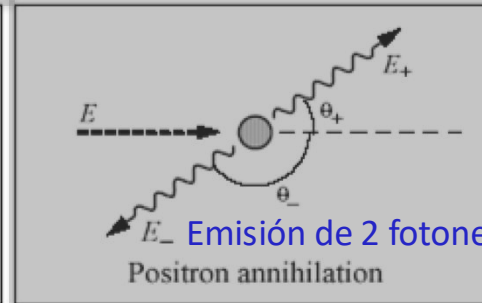
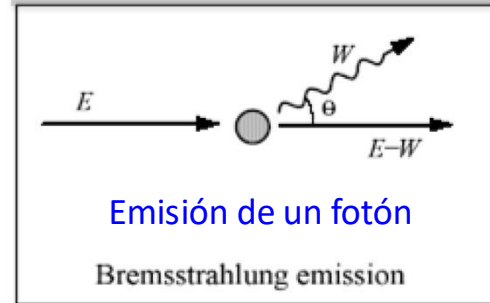
dispersión elástica



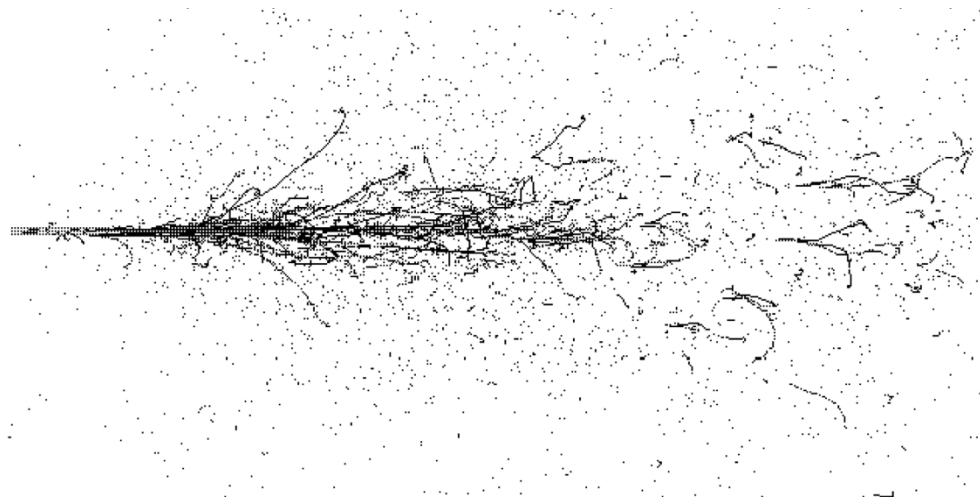
ionización



Bremsstrahlung



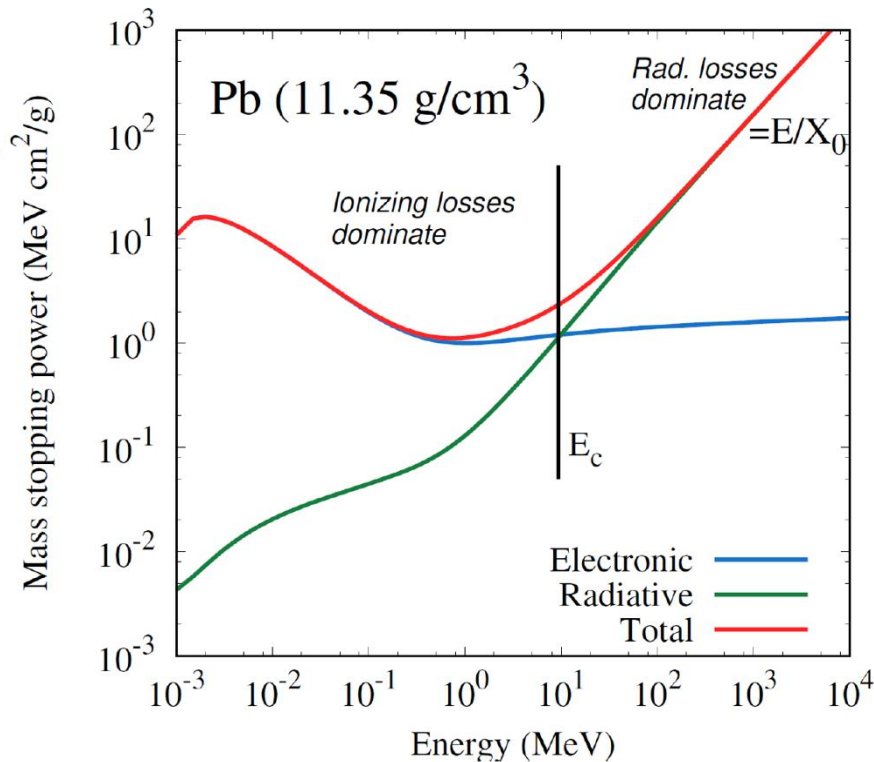
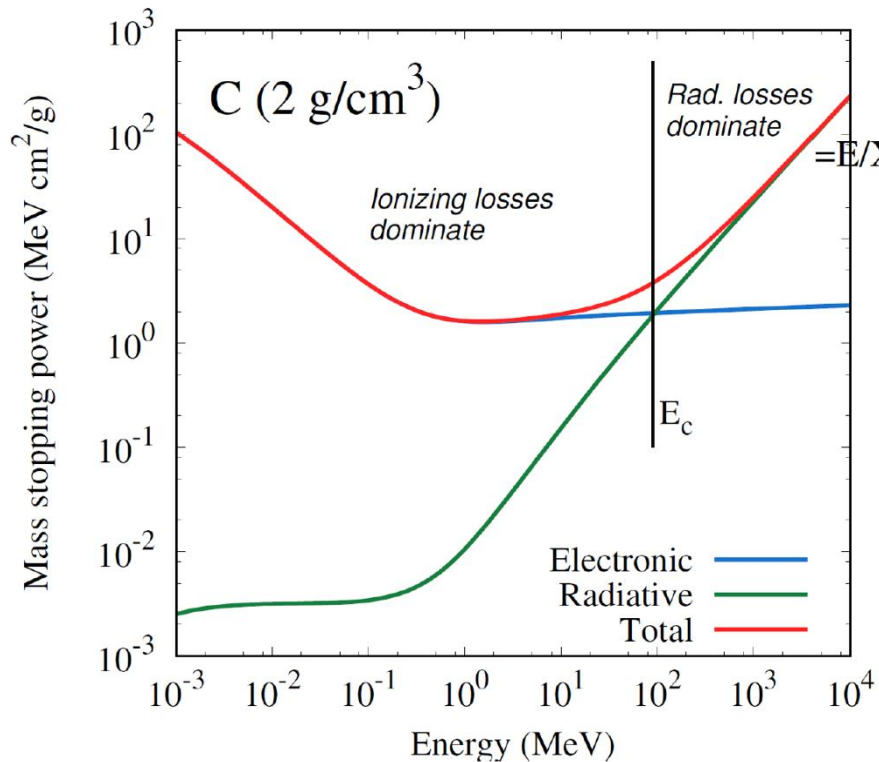
➤ Cascada resultante de la interacción de 1 electrón de 1 GeV con la materia.



- Generación de fotones.
- Generación de pares electrón-positrón.

Poder de frenado de electrones en elementos ligeros y pesados

- E_c = energía crítica (frenado electrónico = frenado radiativo).
- La energía crítica disminuye conforme aumenta el número atómico.



Energía crítica vs. Z

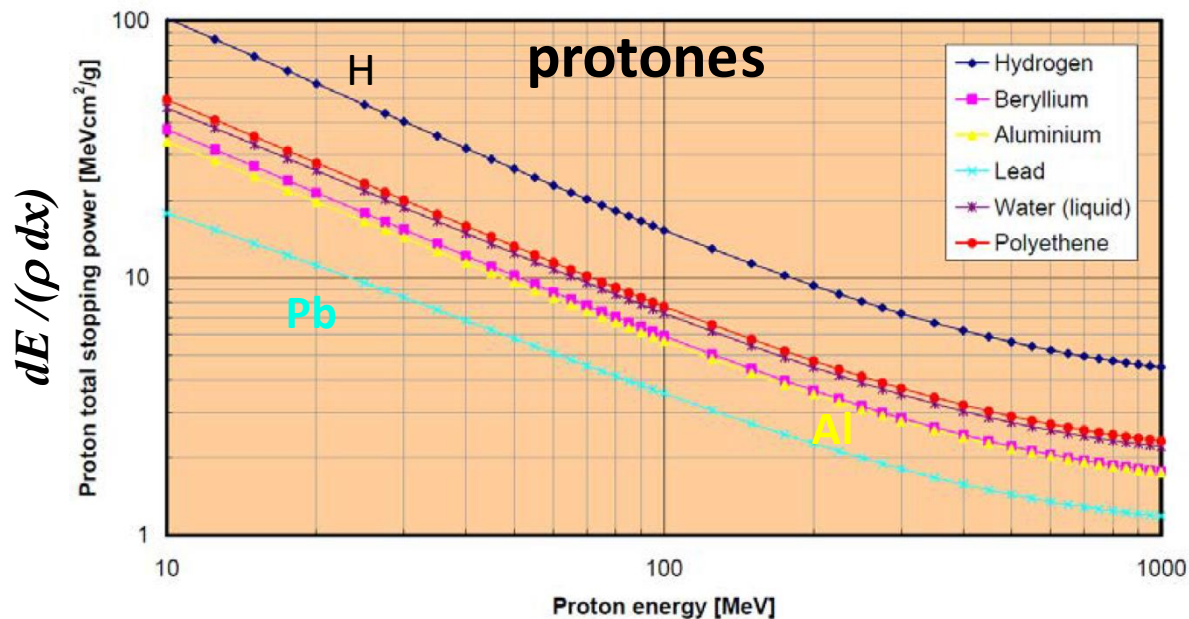
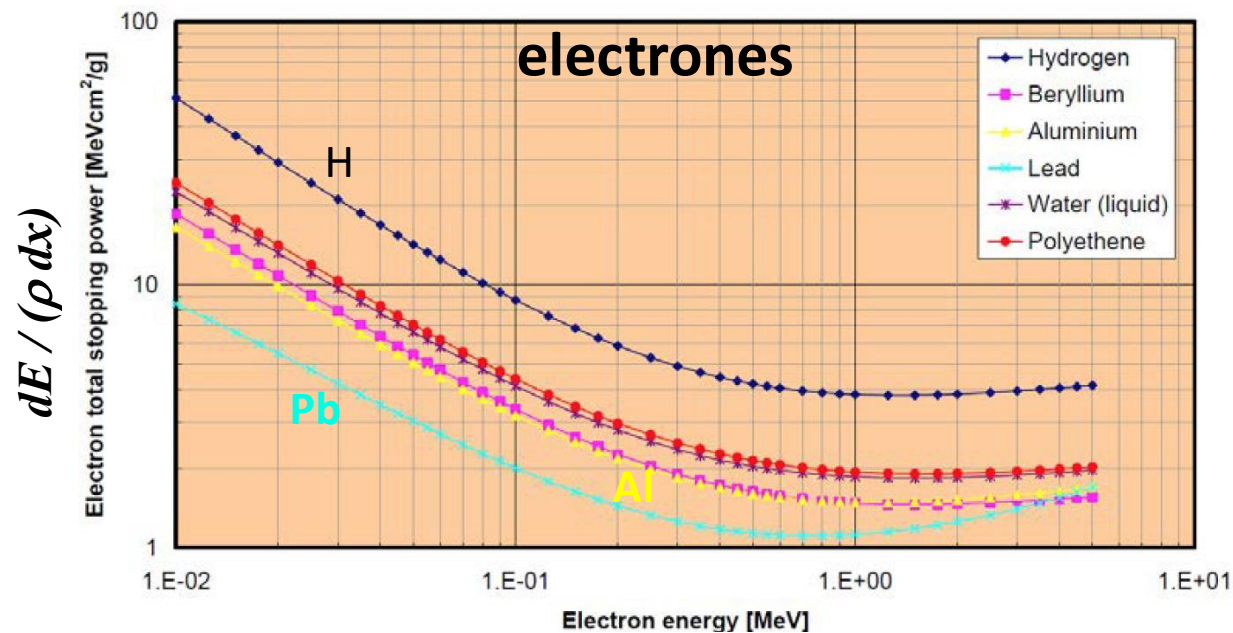
Material	Z	Density [g/cm ³]	E_c [MeV]
C	6	2.2	81.7
Al	13	2.7	42.7
Fe	26	7.8	21.7
Cu	29	8.96	19.4
W	74	19.3	8.0
Pb	82	11.4	7.4

Poder de frenado protones vs. electrones

- **Poder de frenado** = *pérdida de energía por unidad de camino recorrido* = dE / dx .
- El poder de frenado disminuye conforme aumenta la energía del proyectil hasta muy altas energías (relativistas).
- Rango $R(E)$ de iones con energía E :

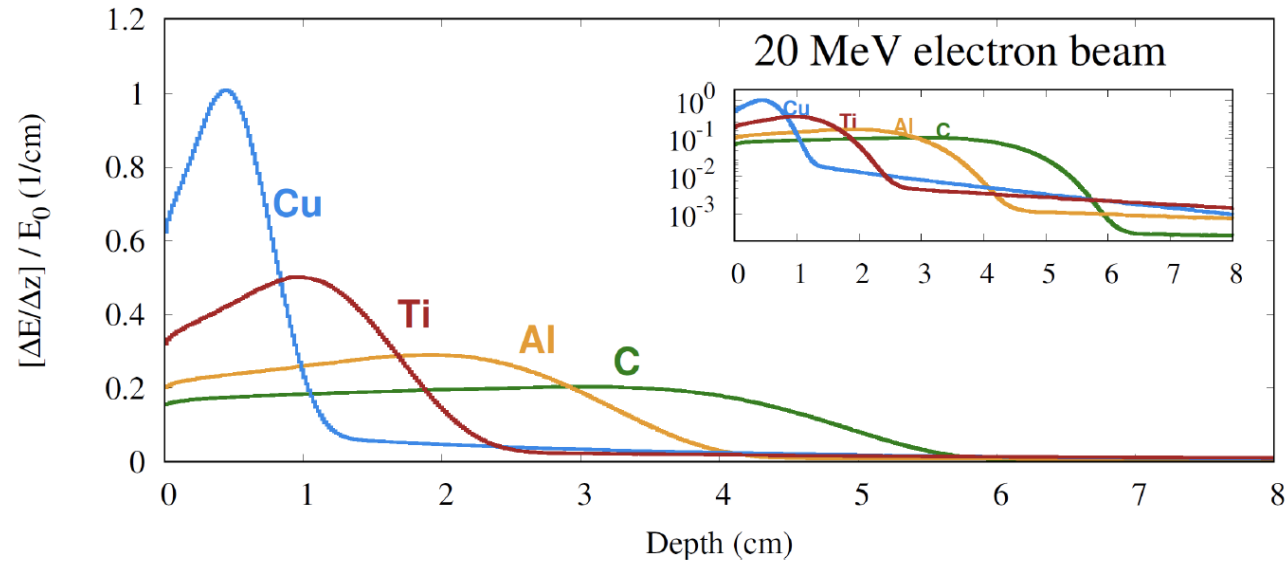
$$R(E) = \int_0^E \frac{dE}{dE / dx}$$

- El **poder de frenado de los protones es mayor que el de los electrones**, por lo que su alcance o penetración en la materia es menor.
- **Los materiales ligeros frenan las partículas cargadas mejor que los materiales pesados.**

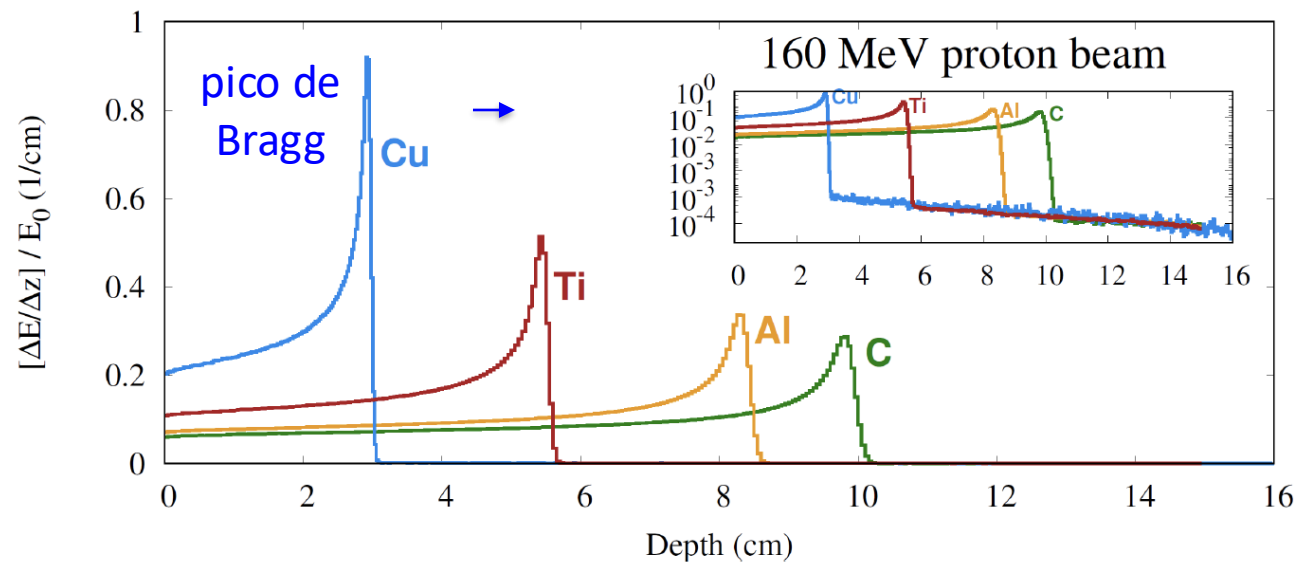


Deposición de energía protones vs. electrones

Electrones de 20 MeV



Protones de 160 MeV



Cuestiones

7. Comparar el poder de frenado electrónico y radiativo de electrones de 100 MeV en hidrógeno y plomo mediante las tablas del NIST. Determinar la longitud del camino recorrido L (no el alcance)

(<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>).

H: $S_{el} = 5.259 \text{ MeV.cm}^2/\text{g}$, $S_{rad} = 1.295 \text{ MeV.cm}^2/\text{g}$, radiación 10.24%, $\rho L = 18.31 \text{ g/cm}^2$

Pb: $S_{el} = 1.423 \text{ MeV.cm}^2/\text{g}$, $S_{rad} = 14.36 \text{ MeV.cm}^2/\text{g}$, radiación 76.17%, $\rho L = 18.94 \text{ g/cm}^2$

8. Determinar el espesor de un blindaje de poliestireno ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$) para un haz combinado de protones y electrones de 10 GeV y $10 \text{ GeV}/1836 = 5.5 \text{ MeV}$, respectivamente. Suponer que la sección transversal del haz es $S = 1 \text{ m}^2$. Utilizar las tablas del NIST.

Rango de protones de 10 GeV en CH = $4.842 \times 10^3 \text{ g/cm}^2$, $L_p = 48.42 \text{ m}$.

Masa de CH = $4.842 \times 10^3 \text{ g/cm}^2 \times S \text{ m}^2 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{m}^2 \times 10^{-3} \text{ kg/g} = \mathbf{48.42 \text{ Toneladas !!}}$

Camino recorrido de e^- de 5.5 MeV = 2.897 g/cm^2 , $L_e = 2.897 \text{ cm}$ (máx)

Masa de CH = $2.897 \text{ g/cm}^2 \times S \text{ m}^2 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{m}^2 \times 10^{-3} \text{ kg/g} = 28.97 \text{ kg}$

Cuestiones

9. Los elementos pesados son mas efectivos (menor valor del parámetro ρx) para frenar los electrones de alta energía.
10. El alcance de los electrones es mayor que el de los iones.
11. Los electrones describen una trayectoria rectilínea al atravesar la materia.
12. La energía crítica de los electrones es mucho mayor que la de los iones.
13. La ionización es el proceso más importante cuando electrones rápidos de muy alta energía atraviesan materiales pesados de alto número atómico.
14. El perfil de deposición de energía de electrones rápidos presenta un pico al final de su alcance (pico de *Bragg*).
15. El perfil de deposición de electrones rápidos tiene forma de parábola invertida debido a: i) la variación del poder de frenado con la energía, ii) la dispersión angular, iii) la radiación de frenado o *Bremsstrahlung*, y iv) sólo tiene esa forma cuando pasan por materiales ligeros.

Fluencia, poder de frenado y dosis

– Se definen la **fluencia**, el flujo, el poder de frenado másico y la dosis como:

Fluencia: $\Phi \equiv \frac{dN}{dA} \frac{\text{protons}}{\text{cm}^2}$

Flujo: $\dot{\Phi} \equiv \frac{d\Phi}{dt} \frac{\text{protons}}{\text{cm}^2 \text{ s}}$

Poder de frenado másico: $\frac{S}{\rho} \equiv -\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}$

Dosis: $D \equiv \frac{\text{J}}{\text{kg}}$

– Relación fundamental:

$$D \equiv \frac{\text{energy}}{\text{mass}} = \frac{-(dE/dx) \times dx \times dN}{\rho \times dA \times dx} = \frac{S}{\rho} \Phi$$

$$D = 0.1602 \Phi \frac{S}{\rho} \text{ Gy} \quad \Phi \text{ in Gp/cm}^2$$

$$S/\rho \text{ in Mev/(g/cm}^2)$$

Cuestiones

16. Determinar la tasa de dosis impartida por un haz protones de 100 MeV en hidrógeno, plomo y agua. El flujo de protones es $\Phi' = 10^5$ protones/cm²/s. Utilizar las tablas del NIST.

Unidad especial: 1 Gray = 1 J/kg

$$\mathbf{H}: S_{el} = 15.29 \text{ MeV.cm}^2/\text{g}, D' = S_{el} \times \Phi' = 2.446 \times 10^{-7} \text{ W/g} = 0.2446 \text{ mGy/s}, \rho L = 3.633 \text{ g/cm}^2$$

$$\mathbf{Pb}: S_{el} = 1.423 \text{ MeV.cm}^2/\text{g}, D' = S_{el} \times \Phi' = 2.277 \times 10^{-8} \text{ W/g} = 0.02277 \text{ mGy/s}, \rho L = 16.52 \text{ g/cm}^2$$

$$\mathbf{H_2O}: S_{el} = 5.443 \text{ MeV.cm}^2/\text{g}, D' = S_{el} \times \Phi' = 8.709 \times 10^{-8} \text{ W/g} = 0.08709 \text{ mGy/s}, \rho L = 7.718 \text{ g/cm}^2$$

17. Calcular la tasa de dosis impartida por los electrones que neutralizan a los protones en el ejemplo anterior. Utilizar las tablas del NIST.

Energía cinética de los electrones = 100 MeV / 1836 = 54.47 keV

$$\mathbf{H}: S_{el} = 13.27 \text{ MeV.cm}^2/\text{g}, D' = S_{el} \times \Phi' = 2.123 \times 10^{-7} \text{ W/g} = 0.2123 \text{ mGy/s}, \rho L = 2.334 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$$

$$\mathbf{Pb}: S_{el} = 2.821 \text{ MeV.cm}^2/\text{g}, D' = S_{el} \times \Phi' = 4.514 \times 10^{-8} \text{ W/g} = 0.04514 \text{ mGy/s}, \rho L = 1.185 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^2$$

$$\mathbf{H_2O}: S_{el} = 6.166 \text{ MeV.cm}^2/\text{g}, D' = S_{el} \times \Phi' = 9.866 \times 10^{-8} \text{ W/g} = 0.09866 \text{ mGy/s}, \rho L = 5.103 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$$

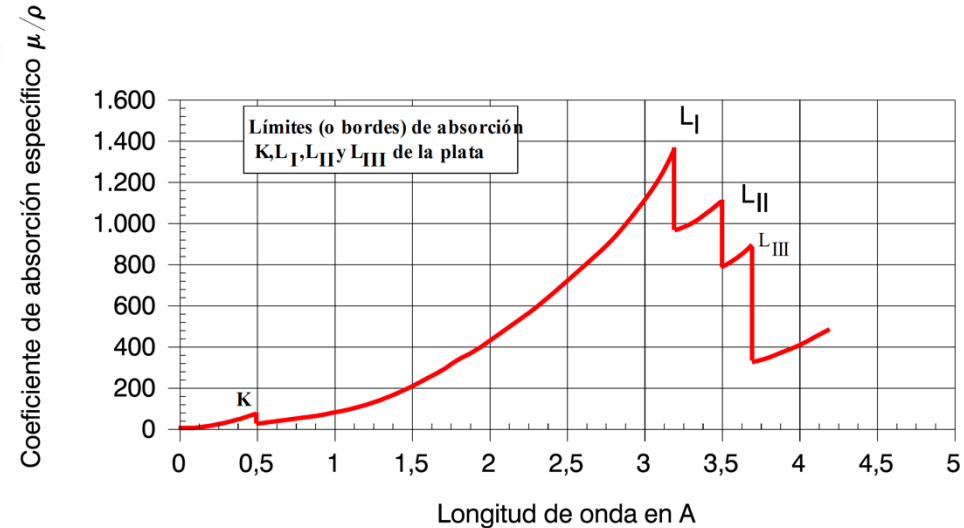
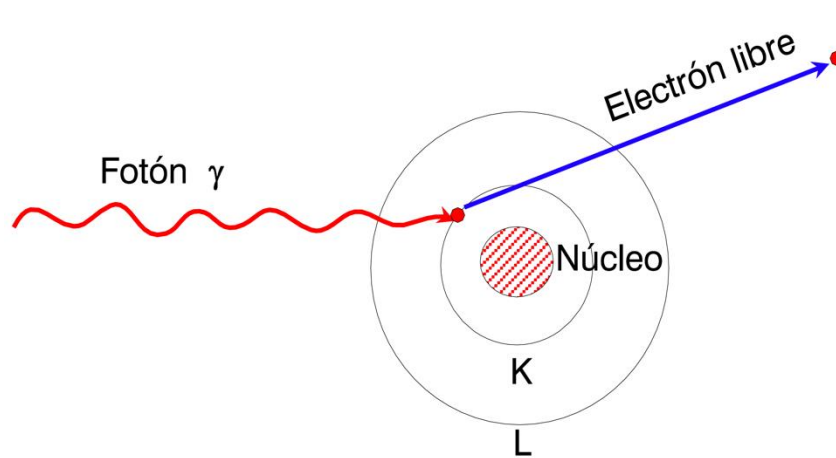
Interacción de la radiación electromagnética con la materia

Interacción de la radiación con la materia

– Efecto fotoeléctrico. El fotón se absorbe y arranca un electrón del átomo.

- Solo puede ocurrir si la energía del fotón excede la energía de enlace del electrón U_i .
- El electrón se emite con la energía del fotón menos U_i .
- Si el efecto fotoeléctrico tiene lugar con un electrón de las capas internas, la emisión del electrón suele ir acompañada de transiciones electrónicas para rellenar el hueco, emitiendo radiación a energías características.

Efecto fotoeléctrico



Interacción de la radiación con la materia

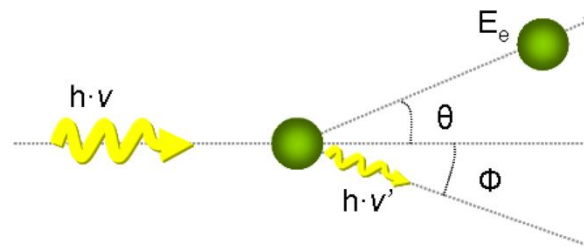
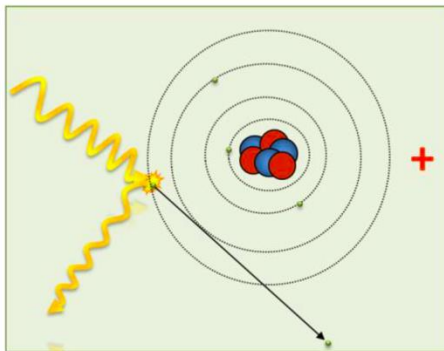
– **Dispersión *Compton*.** Es la **dispersión incoherente o inelástica de un fotón por un electrón.**

- El fotón cede parte de su energía al electrón y se dispersa un cierto ángulo.
- Es el proceso dominante a energías de MeV.
- La sección eficaz se escala aproximadamente con Z , es decir, tiene una dependencia más débil con el número atómico que el efecto fotoeléctrico (Z^2) y la producción de pares (Z^2).
- El rango de energía dominado por el efecto *Compton* se reduce para materiales pesados.

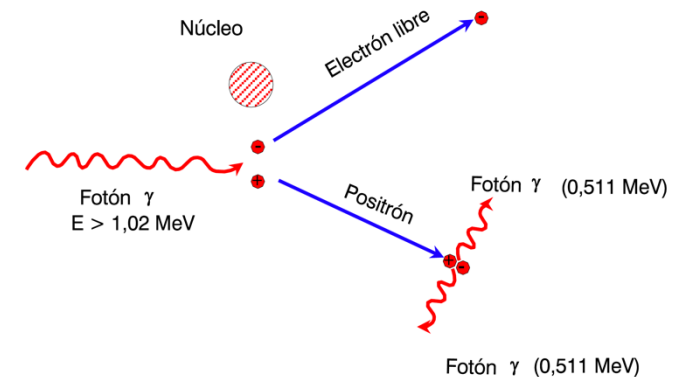
– **Producción de pares electrón-positrón.**

- Tiene lugar a altas energías de los fotones. La energía umbral es 1.022 MeV, es decir, la energía en reposo del par electrón-positrón.
- La energía a partir de la cual es dominante disminuye conforme aumenta Z . Es de unos 25 MeV para el carbono y 5 MeV para el plomo.
- Se pueden producir nuevos fotones en el *Bremsstrahlung* de electrones y positrones de alta energía.

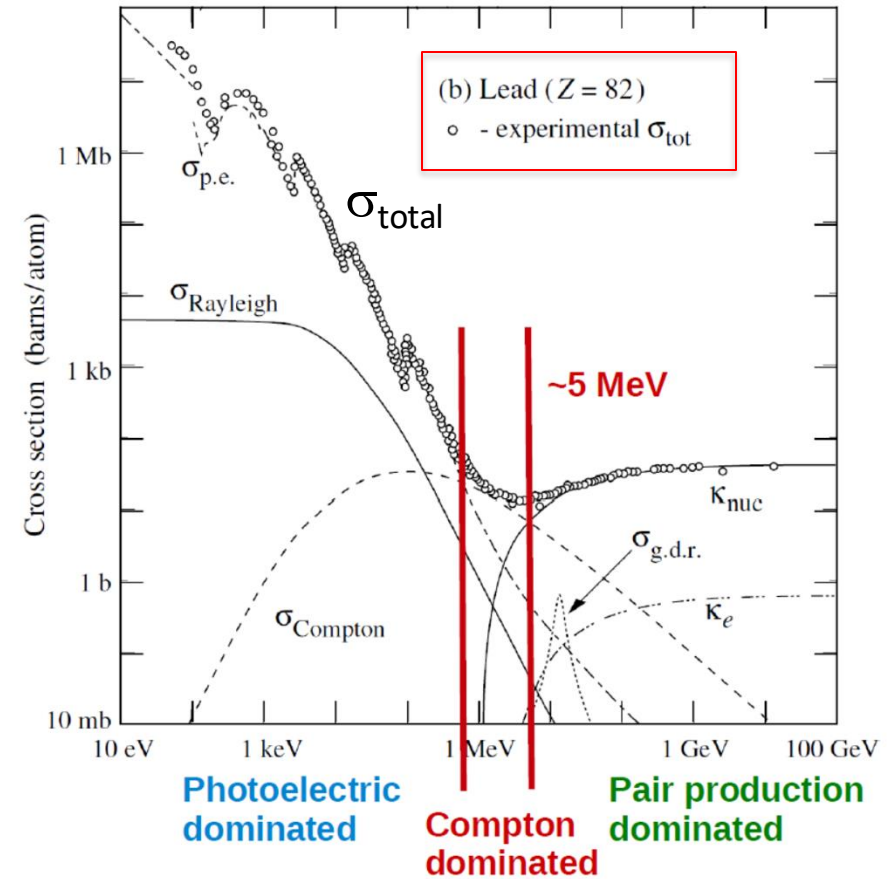
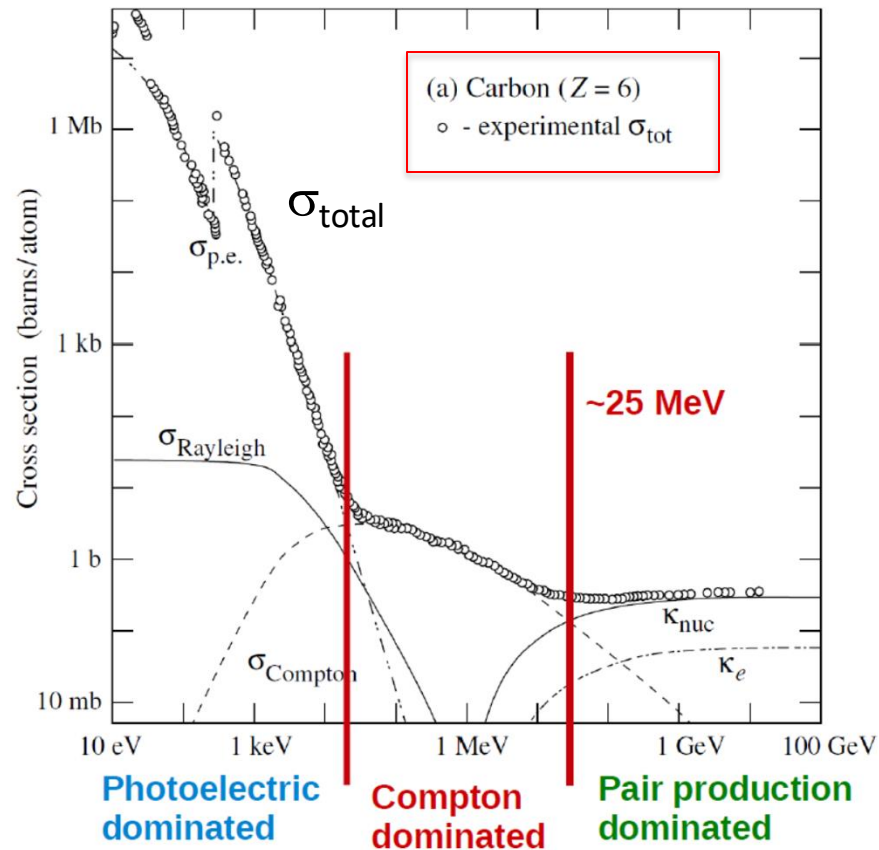
Efecto Compton



Producción de pares

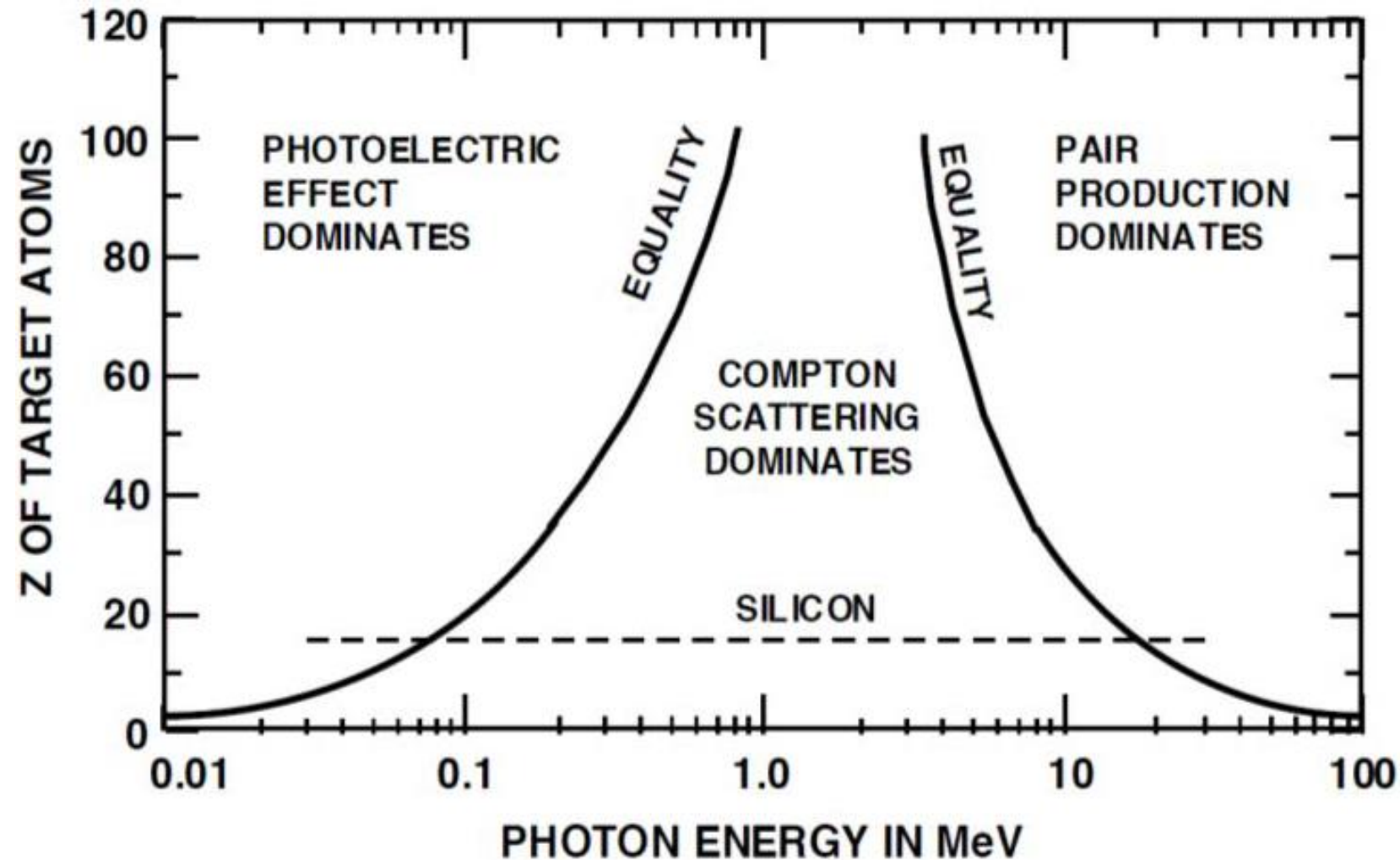


Secciones eficaces de los fotones



Ventana Compton

Importancia relativa de las interacciones en función del número atómico



Atenuación de la radiación

– Leyes aproximadas:

- I = Intensidad de radiación: flujo de fotones, fotones/(m².s)
- μ = coeficiente de atenuación teniendo en cuenta los 3 efectos: fotoeléctrico, *Compton* y producción de pares.
- Aproximación de primera colisión:

atenuación exponencial $I = I_0 e^{-\mu x}$; plana ; I_0 = intensidad incidente [fotones/(m².s)]

atenuación exponencial
+
geométrica $I = \frac{Q}{4\pi r^2} e^{-\mu r}$; esférica; Q = fotones/segundo

– Factor de acumulación:

- Para tener en cuenta la contribución de la radiación dispersa, se define el **factor de acumulación** como el cociente entre la intensidad de radiación total (primera colisión + dispersa) y la intensidad de primera colisión:

$$B(E, \mu x) = (N_p + N_d) / N_p$$

N_p = nº de fotones
de 1ª colisión

- La intensidad corregida en un punto x será

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} B(E, \mu x)$$

N_d = nº de fotones
dispersados

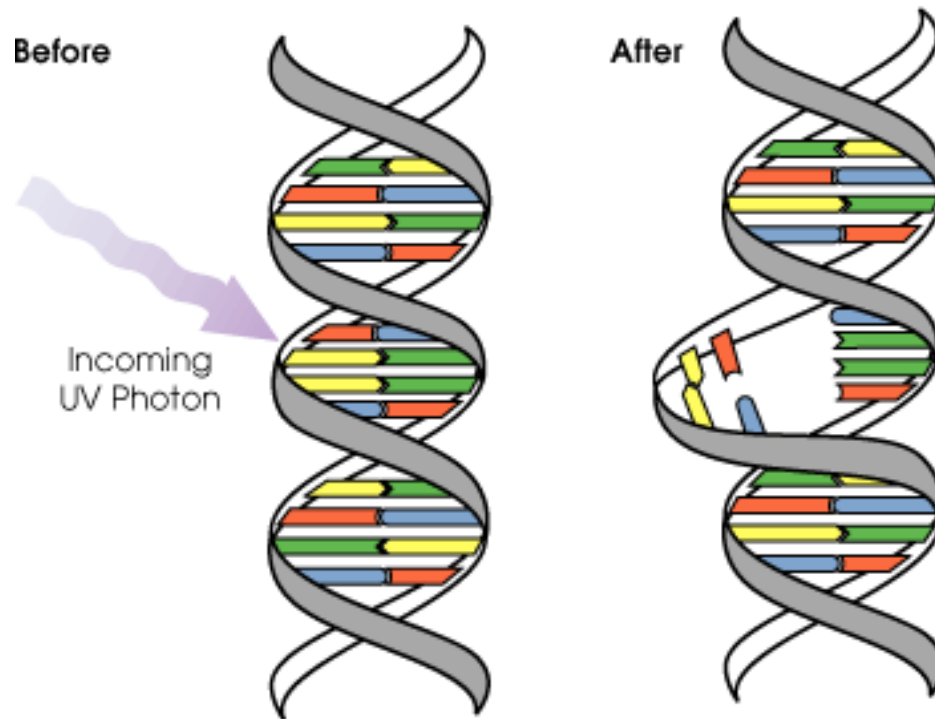
Cuestiones

1. Los fotones de alta energía se absorben mejor en materiales pesados.
2. La dispersión *Compton* es muy efectiva para absorber la radiación electromagnética.
3. Los iones de alta energía penetran en la materia más que la radiación electromagnética de la misma energía.
4. Los neutrones tienen un gran poder de penetración.
5. Los neutrones provienen directamente de la radiación cósmica.
6. Los neutrones se absorben principalmente mediante materiales pesados.

Unidades radiológicas y límites de dosis

Efectos de las radiaciones ionizantes en los seres vivos

- Ruptura del DNA por interacción directa, produciendo anomalías en el funcionamiento celular.



Ultraviolet (UV) photons harm the DNA molecules of living organisms in different ways. In one common damage event, adjacent bases bond with each other, instead of across the “ladder.” This makes a bulge, and the distorted DNA molecule does not function properly.

Magnitudes y unidades radiológicas

- La **energía depositada por la radiación** induce la rotura de moléculas, creación de radicales libres, etc. que conducen a la **alteración o destrucción de las células**
- El **daño biológico depende de la energía depositada localmente**, que está íntimamente relacionada con la ionización producida en el material.
- Se define la **dosis absorbida (D)** como la **energía media depositada** (por la radiación) **por unidad de masa**.
- Unidad de dosis **J/kg = gray (Gy)**, unidad especial **rad** ($1R = 100 \text{ erg/g}$).
1 Gy = 100 rad
- **Factor de ponderación (w)**: factor que se aplica a las distintas radiaciones para evaluar y comparar sus efectos.
- **Dosis equivalente (H)**: **$H = D \times w$** , **D = dosis absorbida**.
- Unidad de dosis equivalente: **sievert (1 Sv = 1 J/kg)**, unidad especial rem: **1 Sv = 100 rem**

Factor de ponderación

– Varios tipos de radiaciones:

$$H_T = \sum_R w_R \times D_R$$

R = tipo de radiación

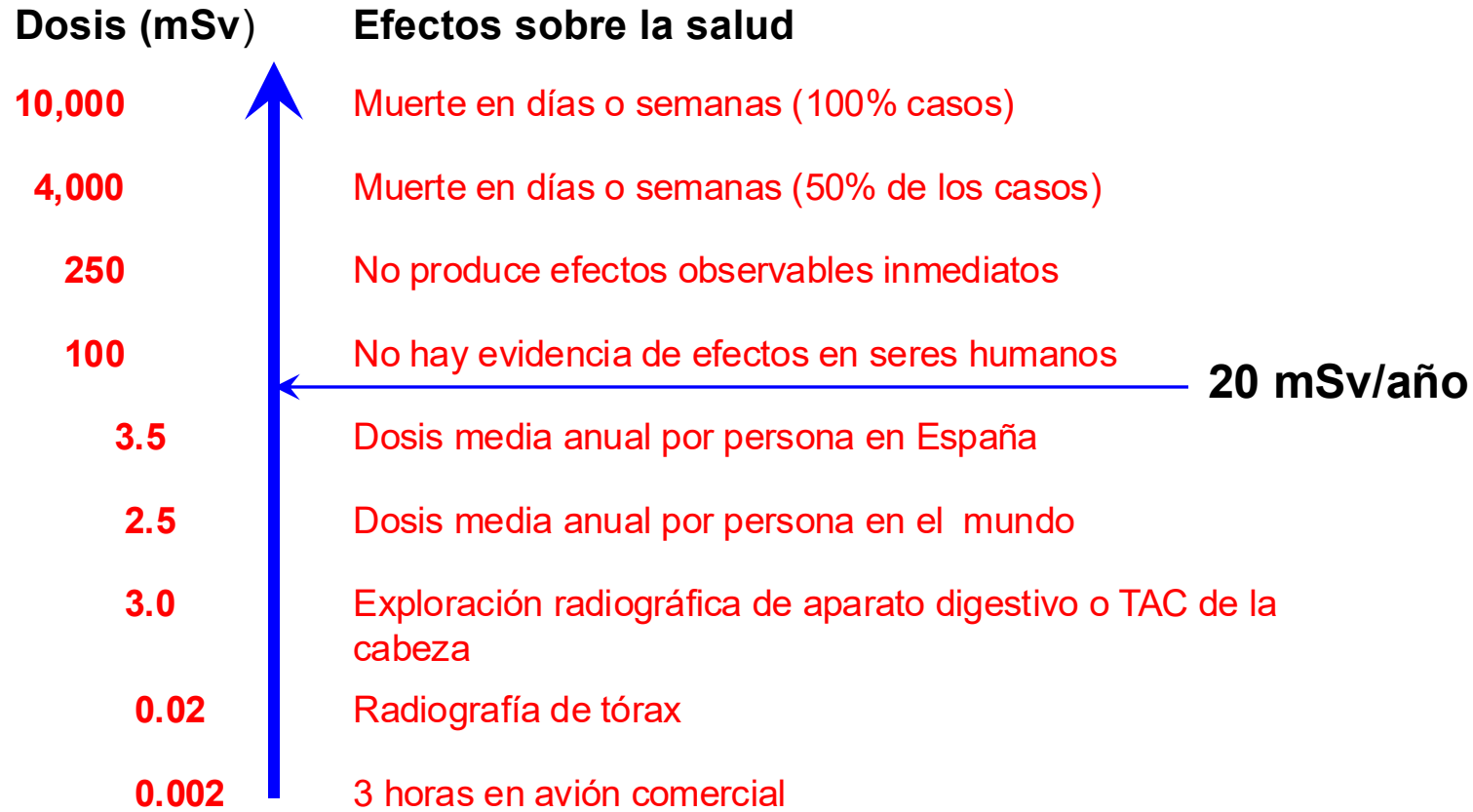
D_R = dosis absorbida debida a la radiación R

w_R = factor de ponderación

RD 783/2001

Tipo de radiación y rango de energía	Factor de ponderación de la radiación, w_R
Fotones , todas las energías	1
Electrones , todas las energías	1
Neutrones , energía menor de 10 keV	5
de 10 keV a 100 keV	10
de 100 keV a 2 MeV	20
de 2 MeV a 20 MeV	10
mayor de 20 MeV	5
Protones , salvo los de retroceso, de energía mayor de 2 MeV	5
Partículas α e iones pesados	20

Efectos de las radiaciones ionizantes



Efectos de las radiaciones ionizantes

Table 9.1 Symptoms of radiation sickness.^A

EARLY	Mild Exposure (1-2Gy)	Moderate Exposure (2-6Gy)	Severe Exposure (6-9Gy)	Very Severe Exposure (10Gy or higher)
		50%	>50%	100%
Nausea/vomiting	Within 6 hours	Within 2 hours	Within 1 hour	Within 10 minutes
Diarrhea	N/A	Within 8 hours	Within 3 hours	Within 1 hour
Headache	N/A	Within 24 hours	Within 4 hours	Within 2 hours
Fever	N/A	Within 3 hours	Within 1 hour	Within 1 hour
LATER				
Dizziness/disorientation	N/A	N/A	Within 1 week	Immediate
Weakness, fatigue	Within 4 weeks	Within 1 – 4 weeks	Within 1 week	Immediate
Hair loss, bloody vomit and stools, infections, poor wound healing, low blood pressure	N/A	Within 1 – 4 weeks	Within 1 week	Immediate

^AAdapted from Radiation exposure and contamination. The Merck Manuals: The Merck Manual for Healthcare Professionals

Riesgos de la radiación en el espacio

- **Carcinogénesis:** El aumento del riesgo de mortalidad en los astronautas por la exposición a la radiación cósmica.
- Riesgos del **sistema nervioso central:** Pueden conducir a trastornos en la función motora o trastornos neurológicos.
- Riesgos crónicos: La exposición a la radiación puede resultar en **enfermedades degenerativas de los tejidos** (cancerosas o no) como las enfermedades cardíacas, circulatorias o digestivas, así como cataratas.
- Riesgos de **irradiación aguda:** Puede ocurrir debido a la exposición a la radiación cósmica.

Límites de dosis en la Tierra

- Exposición regular y continuada a todas las radiaciones.

Aplicación	RD 53/1992 protección sanitaria	
	Ocupacional	Público
Dosis efectiva	50 mSv/año	5 mSv/año
dosis equivalente anual:		
- cristalino	150 mSv	15 mSv
- piel (100 cm ²)	500 mSv	50 mSv
- extremidades	500 mSv	50 mSv

Aplicación	RD 273/2001, recomendados ICRP, directiva Euratom 96	
	Ocupacional	Público
Dosis efectiva	20 mSv/año promediado en periodos de 5 años, máximo en un año 50 mSv	1 mSv/año
dosis equivalente anual:		
- cristalino	150 mSv	15 mSv
- piel (1 cm ²)	500 mSv	50 mSv
- Extremidades	500 mSv	50 mSv

Límites de dosis en el espacio

- Criterio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*).
- Límites de exposición a la radiación (NASA).

Límites de exposición de órganos específicos para astronautas			
Tiempo de exposición	Órganos formadores de sangre	Ojo	Piel
30 días	250 mSv	1 Sv	1.5 Sv
Anual	500 mSv	2 Sv	3.0 Sv
Toda la carrera profesional	1.5 – 4.0 Sv para hombres $[2.0 + 7.5 \times 10^{-2}(\text{edad} - 30)]$ 1.0 – 3.0 Sv para mujeres $[2.0 + 7.5 \times 10^{-2}(\text{edad} - 38)]$	4.0 Sv	6.0 Sv

Aplicación	RD 273/2001, recomendado ICRP	
	Ocupacional	Público
Dosis efectiva	20 mSv/año promediado en periodos de 5 años, máximo en un año 50 mSv	1 mSv/año
dosis equivalente anual		
cristalino	150 mSv	15 mSv
piel (1 cm ²)	500 mSv	50 mSv
Extremidades	500 mSv	50 mSv

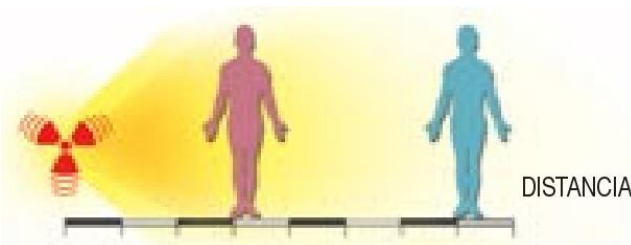
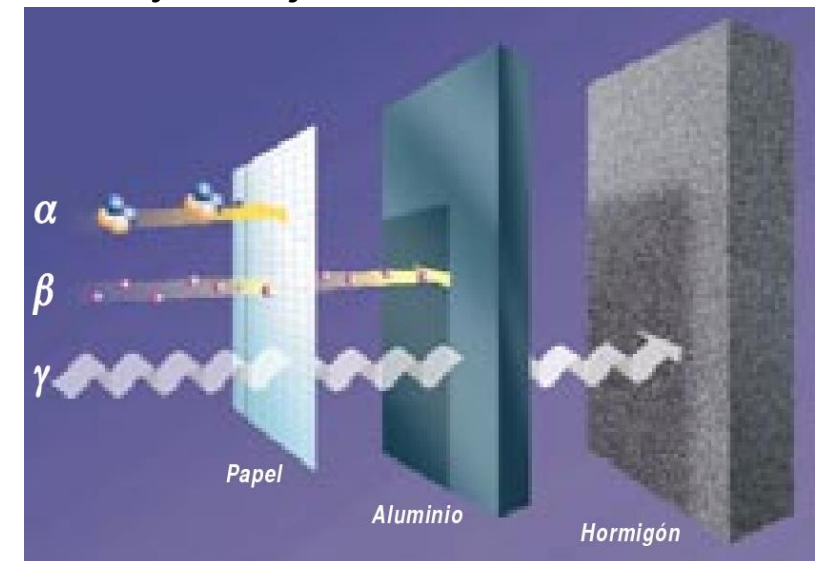
Límites de dosis en los componentes electrónicos

- La radiación de alta energía responsable de los efectos sobre la electrónica está formada por:
 - electrones con energías superiores a 100 KeV,
 - protones o neutrones con energías superiores a 1 MeV,
 - iones pesados con energías superiores a 1 MeV/uma, uma = unidad de masa atómica, masa del protón = 1 uma.
- Las principales contribuciones son proporcionadas por los **SPE** (*Solar Particle Events*), radiación atrapada en los anillos de Van Allen y los **GCR** (*Galactic Cosmic Rays*).
- Los neutrones y fotones son radiación secundaria.

Protección contra la radiación en la tierra

– Radiaciones **n**, **γ** , y **X** son las más peligrosas por su gran alcance, la radiación **β** (electrones) lo es menos y la radiación **α** (${}_2\text{He}^4$) tiene una peligrosidad marginal.

- **distancia**: atenuación geométrica $D \propto 1/r^2$.
- **tiempo de irradiación**: a menor tiempo de exposición, menor dosis recibida.
- **blindajes**: interposición de un **material absorbente** entre la fuente y el objeto. Atenuación exponencial $e^{-\mu r}$.
 - **radiación α** : alcance muy pequeño, del orden espesor espesor de una hoja del papel.
 - **radiación β** : alcance mucho mayor: 0.3 cm en aluminio, 6 m en aire.



Vigilancia de la radiación en el espacio

- Detectores de radiación para medir:
 - Dosis absorbida.
 - Dosis equivalente.
 - Tipo y energía de partículas cargadas.
 - Neutrones.

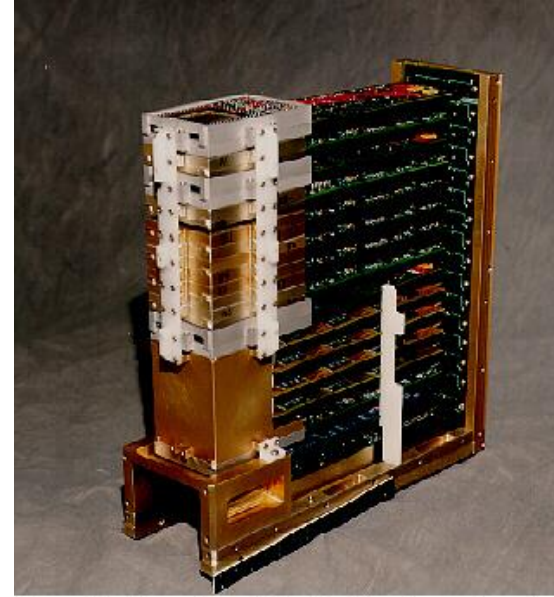


Figure 14. Charged particle directional spectrometer (CPDS).

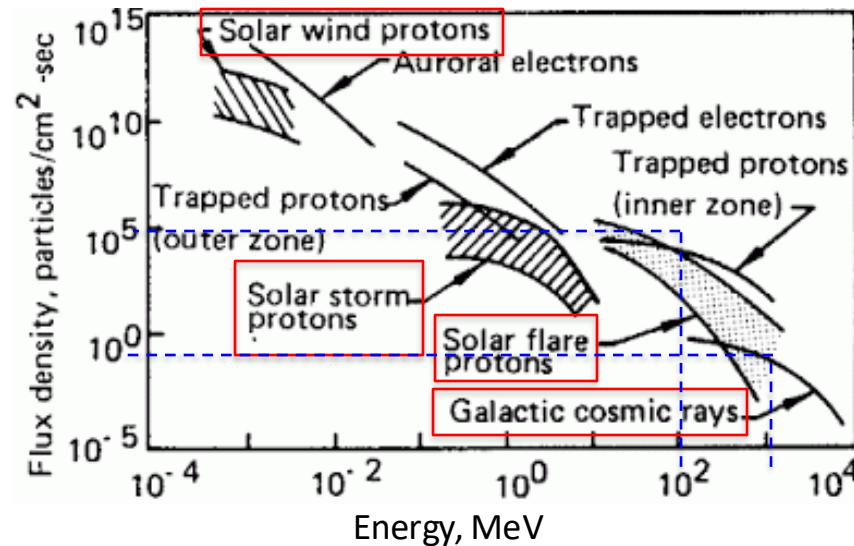


Figure 13. Tissue equivalent proportional counter (TEPC).

Cuestiones

1. La unidad de dosis equivalente es el Sievert (J/kg).
2. Cual es la diferencia entre Gray y Sievert?
3. La dosis máxima anual admisible para el público en general es mayor que la recibida por radiación natural.
4. La dosis máxima anual de un astronauta es similar a la de un trabajador profesionalmente expuesto en la Tierra.
5. La dosis máxima anual de un astronauta es 25 veces mayor que la de un trabajador en la Tierra.
6. Los métodos de protección convencionales son efectivos para la radiación cósmica.

Cuestiones



Radiación solar (SPE):

protones de 100 MeV y 10^5 p/(cm²s)

Radiación galáctica:

protones de 1 GeV y 1 p/(cm²s)

7. Determinar el tiempo que puede estar expuesto un astronauta a un flujo de 10^5 protones/(cm²s) para recibir la dosis máxima permitida por la NASA. La energía de los protones es de 100 MeV. Utilizar las tablas del NIST (<https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions>). (Nota: 1 eV = 1.6×10^{-19} J).

Poder de frenado másico
de p de 100 MeV en **H₂O**

$$D = \frac{S}{\rho} \left(\frac{\text{MeV cm}^2}{\text{g}} \right) \Phi \left(\frac{\text{part.}}{\text{cm}^2} \right)$$

$$\dot{D} = \frac{S}{\rho} \dot{\Phi}$$

$$\frac{S}{\rho} = 7.286 \frac{\text{MeV} \times \text{cm}^2}{\text{g}} \quad \text{de las tablas NIST} \quad ; \quad \text{factor de ponderación } w = 5 \quad ; \quad H_{\text{max}} = 500 \text{ mSv}$$

$$\dot{D} = 7.286 \frac{\text{MeV} \times \text{cm}^2}{\text{g}} \times 10^5 \frac{\text{p}}{\text{cm}^2 \text{s}} \times 10^3 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \times 1.6 \times 10^{-13} \frac{\text{J}}{\text{MeV}} = 1.16 \times 10^{-4} \frac{\text{Gy}}{\text{s}}$$

$$\dot{H} = \dot{D} \times w = 1.16 \times 10^{-4} \frac{\text{Gy}}{\text{s}} \times 5 = 5.83 \times 10^{-4} \frac{\text{Sv}}{\text{s}}$$

$$\tau = \frac{H_{\text{max}}}{\dot{H}} = \frac{500 \times 10^{-3} \text{ Sv}}{5.83 \times 10^{-4} \text{ Sv/s}} = 858 \text{ s} \approx \boxed{14 \text{ min}}$$

Cuestiones

8. Idem para un flujo de 10^5 electrones/(cm^2s) de 1 MeV.

Poder de frenado másico de electrones de 1 MeV en H_2O de las tablas del NIST:

<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>

$$\frac{S}{\rho} = 1.849 \frac{\text{MeV} \times \text{cm}^2}{\text{g}} \quad \text{de las tablas NIST} \quad ; \quad \text{factor de ponderación } w = 1 \quad ; \quad H_{\max} = 500 \text{ mSv}$$

$$\dot{D} = 1.849 \frac{\text{MeV} \times \text{cm}^2}{\text{g}} \times 10^5 \frac{e}{\text{cm}^2 \text{ s}} \times 10^3 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \times 1.6 \times 10^{-13} \frac{\text{J}}{\text{MeV}} = 2.96 \times 10^{-5} \frac{\text{Gy}}{\text{s}}$$

$$\dot{H} = \dot{D} \times w = 2.96 \times 10^{-5} \frac{\text{Gy}}{\text{s}} \times 1 = 2.96 \times 10^{-5} \frac{\text{Sv}}{\text{s}}$$

$$\tau = \frac{H_{\max}}{\dot{H}} = \frac{500 \times 10^{-3} \text{ Sv}}{2.96 \times 10^{-5} \text{ Sv/s}} = 1.69 \times 10^4 \text{ s} \approx 4.7 \text{ h}$$

9. Idem para un flujo de 1 protón/(cm^2s) de 1 GeV.

$$\frac{S}{\rho} = 2.211 \frac{\text{MeV} \times \text{cm}^2}{\text{g}} \quad \text{de las tablas NIST} \quad ; \quad \text{factor de ponderación } w = 5 \quad ; \quad H_{\max} = 500 \text{ mSv}$$

$$\dot{D} = 2.211 \frac{\text{MeV} \times \text{cm}^2}{\text{g}} \times 1 \frac{p}{\text{cm}^2 \text{ s}} \times 10^3 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \times 1.6 \times 10^{-13} \frac{\text{J}}{\text{MeV}} = 3.54 \times 10^{-10} \frac{\text{Gy}}{\text{s}}$$

$$\dot{H} = \dot{D} \times w = 3.54 \times 10^{-10} \frac{\text{Gy}}{\text{s}} \times 5 = 1.77 \times 10^{-9} \frac{\text{Sv}}{\text{s}}$$

$$\tau = \frac{H_{\max}}{\dot{H}} = \frac{500 \times 10^{-3} \text{ Sv}}{1.77 \times 10^{-9} \text{ Sv/s}} = 2.83 \times 10^8 \text{ s} \approx 9 \text{ años}$$

Irradiación de equipos electrónicos

Parámetros básicos

Parámetro	Definición	Unidad	Límites típicos
TID (<i>Total Ionizing Dose</i>)	Dosis total acumulada en semiconductores	10 - 100 Gy(Si)	Comercial: <10 Gy(Si); Rad-hard : ≥ 30 Gy(Si)
SEE (Single Event Effects)	Efectos inducidos por una sola partícula energética	LET (MeV·cm ² /mg)	Rad-hard : tolera LET > 60 MeV·cm ² /mg
DD (Displacement Damage)	Daño por desplazamiento atómico, afecta a fotodetectores, sensores CCD	MeV/g	Varía según el material

Clasificación de los componentes según tolerancia

Tipo de componente	TID (<i>Total ionizing dose</i>) admisible	Notas
COTS (commercial off-the-shelf)	< 0.5–1 Gy(Si)	Requieren pruebas o blindaje si se usan
Rad-tolerant	~ 2–5 Gy(Si)	No garantizan inmunidad a SEE (<i>Single Event Effects</i>) severos
Rad-hard	10–30+ Gy(Si)	Diseñados específicamente para el espacio; caros pero fiables

Límites específicos (valores típicos)

Componente	TID máx. [Gy(Si)]	LET máx. tolerado [MeV·cm ² /mg]	Tipo
SRAM COTS	~1	<10	Muy sensible a SEUs
FPGA Rad-hard	10–30	>60	Excelente resistencia
ADC Rad-tolerant	~5	~20–30	Requiere protección contra SEEs
MEMS sensores	1–10	Varía	Sensibles a TID y DD

SRAM = Memory.

FPGA = Field-Programmable Gate Arrays.

ADC = Analog-to-digital converters.

MEMS = Micro-Electro-Mechanical Systems, crucial function of spacecraft:
navigation, attitude control...

SEU = Single-Event Upset: cambio de estado causado cuando una sola partícula ionizante (iones, electrones, fotones ...) interacciona con un dispositivo microelectrónico.

SEE = Single Event Effects

Mitigación del daño en misiones espaciales

- Uso de **tecnología SOI** (*Silicon-on-Insulator*) o **SiGe** resistente. Sándwich de capas de semiconductor, aislante y semiconductor.
- **Redundancia triple modular (TMR)**: técnica de redundancia donde un componente o sistema se triplica, y los resultados de los tres componentes se comparan. Se utiliza el resultado mayoritario para asegurar que el sistema no falla en lógica crítica.
- **Corrección de errores ECC** (*Error Correcting Code*) en memorias. Bits de paridad o bits de comprobación.
- **Blindaje físico** con aluminio u otros materiales.

Dosis recibida en misiones espaciales

Dosis recibida en misiones espaciales

- Para órbitas LEO, el campo magnético terrestre protege las astronaves de las tormentas solares y de los rayos cósmicos.
- En órbitas LEO, p.e. en la ISS, las dosis están en el rango de **0.4 a 1.1 mSv/día** incluyendo los efectos del blindaje. Para misiones de 6 meses en órbita, la dosis equivalente es de 150 a 400 mSv/año, que es muy alta. La dosis máxima anual permitida en la tierra es de 50 mSv/año.
- En misiones a Marte, se producirán unas 2 tormentas solares durante el transcurso de la misión (150 – 250 días de viaje + 300 – 600 días de estancia), por lo que habrá que proteger a los astronautas de los SPE. Dosis de 1 - 2 Sv como mínimo.
 - **Blindajes de polietileno y agua.**
 - **Campos EM, muy costoso en energía.**

EL PAÍS

SOCIEDAD

CIENCIA »

Un astronauta recibiría al ir a Marte toda la dosis de radiación de su carrera

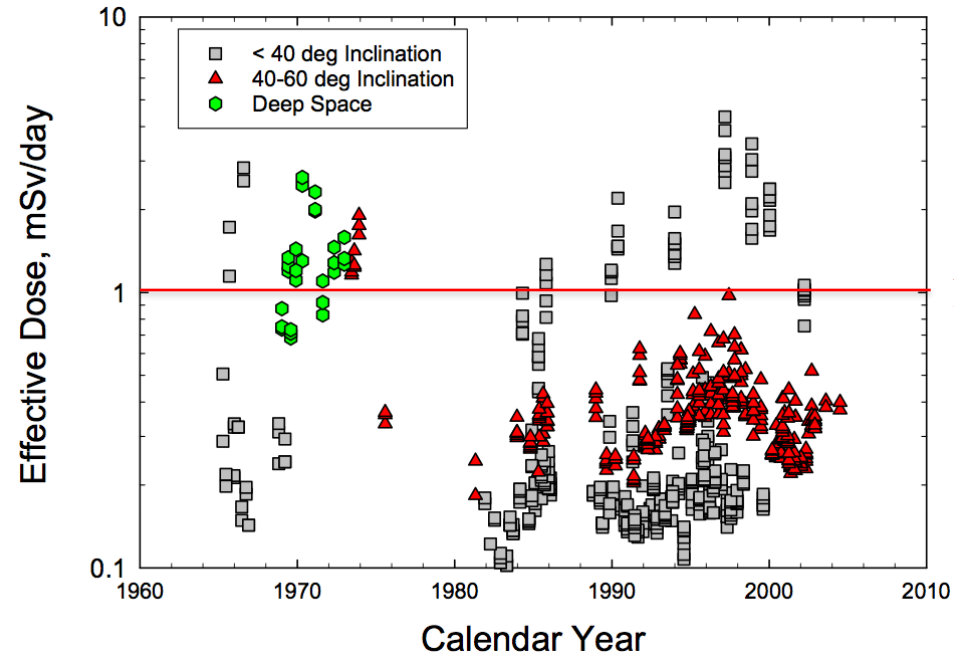
El 'Curiosity' ha medido el flujo de rayos cósmicos y partículas solares a los que se expondría la tripulación

ALICIA RIVERA | Madrid | 30 MAY 2013 - 20:00 CET

98

Dosis máximas de radiación recomendadas por la NASA

Tasa de dosis recibida en las misiones de la NASA



1 mSv/día

$\approx 2.0 + 7.5 \times 10^{-2} \times (\text{edad} - 30)$

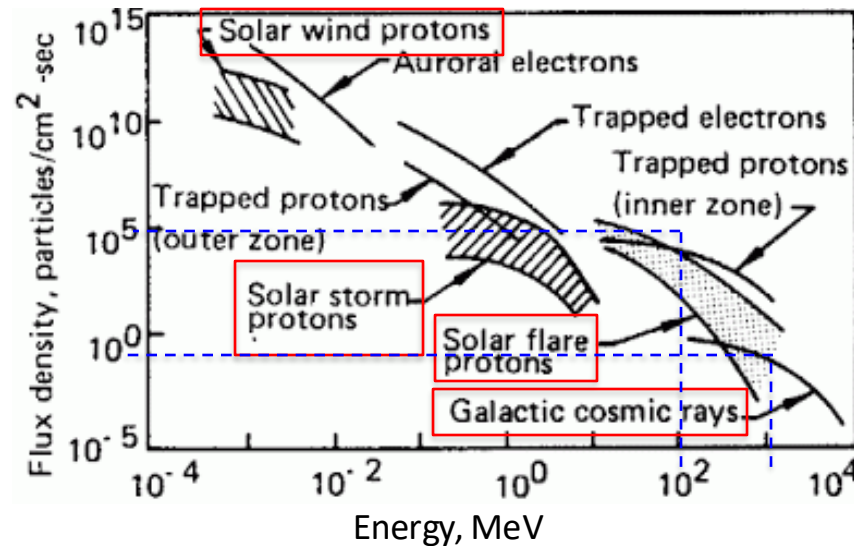
$\approx 2.0 + 7.5 \times 10^{-2} \times (\text{edad} - 38)$

Dosis máximas de radiación recomendadas para un astronauta durante 10 años de servicio (expresadas en sieverts)				
	1989		2000	
Edad (años)	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
25	1,5 Sv	1,0 Sv	0,7 Sv	0,4 Sv
35	2,5 Sv	1,75 Sv	0,9 Sv	0,6 Sv
45	3,25 Sv	2,5 Sv	1,5 Sv	0,9 Sv
55	4,0 Sv	3,0 Sv	2,9 Sv	1,6 Sv

Blindaje activo de la radiación cósmica

- Se han considerado diseños innovadores con campos electromagnéticos alrededor de la nave espacial, tratando de emular la magnetosfera terrestre.
- Ninguno de dichos diseños se ha probado en vuelo. De momento están sujetos a investigación con el objetivo de garantizar la seguridad de los viajes espaciales.
- Se han propuesto tres posibilidades:
 - **Blindaje electrostático:** se genera un campo eléctrico alrededor de la zona habitada con polaridad positiva/negativa para frenar los iones/electrones de la radiación cósmica. Se han de tener en cuenta la ruptura dieléctrica del material aislante y las tensiones mecánicas derivadas de las fuerzas electrostáticas.
 - **Blindaje magnético:** Consiste en formar un campo magnético alrededor de la astronave, generalmente mediante el uso de solenoides o toroides superconductores.
 - **Blindaje de plasma:** Consiste fundamentalmente en un plasma alrededor de la zona habitada de la astronave.

Cuestiones



Radiación solar (SPE):

protones de 100 MeV y 10^5 p/(cm²s)

Radiación galáctica:

protones de 1 GeV y 1 p/(cm²s)

7. Determinar el tiempo que puede estar expuesto un astronauta a un flujo de 10^5 protones/(cm²s) para recibir la dosis máxima permitida por la NASA. La energía de los protones es de 100 MeV. Utilizar las tablas del NIST (<https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions>). (Nota: 1 eV = 1.6×10^{-19} J).

Poder de frenado másico
de p de 100 MeV en **H₂O**

$$D = \frac{S}{\rho} \left(\frac{\text{MeV cm}^2}{\text{g}} \right) \Phi \left(\frac{\text{part.}}{\text{cm}^2} \right)$$

$$\dot{D} = \frac{S}{\rho} \dot{\Phi}$$

$$\frac{S}{\rho} = 7.286 \frac{\text{MeV} \times \text{cm}^2}{\text{g}} \quad \text{de las tablas NIST} \quad ; \quad \text{factor de ponderación } w = 5 \quad ; \quad H_{\text{max}} = 500 \text{ mSv}$$

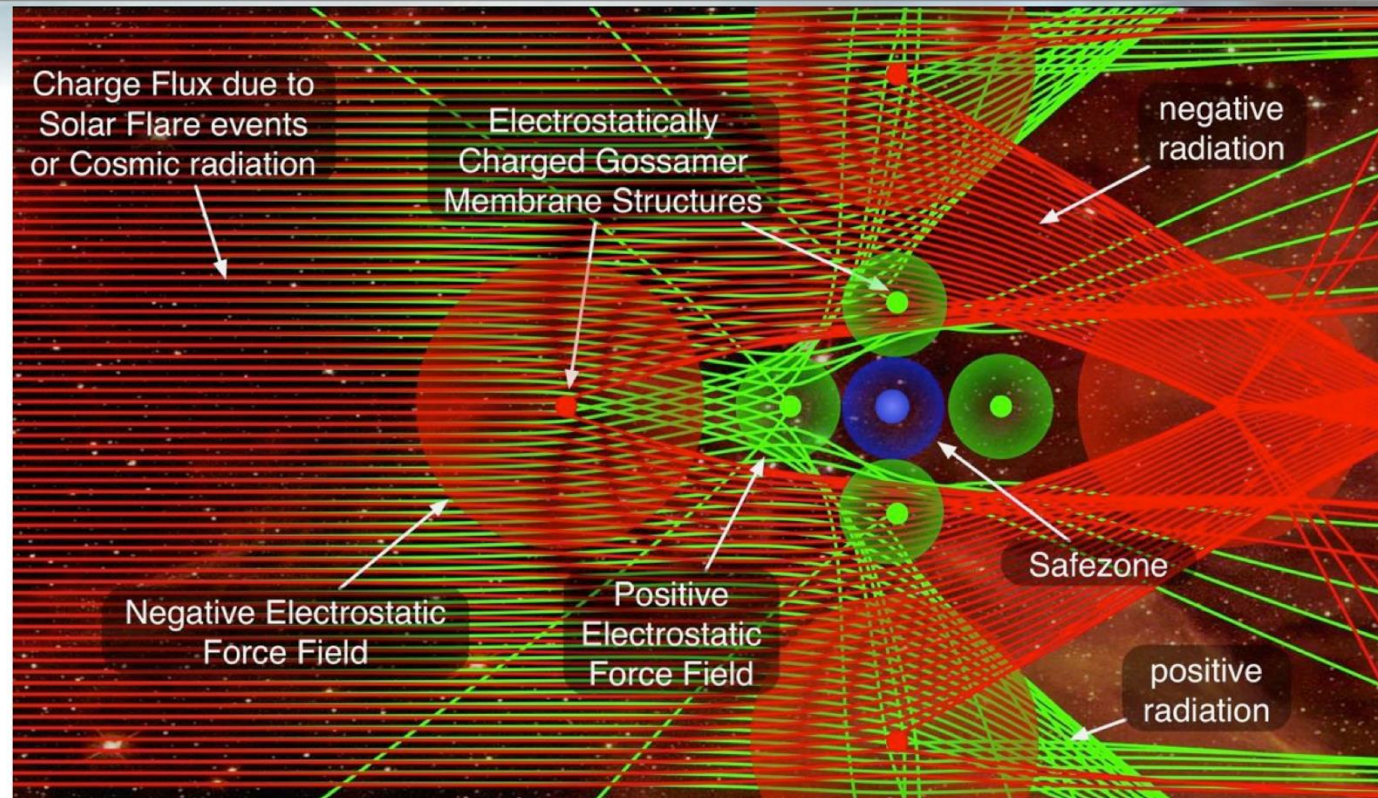
$$\dot{D} = 7.286 \frac{\text{MeV} \times \text{cm}^2}{\text{g}} \times 10^5 \frac{\text{p}}{\text{cm}^2 \text{s}} \times 10^3 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \times 1.6 \times 10^{-13} \frac{\text{J}}{\text{MeV}} = 1.16 \times 10^{-4} \frac{\text{Gy}}{\text{s}}$$

$$\dot{H} = \dot{D} \times w = 1.16 \times 10^{-4} \frac{\text{Gy}}{\text{s}} \times 5 = 5.83 \times 10^{-4} \frac{\text{Sv}}{\text{s}}$$

$$\tau = \frac{H_{\text{max}}}{\dot{H}} = \frac{500 \times 10^{-3} \text{ Sv}}{5.83 \times 10^{-4} \text{ Sv/s}} = 858 \text{ s} \approx \boxed{14 \text{ min}}$$

Blindaje electrostático

Electrostatic Radiation Shielding Concept



NIAC 2012 Spring Symposium, Pasadena, CA, March 27–29, 2012

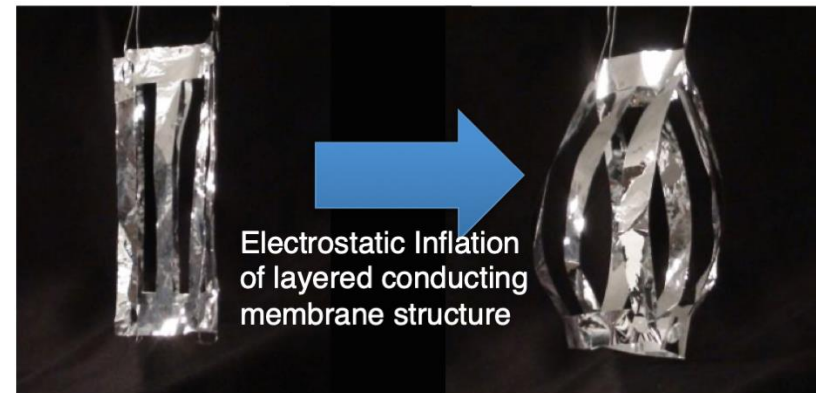
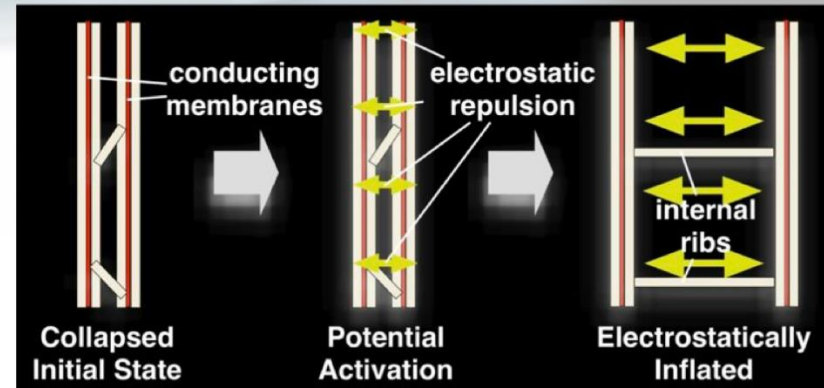


NIAC = NASA Innovative Advanced Concepts

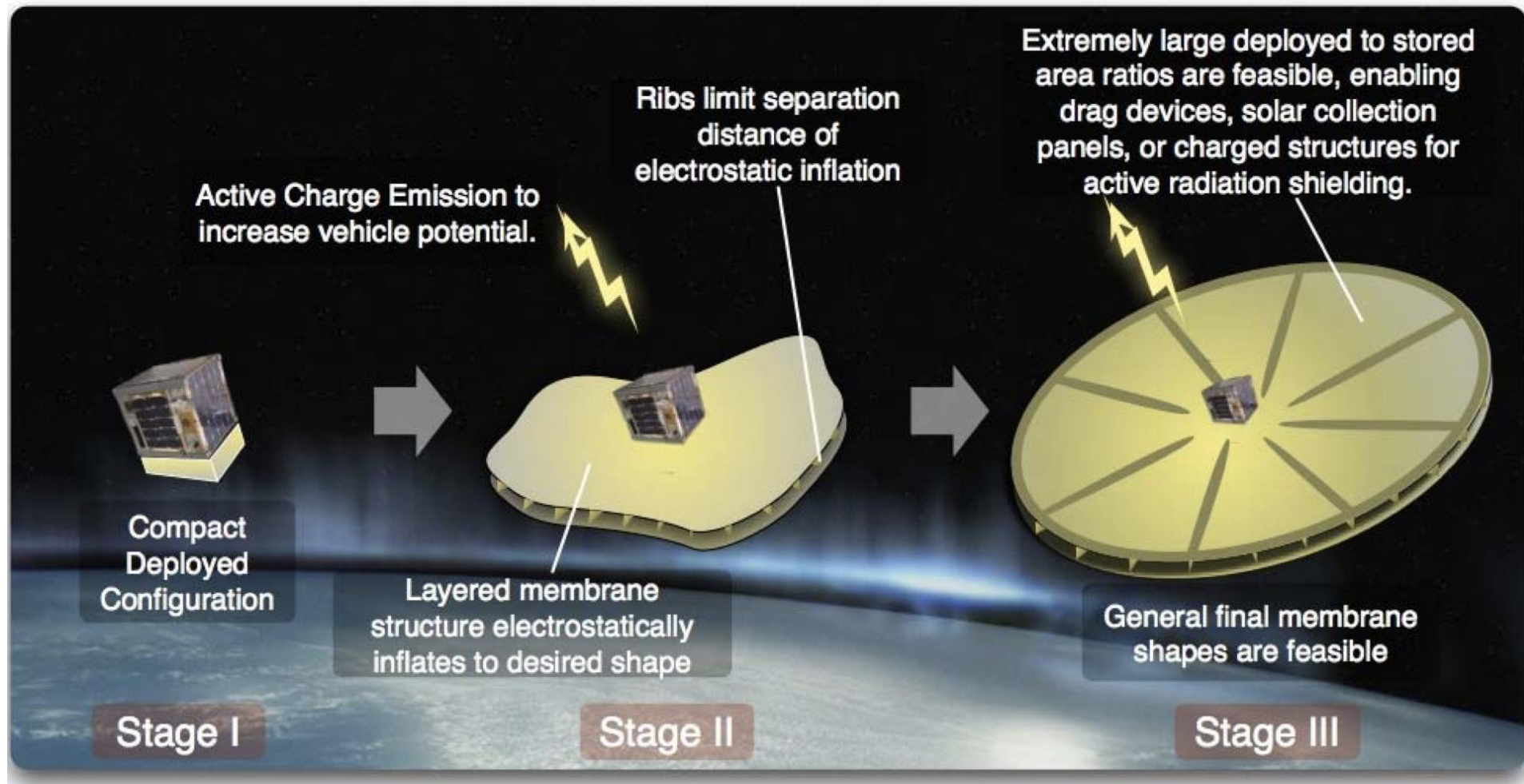
Expansión electrostática

Charged Gossamer Structures

- Active radiation shielding requires a light-weight solution
- Electrostatic deflection requires a large capacitance (i.e. surface)
- **Solution:** charged Gossamer structures

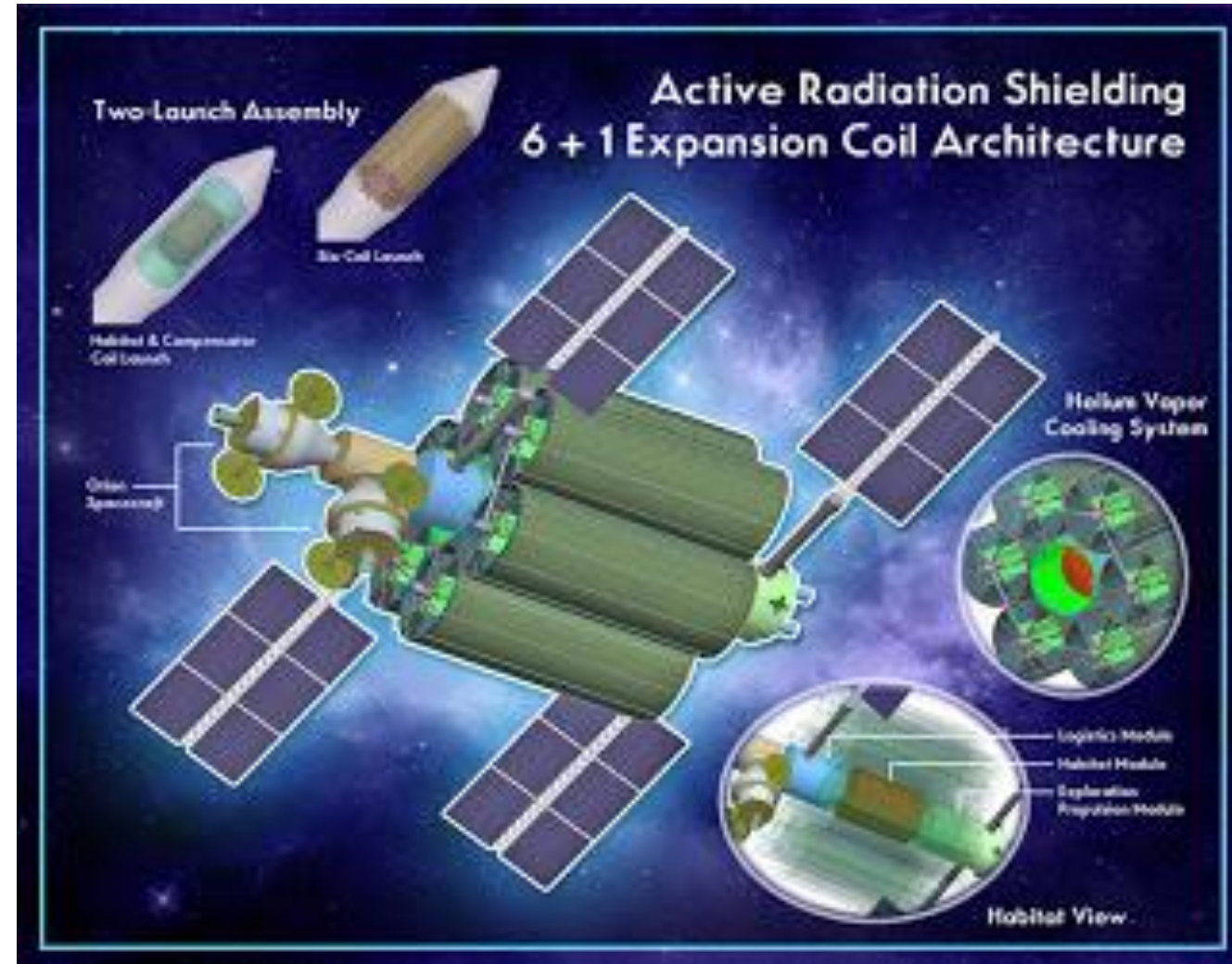


Expansión electrostática del blindaje



Blindaje activo con campos magnéticos generados por solenoides superconductores

- 6 solenoides de 15 – 20 m de longitud y 4 – 6 m de diámetro que generan un campo de unos **4 Tesla**.
- Capaces de desviar iones con energías menores de **2 GeV/u**.
- La zona habitada está en el centro de los 6 solenoides rodeado por una bobina que garantiza campo nulo en su interior.
- La masa del escudo magnético es de unas **50 toneladas**.
- Hace falta una potencia eléctrica de unos **25 kW** (solar, nuclear RTG) para generar el campo necesario en bobinas superconductoras.



Conclusiones

- Los astronautas reciben una exposición a la radiación mucho mayor que la máxima permitida para trabajadores profesionalmente expuestos en la tierra.
- Es necesaria una protección efectiva para garantizar la seguridad de los astronautas en misiones espaciales de larga duración.

