

Radiación y poder de frenado en materiales espaciales: Enfoque de aprendizaje automático

Módulo para Ingeniería Aeroespacial

Darío Mitnik

Febrero 2026

Disclaimer

Este contenido tiene fines educativos sobre física de radiaciones; el diseño de blindajes reales para misiones espaciales requiere simulaciones certificadas y cumplimiento de normativas de agencias espaciales.

Objetivos del módulo

Parte Teórica:

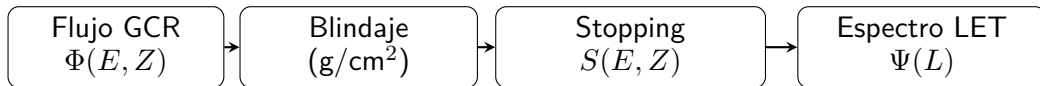
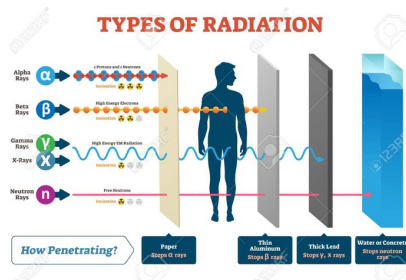
- Conocer qué hay detrás de algunas aplicaciones que se utilizan como “cajas negras” en Ingeniería Espacial
- Conocer algunas nociones básicas de Física Atómica, en particular *radiación* y *ionización*, para entender las interacciones Radiación-Materia
- Familiarizarse con los procesos de frenamiento (*stopping power*) y pérdida de energía

Parte Práctica:

- Reproducir (en forma sintética) resultados de investigación.
- Introducir un flujo de trabajo simple de *Machine Learning*: datos → limpieza (DBSCAN) → red neuronal → predicción.

De Radiación a Linear Energy Transfer en CREME96

1. *CREME96 Tool*:
<https://creme.isde.vanderbilt.edu>
2. Elegir **Orbit** (LEO/GEO/Interplanetary) $\Rightarrow$ define el flujo incidente de GCR por especie (p, He, C, O, Fe...).
3. Elegir **Shield** (espesor en g/cm²) $\Rightarrow$ atenúa el espectro energético y filtra especies.
4. El transporte (HZETRN/CREME) combina **flujo**(E,Z) con $S(E, Z, \text{material})$ para obtener el espectro de **LET** tras el blindaje.



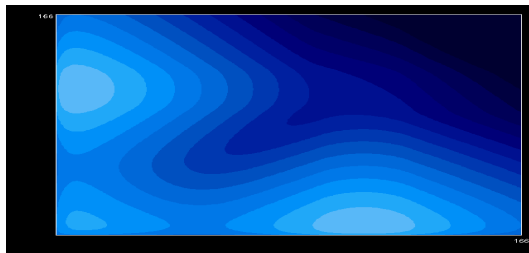
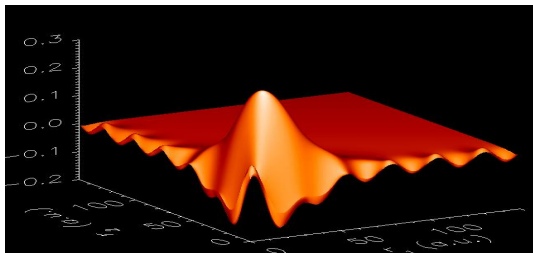
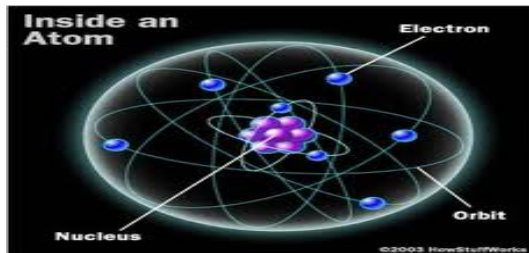
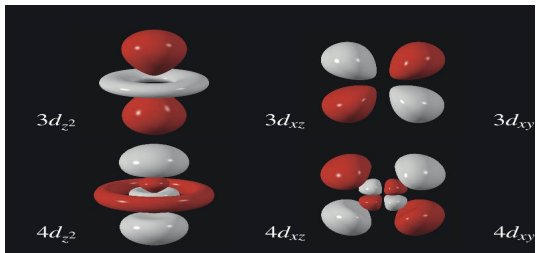
Uso: El blindaje modifica la energía/especies que llegan; con $S(E, Z)$ se integra el depósito local para construir $\Psi(L)$.

Entorno de radiación en ingeniería aeroespacial

1. **Entorno espacial:** satélites y vehículos se exponen a rayos cósmicos galácticos (GCR), viento solar y partículas de eventos solares. Estos flujos incluyen protones, electrones y iones pesados (HZE) con energías de keV a GeV/nucleón.
2. **Efectos en materiales y electrónica:** las colisiones con átomos del material producen ionización, desplazamientos y cascadas atómicas. Esto degrada detectores, paneles solares y circuitos (efectos de un solo evento, daño acumulado, *sputtering*).
3. **Relevancia para propulsión iónica:** los mismos procesos atómicos —ionización, recombinación, pérdida de energía— determinan la eficiencia de aceleradores iónicos y *Hall thrusters*.
4. **Protección y diseño:** los cálculos de poder de frenado y secciones eficaces se emplean en el diseño de blindajes y elección de materiales para satélites y misiones tripuladas.

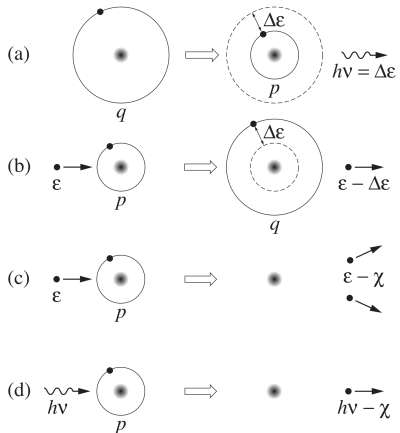
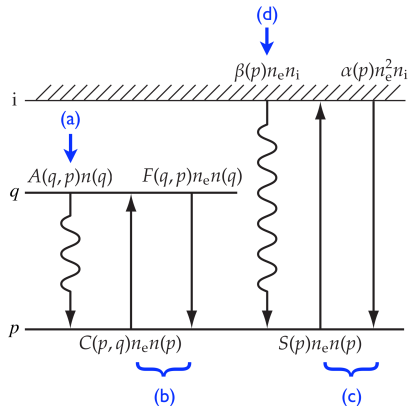
En síntesis: los procesos de colisión atómica y pérdida de energía son el vínculo entre la física microscópica y el diseño de sistemas aeroespaciales resistentes al entorno espacial.

Física Atómica: Procesos Fundamentales



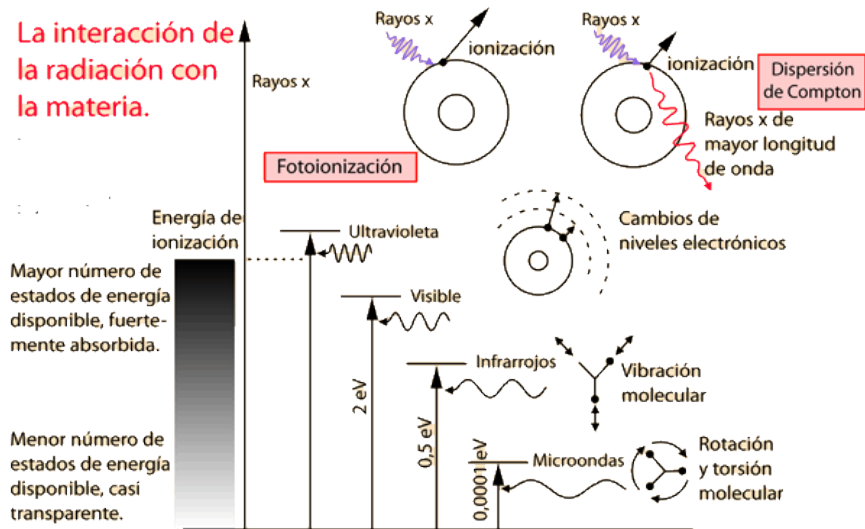
Procesos Atómicos

various processes should
be taken into consideration

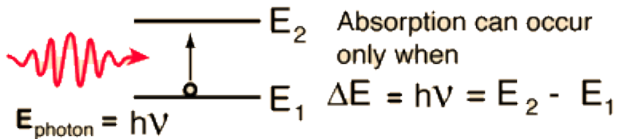
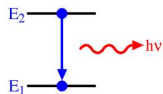


Procesos Radiativos

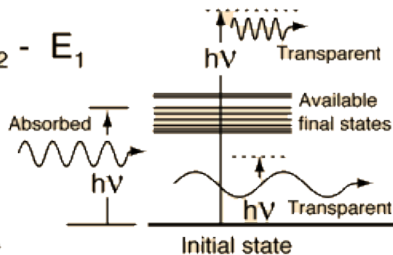
La interacción de la radiación con la materia.



Excitación/De-Excitación por impacto de Fotones

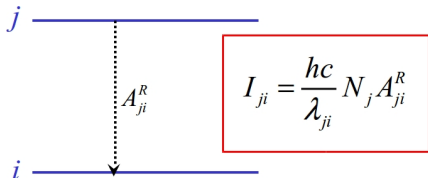


To what photon energies is the human body transparent?



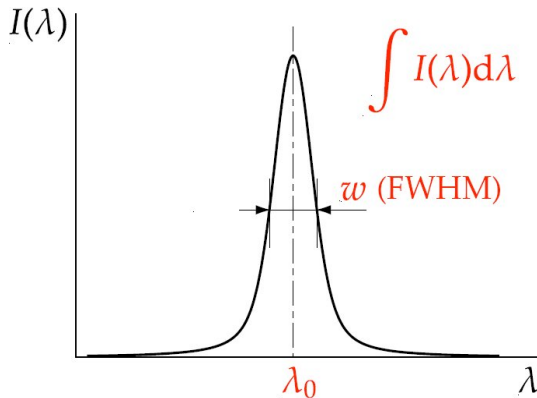
Propiedades de las líneas de emisión

La Intensidad es el producto de la **densidad de población** por la probabilidad de transición (**coeficiente de Einstein**) A por la energía de la transición.



$$I_{ji} = \frac{hc}{\lambda_{ji}} N_j A_{ji}^R$$

$$[A^R] = \text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$$



Coeficiente de Emisión Espontánea

$$A_{ji} = \frac{32\pi^3}{3} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar} \left(\frac{1}{\lambda}\right)^3 |\langle\psi_i(\mathbf{r})|\mathbf{z}|\psi_j(\mathbf{r})\rangle|^2$$

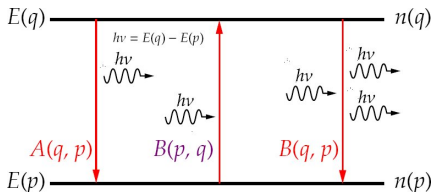
- Con λ en nm:

$$A_{ji} = 2.026 \times 10^{15} \frac{1}{\lambda^3} |Z_{ij}|^2$$

- $A \approx \frac{Z^4}{2} \alpha^3 \approx Z^4 10^{10} \text{ s}^{-1}$.

- Oscillator Strengths: $A_{ji} = \frac{8\pi^2 e^2}{mc} \frac{1}{\lambda^2} |f_{ji}|$

Coefficientes de Einstein



- En equilibrio termodinámico:

$$A(q, p) n(q) + B(q, p) n(q) \rho(\nu) = B(p, q) n(p) \rho(\nu)$$

- Boltzmann:

$$\frac{n_p}{n_q} = \frac{g_p}{g_q} e^{\frac{\Delta E_{pq}}{kT}}$$

$$\rho(\nu) = \frac{\frac{A(q,p)}{B(q,p)}}{\frac{B(p,q)}{B(q,p)} \frac{g(p)}{g(q)} \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

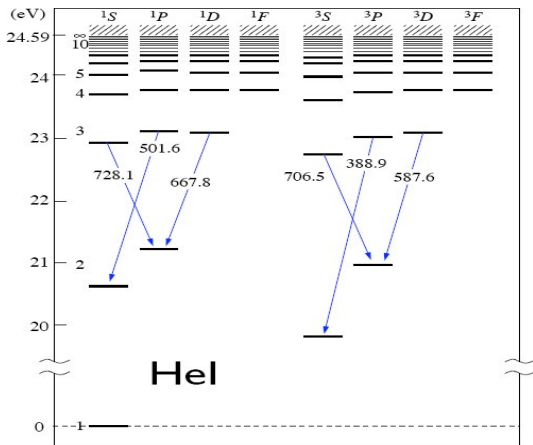
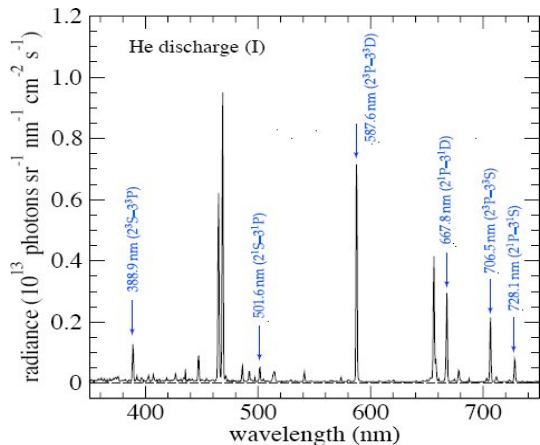
- La radiación en equilibrio es de **cuerpo negro**

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

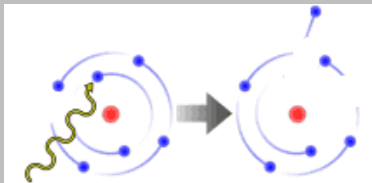
- En frecuencia angular: $\rho(\omega) = \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1}$

Coefficiente de Einstein

El coeficiente A es **constante** y propio de cada transición



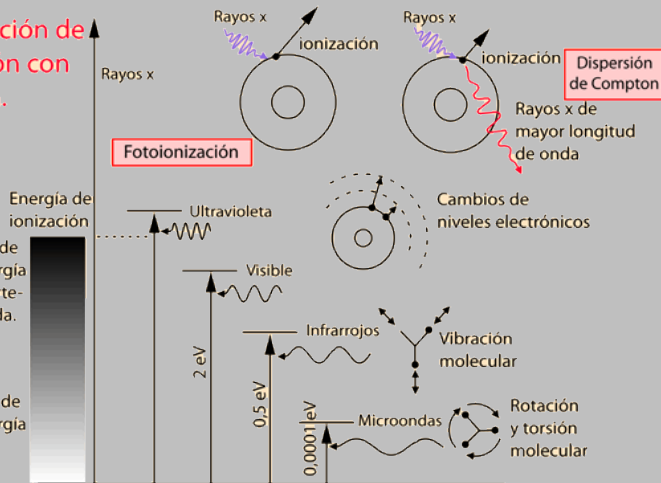
Fotoionización



La interacción de la radiación con la materia.

Mayor número de estados de energía disponible, fuertemente absorbida.

Menor número de estados de energía disponible, casi transparente.



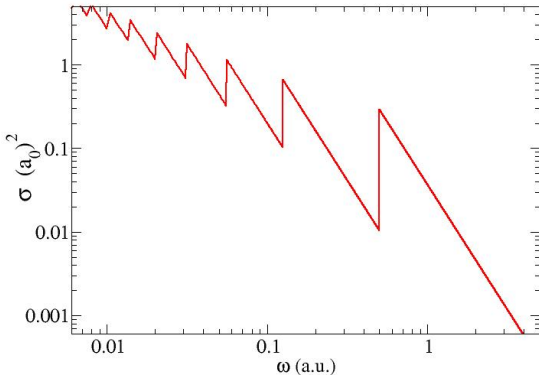
Fotoionización

- Hidrógeno desde el estado fundamental:

- $\sigma_{1k} = \frac{256\pi}{3} \alpha Z^{-2} \left(\frac{|\chi_H|}{\hbar\omega} \right)^{7/2} a_0^2$
- Notar que decrece como $(\hbar\omega)^{-7/2}$ y crece como Z^5 .

- Para el caso general, desde el nivel n :

- $\sigma_{nk} = \frac{64\pi}{3\sqrt{3}} \alpha g_{nk} \left(\frac{1}{Z} \right)^2 n \left(\frac{\omega_n}{\omega} \right)^3 a_0^2$
- Notar que decrece como $(\omega)^{-3}$



Fotoexcitación vs Fotoionización (Helio)

```
# Pseudocodigo (notebook aparte):
```

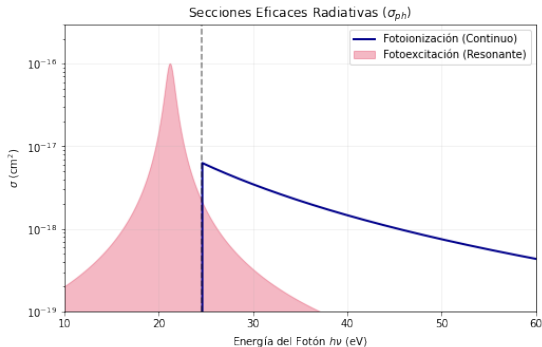
```
# Parametros Helio
```

```
E_ion = 24.58
```

```
E_exc = 21.22
```

```
def sigma_photo_ion(E):  
    return np.where(E >= E_ion,  
                    6.3e-18*(E_ion/E)**3, 0)
```

```
def sigma_photo_exc(E):  
    gamma = 0.5  
    return 1e-16 *  
        gamma**2 /  
        ((E - E_exc)**2 + gamma**2)
```



Coefficientes de Tasa Fotónicos (Rate Coefficients)

Fotoionización: Se calcula promediando la sección eficaz con el espectro de Planck $J_\nu(T_{rad})$:

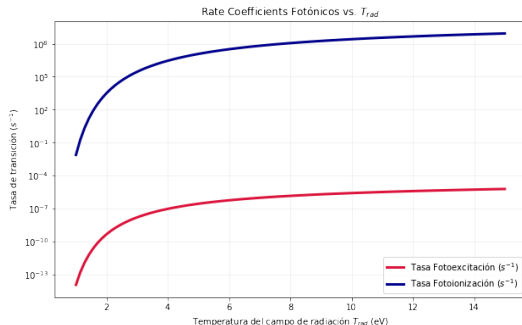
$$k_{ph} = \int_{\nu_{ion}}^{\infty} \sigma_{ph}(\nu) \frac{4\pi J_\nu}{h\nu} d\nu$$

Fotoexcitación: Es un proceso resonante. La tasa depende de la intensidad en la frecuencia exacta de la línea:

$$W_{exc} = B_{ij} J_\nu \propto \frac{f_{ij}}{\exp(h\nu/kT_{rad}) - 1}$$

Comportamiento

- Crecimiento exponencial con T_{rad} .
- A diferencia de los electrones, los fotones no tienen masa; la transferencia de energía es instantánea y total.

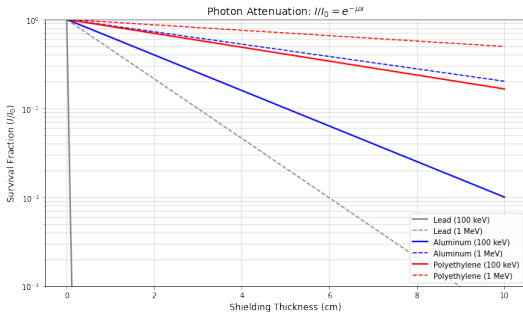


Atenuación de Fotones en Blindaje Espacial

Ley de Beer-Lambert

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

- La intensidad decae exponencialmente.
- μ depende fuertemente del número atómico (Z).
- A bajas energías (< 500 keV), el **Efecto Fotoeléctrico** domina (Z^4/E^3).
- A altas energías los materiales se vuelven transparentes (γ muy difícil de bloquear).
- Paradoja del Pb: A bajas energías detiene la radiación muy efectivamente. Para 1 MeV, se vuelve “normal”.

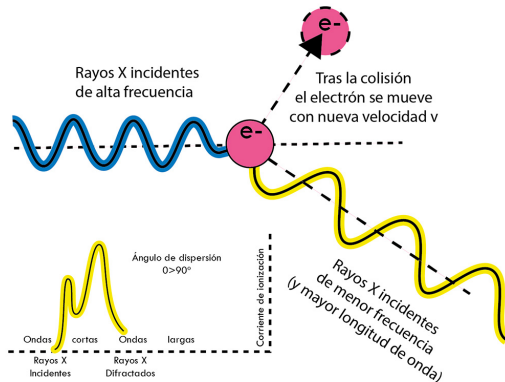


- Transmitted / Absorbed fractions:
 $T(E, x) = e^{-\mu(E)x}$ $A(E, x) = 1 - e^{-\mu(E)x}$
- Energy deposited (per area):
 $E_{dep}(E, x) \propto I_0(E) A(E, x)$

Efecto Compton

$$\gamma + e_i^- \rightarrow \gamma' + e_f^-$$

- El fotón cede parte de su energía a un electrón "libre".
- La probabilidad depende de la **Densidad Electrónica** ($\rho \cdot Z/A$).
- Es el proceso dominante en el rango de **100 keV a 10 MeV**.

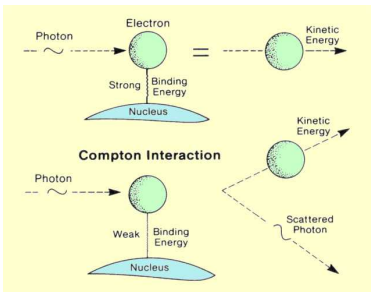


Fotón incidente choca con electrón libre, fotón dispersado con $\lambda' > \lambda$

¿Por qué el Efecto Compton es Peligroso?

Transferencia Indirecta

- El fotón *no* deposita energía directamente.
- La energía se transfiere al electrón dispersado.
- Este electrón es el que causa el daño por **ionización** en el material.



Implicaciones en Ingeniería

- **Radiación Secundaria:**
El fotón dispersado puede alcanzar áreas "protegidas" de la nave.
- **Factor de Build-up (B):**
En cálculos reales, la ley de Beer-Lambert se corrige:

$$I = I_0 \cdot B \cdot e^{-\mu x}$$

donde $B > 1$ cuenta los fotones dispersados que llegan al objetivo.

Efecto Compton y Densidad Electrónica

- A energías de ~ 1 MeV, domina el **Efecto Compton**.
- El fotón interactúa con electrones individuales ("libres"), no con el núcleo.
- La probabilidad de interacción depende de la **densidad electrónica por gramo**:

$$\text{Electrones/gramo} \approx N_A \cdot \frac{Z}{A}$$

Comparativa de Eficiencia Compton

- En la mayoría de los metales, $Z/A \approx 0.45 - 0.5$.
- En materiales hidrogenados (Polietileno, Agua), $Z/A \approx 0.55 - 1.0$.

Resultado: Por cada kg de blindaje, el Polietileno es un **25-40% más efectivo** para dispersión Compton que el Plomo.

Importante: El Plomo solo gana "por espesor" debido a su alta densidad física (ρ), pero pierde "por peso" en comparación con materiales ligeros.

Definición: Dosis Absorbida

Definición Técnica

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad [\text{J/kg}]$$

- Unidad: **Gray (Gy)**.
- Unidad histórica: **rad**
(100 rad = 1 Gy).
- Representa la energía que finalmente se convierte en calor, daño químico o ionización.

Aplicación en Satélites

- **TID (Total Ionizing Dose)**: límite de vida útil de una misión. (en este caso Dosis = Daño Acumulado).
- **Electrónica industrial**: Falla a ~ 50 Gy.
- **Electrónica Rad-Hard**: Soporta > 1000 Gy.

Dosis: ¿Evento Único o Daño Acumulado?

Tasa de Dosis ($\dot{D}$)

- Intensidad de la radiación en un momento dado (Gy/s o rad/h).
- Importante para detectar picos de radiación solar.
- Define fallos temporales o cortocircuitos.

Dosis Total (TID)

- La integral de la tasa de dosis en el tiempo: $D_{total} = \int \dot{D} dt$.
- Es una medida del **envejecimiento** del componente.
- Define el "Fin de Vida" (EOL) de la misión.

Efectos Diferenciados

- **Efectos de Dosis Total:** Degradación lenta (corriente de fuga, cambio de voltajes).
- **Efectos de Evento Único (SEE):** Daño por un solo ion pesado (no depende de la acumulación, sino de la energía de una sola partícula).

Kerma vs. Dosis Absorbida: El Proceso en Dos Etapas

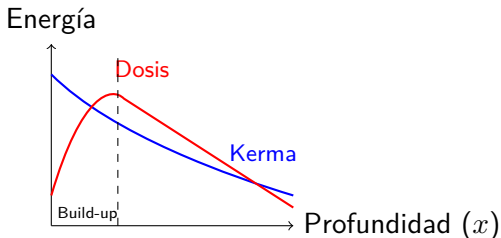
- **Kerma** (Kinetic Energy Released per unit MAss): Energía transferida de fotones a electrones en un punto dado (J/kg).
- **Dosis Absorbida** (D): Energía realmente depositada por esos electrones a lo largo de su trayectoria (J/kg).

Etapas 1: Interacción (Kerma)

Un fotón choca (Compton/Fotoeléctrico) y libera un electrón energético. **El Kerma es puntual.**

Etapas 2: Transporte (Dosis)

El electrón viaja e ioniza el medio. **La Dosis es distribuida.**



En la superficie, el **Kerma** $>$ **Dosis**. A mayor profundidad, se alcanza el equilibrio.

Relevancia en Espacio

En componentes microelectrónicos muy delgados, el electrón puede salir del chip antes de depositar su energía. El Kerma sería alto, pero la Dosis (daño real) sería baja.

Producción de Pares: ¿Absorción o Multiplicación?

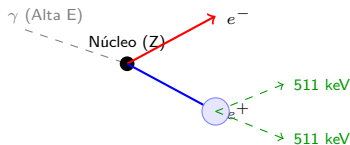
El Proceso ($\gamma \rightarrow e^- + e^+$)

- Ocurre para energías $E_\gamma > 1.022 \text{ MeV}$.
- El fotón desaparece, pero transfiere su energía a dos partículas cargadas.

Riesgo: Radiación Secundaria

1. **Ionización:** El par electrón/positrón deposita dosis localmente.
2. **Aniquilación:** El positrón genera dos fotones de 511 keV al final de su rango.

Esquema de Producción y Aniquilación



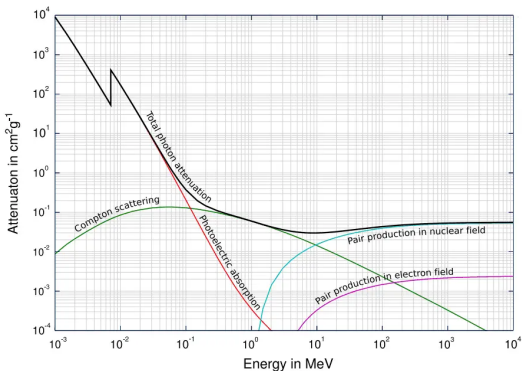
Conclusión: En materiales de alto Z , la producción de pares puede "ensuciar" el entorno con fotones secundarios de energía media. Lluvia de partículas y multiplicación de radiación dentro del blindaje.

Dominios de Interacción: De Rayos X a Gammas de Alta Energía

- **Efecto Fotoeléctrico** (< 100 keV):
Dominio de blindajes de **Alto Z**.
Crítico para electrónica sensible.
- **Efecto Compton** ($0.1 - 10$ MeV):
Independiente del material por unidad de masa. Rango principal de la radiación gamma espacial.
- **Producción de Pares** (> 1.02 MeV):
El fotón desaparece creando un par e^-/e^+ . Proporcional a Z^2 .

Importancia Espacial

En misiones de espacio profundo, se deben considerar los tres procesos debido al amplio espectro de la radiación cósmica.



Probabilidad de interacción por distintos procesos

Optimización de Blindaje: Masa y Densidad

- **Masa de Lanzamiento:** En ingeniería espacial, la masa es “todo”. El espesor (x) importa menos que la **masa por área** (g/cm^2).
- **Densidad Electrónica:** A energías medias (Efecto Compton), la absorción depende casi exclusivamente del número de electrones disponibles, no del material.

Material	Densidad (ρ)	Z Efectivo	Eficacia vs. Fotones
Polietileno	$0.94 \text{ g}/\text{cm}^3$	~ 5.5	Baja (requiere mucho volumen)
Aluminio	$2.70 \text{ g}/\text{cm}^3$	13	Balance Estructural
Plomo	$11.34 \text{ g}/\text{cm}^3$	82	Excelente (pero muy pesado)

El "Costo" del Blindaje

Para frenar fotones de 1 MeV al 50%, necesitarías ~ 0.8 cm de Plomo o ~ 9 cm de Polietileno. Sin embargo, el volumen extra del polietileno puede comprometer el diseño de la nave.

Limitaciones: Radiación Secundaria y Bremsstrahlung

- **Producción de Rayos X secundarios:** Cuando los electrones o protones del espacio chocan con materiales de **Alto Z** (como el Plomo), se produce *Bremsstrahlung*.
- **El Rol del Hidrógeno (Anticipo):**
 - Los materiales con mucho Hidrógeno (como el polietileno) tienen baja sección eficaz para fotones...
 - **Pero** son fundamentales para evitar la fragmentación nuclear que veremos en la sección de iones.

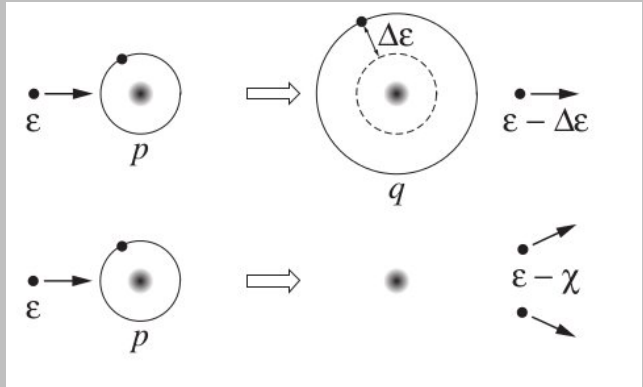
Conclusión de esta sección

Para fotones "puros", el metal es mejor. Pero en el espacio, donde hay iones, el metal genera cascadas secundarias de fotones. Por eso diseñamos **Blindajes Graduados**:

Material de Bajo Z (Frena iones suavemente) + **Material de Alto Z** (Detiene los fotones resultantes).

Procesos Colisionales

- Excitación por impacto de electrones y iones
- Ionización por impacto de electrones y iones

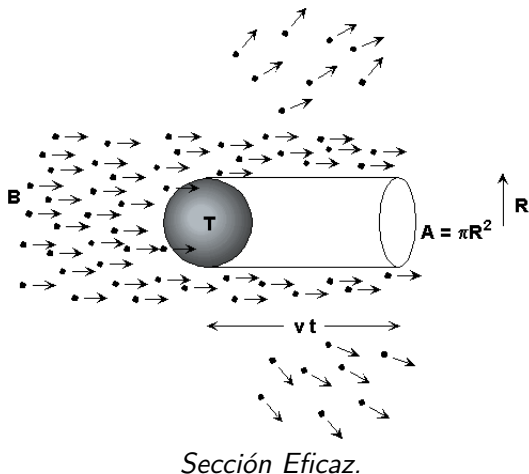


Concepto de Sección Eficaz (σ)

Definición Física:

- Representa el **área efectiva** de interacción entre un electrón incidente y un blanco (átomo/ion).
- No es el tamaño geométrico real, sino una medida de la **probabilidad** de un proceso específico.
- Unidades: cm^2 o Barns ($10^{-24}cm^2$).

Dependencia: $\sigma = \sigma(E)$, donde E es la energía cinética del electrón proyectil.



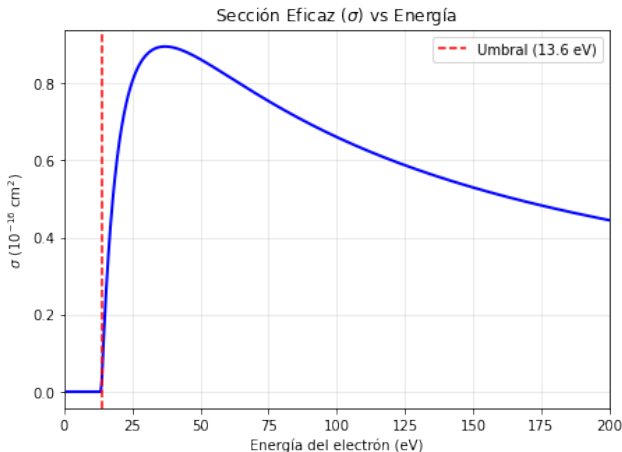
Ionización por Impacto de Electrones: Fórmula de Lotz

Es la aproximación estándar para la ionización (**malísima!**):

$$\sigma_{ion}(E) = a_i \xi \frac{\ln(E/E_i)}{E \cdot E_i}$$

Características:

- $\sigma = 0$ si $E < E_i$ (Umbral).
- Máximo entre 2.7 y 4 veces E_i .
- Caída lenta a altas energías ($\sim \ln E/E$).



$\sigma_{ion}(E)$ para Hidrógeno

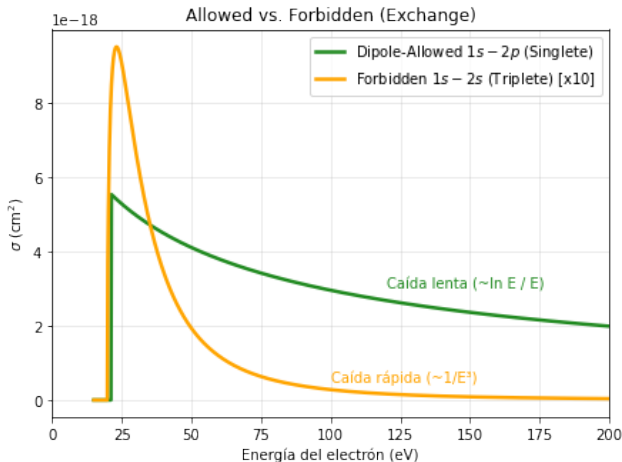
Excitación por Electrones: Transiciones Permitidas vs. Prohibidas

Allowed (Dipolares):

- Sin cambio de espín.
- Interacción de largo alcance.
- Caída suave: $\sigma \sim \ln E/E$.

Forbidden (Intercambio):

- Cambio de espín (Singlete $\rightarrow$ Triplete).
- Requiere penetración del electrón.
- Caída muy rápida: $\sigma \sim E^{-3}$.

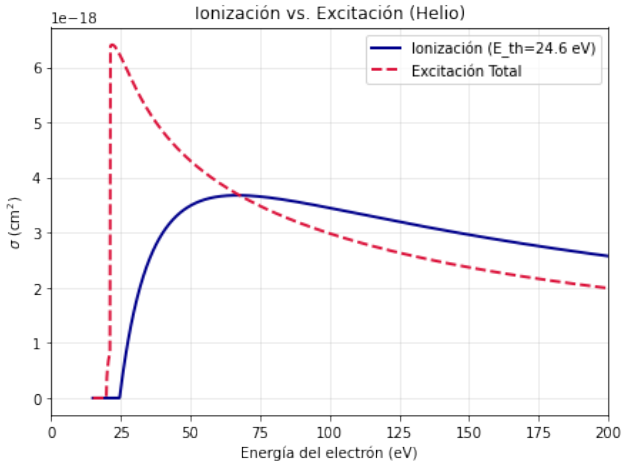


$$\sigma_{exc}(E) \text{ para Helio}$$

Excitación: Fórmula de Van Regemorter

Diferencias Excitación con Ionización:

- Excitación tiene umbrales menores (se excita antes de ionizarse).
- Excitación dipolar directamente relacionada con f_{ij} .
- Excitación toma el máximo más cerca del threshold.



$$\sigma_{exc}(E) \text{ vs. } \sigma_{ion}(E) \text{ para Helio}$$

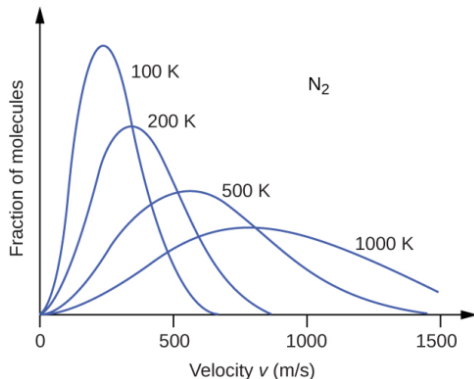
El Coeficiente de Tasa (Rate Coefficient)

Del Micro al Macro:

- En un plasma, los electrones tienen una distribución de energías (Maxwelliana).
- El *Rate Coefficient* es el promedio de la velocidad por la sección eficaz:

$$Q(T) = \langle \sigma v \rangle = \int_{E_{th}}^{\infty} \sigma(E) v(E) f(E, T) dE$$

Importancia: Determina la frecuencia de colisiones por unidad de volumen.



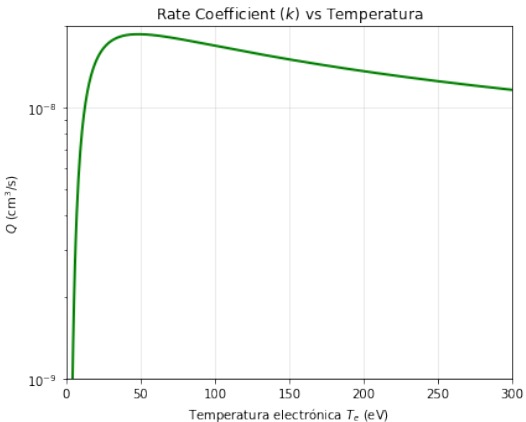
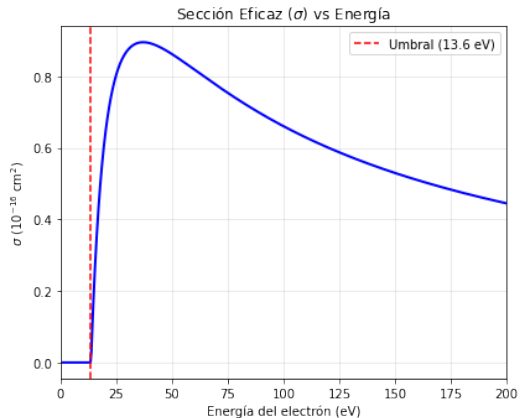
Maxwell Boltzmann distribution:

$$f(v, T) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[\frac{m}{k_B T} \right]^{3/2} v^2 \exp \left(-\frac{m v^2}{2 k_B T} \right)$$

Tasa y Sección Eficaz: Ionización

$\sigma_{ion} v f(v) dv$ es función de la velocidad

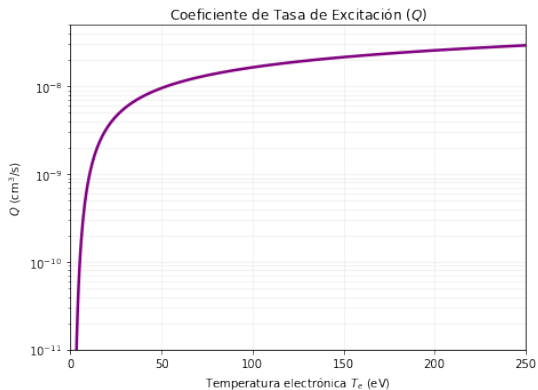
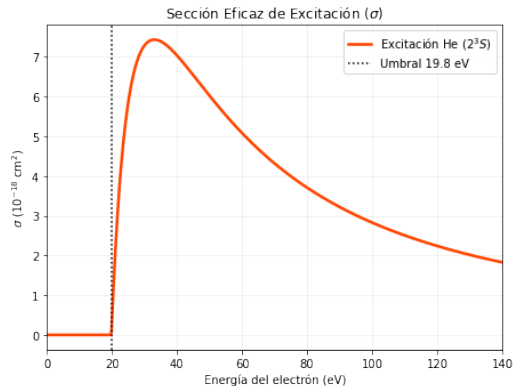
$S = \langle \sigma v \rangle \equiv \int \sigma v f(v) dv$ es función de la Temperatura unicamente !!



Tasa y Sección Eficaz: Excitación

$\sigma_{exc} v f(v) dv$ es función de la velocidad

$Q = \langle \sigma v \rangle \equiv \int \sigma v f(v) dv$ es función de la Temperatura únicamente !!



Ion-Impact Ionization

Sección Eficaz de Ionización por Impacto de Ion

Cálculo aproximado usando modelos clásicos y semi-clásicos. Los modelos implementados son: **BEA (Gryzinski)**, **Lotz empírico** y **Clásico simple**. La energía equivalente del electrón se obtiene por escalado de velocidades: $E_{eq} = E_{ion} \times (m_e/M_{ion})$.

⚙️ Átomo objetivo

■ Parámetros personalizados

H (Hidrógeno)

$Z = 1$ | $I_p = 13.6$ eV | $n = 1$ | $N_i = 1$

Radio orbital ≈ 0.53 Å

⚡ Ion proyectil

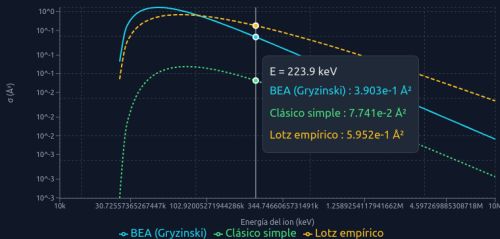
■ Parámetros personalizados

p (Protón)

$M = 1$ amu | $Z_{ion} = 1$

$m_e/M = 5.45e-4$

σ vs Energía del ion — H (Hidrógeno) + p (Protón)



<https://golden-brook-6992.d.kiloapps.io>

Ion-Impact Ionization

Forma general:

$$\sigma_{ion} \propto N_i \left(\frac{1}{I_p} \right)^2 Z_{ion}^2 f(u)$$

donde

$$u = \frac{E_{eq}}{I_p}$$

es la **energía reducida**

$$E_{eq} = E_{ion} \times \frac{m_e}{M_{ion}}$$

La sección eficaz depende de la **velocidad** del ion, no de su energía directamente. Un ion de masa M con energía E_{ion} tiene la misma velocidad que un electrón con energía E_{eq} . Para el protón: $E_{eq} \approx \frac{E_{ion}}{1836}$.

Diferentes fórmulas para ionización por impacto de iones

- Bethe:

$$\sigma_{ion} \propto \left(\frac{Z_{eff}}{\beta} \right)^2 \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I_p} \right) - \beta^2 \right]$$

donde la carga apantallada Z_{eff} tiene en cuenta que:

- Bajas energías: los iones pueden capturar electrones $\Rightarrow Z_{eff} \ll Z_{ion}$
- Altas energías: $Z_{eff} \rightarrow Z_{ion}$
- BEA (Binary Encounter Approximation, Gryzinski (1965)):

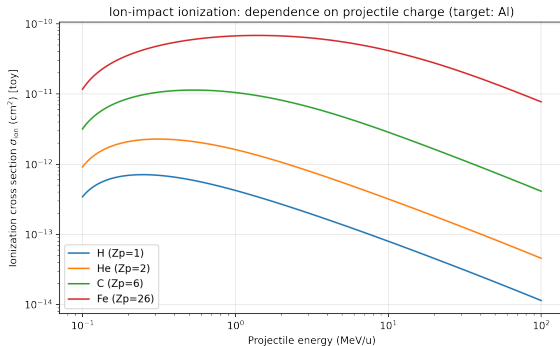
$$f(u) = \frac{u-1}{u^2} \left[1 + \frac{2}{3u} \left(1 - \frac{1}{2u} \right) \ln \left(2.7 + \sqrt{u-1} \right) \right]$$

- Lotz (semiempirical) (1967):

$$f(u) = \frac{\ln(u)}{u I_p^2}$$

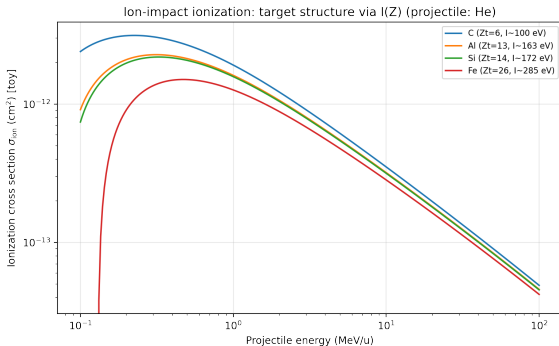
Características de la ionización por impacto de iones

- $\sigma_{ion} \propto Z_{eff}^2$.
- La masa del ion sólo entra en juego para el cálculo de la velocidad (misma forma).
- Cuidado!: siempre tener en cuenta si se habla de energía total, o por nucleón.



Características de la ionización por impacto de iones

- $\sigma_{ion} \propto \frac{1}{v^2}$.
- La estructura del blanco sólo entra en I_p .
- Cuanto mayor es la energía de ionización, es más difícil ionizar al átomo.
- A altas energías todos los blancos toman el mismo comportamiento.



Ion Impact vs Electron Impact (para Ingenieros)

Proyectil: Ion (H , He^{2+} , C^{Z+} , Fe^{26+} , ...)

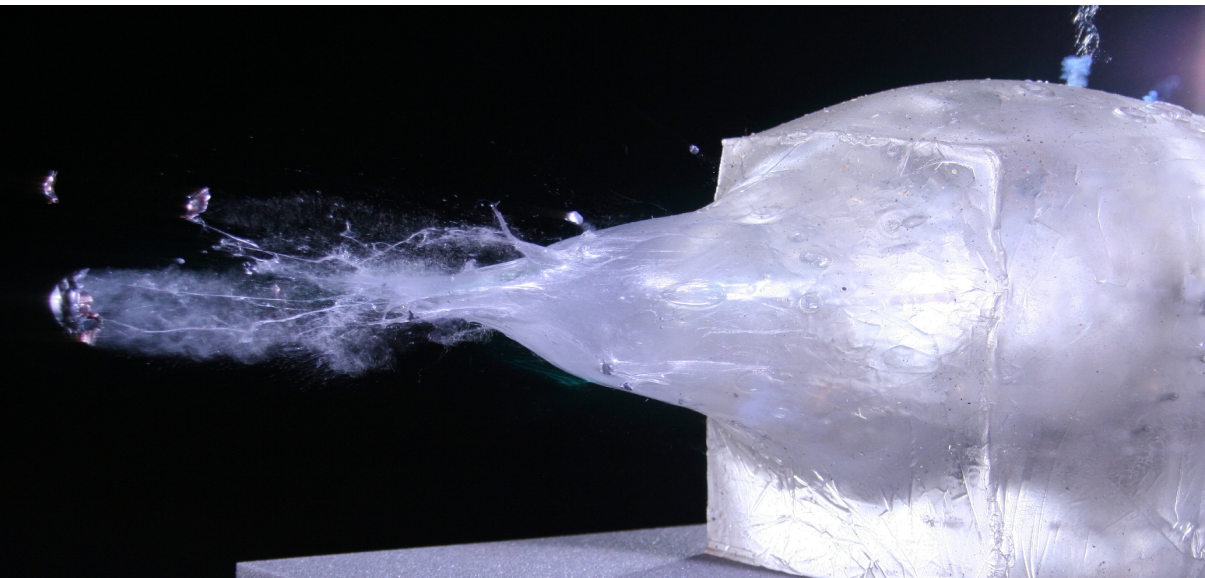
- Trayectoria generalmente recta (poca deflexión).
- Interacción Coulombiana (con electrones).
- $\sigma \propto Z_{ion}^2$ y v^{-2}
- Puede interactuar con los núcleos (elastic nuclear scattering):

$$E_{\text{transfer}} = \frac{4 M_p M_t}{(M_p + M_t)^2} E$$

Proyectil: Electron

- $M_p = M_t$ (mucho mayor transferencia de energía).
- cinemática “simétrica”.
- Importancia de detalles de estructura atómica.
- M_p es mucho más importante.

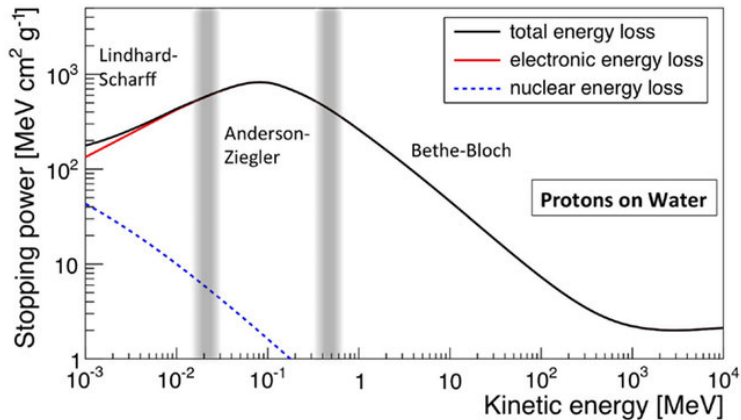
Stopping Power



Stopping Power

Pérdida de energía E por
unidad de longitud x :

$$S(E) = -\frac{dE}{dx}$$



(Problemita de unidades ...)

El problema fundamental

¿Cómo pierde energía una partícula cargada al atravesar la materia?

Microscópicamente:

- Colisiones con electrones del medio
- En cada colisión: transferencia de energía T
- Rango posible: $I < T < T_{\max}$

Macroscópicamente:

- Pérdida de energía por unidad de longitud: $S(E) = -\frac{dE}{dx}$
- Depende del material y la partícula
- Cantidad *promedio* sobre muchas colisiones

Pregunta clave

¿Cómo conectamos la descripción microscópica (colisiones individuales) con la macroscópica (pérdida continua)?

Colisión elástica: No relativista vs Relativista

No Relativista

$$T_{max} = \frac{4Mm}{(M+m)^2} E$$

$$E = \frac{1}{2} M u^2$$

$$v_M = \frac{M-m}{M+m} u \quad v_m = \frac{2M}{M+m} u$$

NR: Casos límite

Caso	v_m	T_{max}
$M \gg m$	$2u$	$\approx 4 \frac{m}{M} E$
$M = m$	u	E
$M \ll m$	$\approx 2 \frac{M}{m} u$	$\approx 4 \frac{M}{m} E$

Relativista

$$T_{max} = \frac{2mc^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma \frac{m}{M} + (\frac{m}{M})^2}$$

$$E_{total} = \gamma M c^2 \quad \beta = v/c$$

$$E_{cin} = (\gamma - 1) M c^2 \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Relativista: Casos límite

Caso	T_{max}
$M \gg m$	$\approx 2mc^2 \beta^2 \gamma^2$
$M = m$	E_{cin}
Límite NR	$\rightarrow 4 \frac{m}{M} E$

¡ T_{max} es el LÍMITE SUPERIOR, no el valor transferido en cada colisión!

La pieza clave: $d\sigma/dT$

- **Definición: Sección eficaz diferencial $\frac{d\sigma}{dT}$**
Probabilidad (por átomo) de que en una colisión se transfiera una energía entre T y $T + dT$.
- **Unidades:**

$$\left[\frac{d\sigma}{dT}\right] = \frac{\text{Área}}{\text{Energía}} = \frac{cm^2}{MeV}$$
- Caso más simple: Rutherford (no relativista). Para una partícula de carga z y velocidad v :

$$\left(\frac{d\sigma}{dT}\right)_R = \frac{2\pi z^2 e^4}{m_e v^2} \frac{1}{T^2}$$

- $\frac{d\sigma}{dT} \propto 1/T^2$: Colisiones con poca transferencia son más probables.
- $\frac{d\sigma}{dT} \propto z^2/v^2$: Partículas lentas interactúan más tiempo. Mayor carga, mayor interacción Coulombiana.
- Caso general: $\frac{d\sigma}{dT} = \left(\frac{d\sigma}{dT}\right)_R f(E, \beta, T)$

T no es función de E ... ¡es una variable aleatoria!

1. La energía transferida T en una colisión no es un valor fijo, y **no es** una función de E .
2. Distribución diferencial $\frac{d\sigma}{dT}(E, T)$

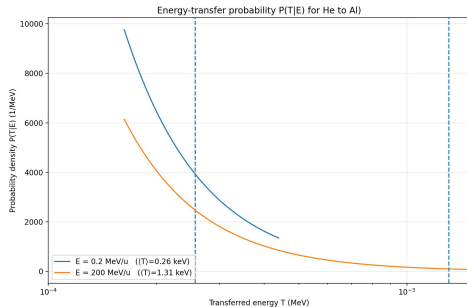
$$\sigma_{\text{tot}} = \int_0^{T_{\text{max}}} \frac{d\sigma}{dT} dT = \int_I^{T_{\text{max}}} \frac{d\sigma}{dT} dT$$

3. Densidad de probabilidad

$$P(T|E) = \frac{1}{\sigma_{\text{tot}}} \frac{d\sigma}{dT}$$

4. Energía media transferida

$$\langle T \rangle = \int_I^{T_{\text{max}}} T P(T|E) dT$$



T es una variable **estocástica**.

Cada colisión produce una transferencia distinta. Se puede calcular su **valor medio**

$$\langle T \rangle = \frac{1}{\sigma_{\text{tot}}} \int_I^{T_{\text{max}}} T \frac{d\sigma}{dT} dT$$

Construyendo el stopping power (1)

- Paso 1: Energía promedio transferida por colisión: $\langle T \rangle$
- Paso 2: Tasa de colisiones por unidad de longitud

$$\frac{dN}{dx} = n \cdot \sigma$$

donde n = densidad de electrones [cm^{-3}]

- Paso 3: Pérdida de energía por unidad de longitud

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{dN}{dx} \langle T \rangle = n \sigma \langle T \rangle = n \sigma \frac{1}{\sigma} \int_I^{T_{\max}} T \frac{d\sigma}{dT} dT$$

Resultado final

$$-\frac{dE}{dx} = n \int_I^{T_{\max}} T \frac{d\sigma}{dT} dT$$

Construyendo el stopping power (2) - Análisis dimensional

Verificación de unidades: $-\frac{dE}{dx} = n \int_I^{T_{\max}} T \frac{d\sigma}{dT} dT$

$$\left[T \frac{d\sigma}{dT} \right] = \text{MeV} \frac{\text{cm}^2}{\text{MeV}} = \text{cm}^2$$

$$\left[\int T \frac{d\sigma}{dT} dT \right] = \int \text{cm}^2 dT = \text{cm}^2 \text{MeV}$$

$$[n] = \frac{1}{\text{cm}^3} \quad (\text{electrones/cm}^3)$$

$$\left[n \int T \frac{d\sigma}{dT} dT \right] = \frac{1}{\text{cm}^3} (\text{cm}^2 \cdot \text{MeV}) = \frac{\text{MeV}}{\text{cm}}$$

- En las tablas puede aparecer el *mass stopping power*:

$$\left[\frac{S}{\rho} \right] = \frac{\text{MeV cm}^2}{\text{g}}$$

- Para convertir en *linear stopping power*, hay que multiplicar por la densidad del material en $\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$:

$$S = \rho \left(\frac{S}{\rho} \right) \quad \left[\frac{\text{MeV}}{\text{cm}} \right]$$

De $S(E)$ a Rango

El stopping power expresa la pérdida de energía por unidad de distancia: Stopping power gives energy loss per length:

$$\begin{aligned} S(E) &\equiv -\frac{dE}{dx} \\ \implies dx &= -\frac{dE}{S(E)} \end{aligned}$$

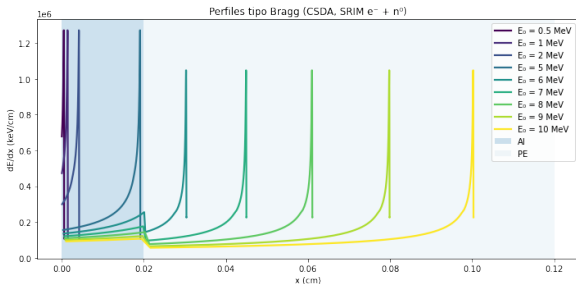
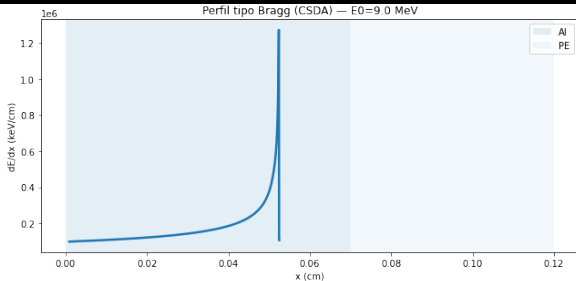
La distancia que atraviesa el ión mientras pierde energía (desde E_i hasta E_f):

$$x(E) = \int_{E_f}^{E_i} \frac{dE'}{S(E')}$$

El **Rango** (cuando $E_f \rightarrow 0$):

$$R(E_0) = \int_0^{E_i} \frac{dE'}{S(E')}$$

El pico de Bragg (depósito de energía)



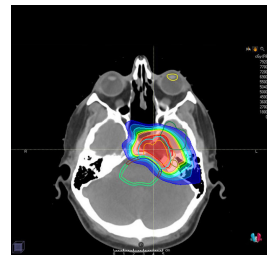
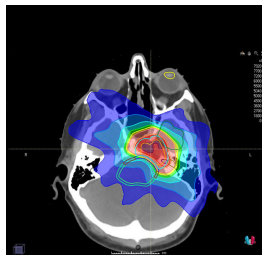
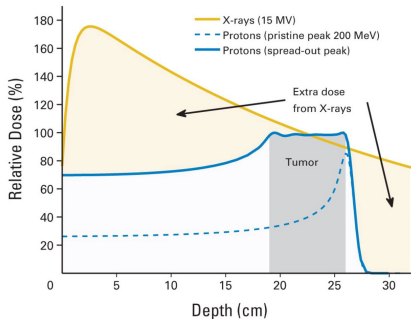
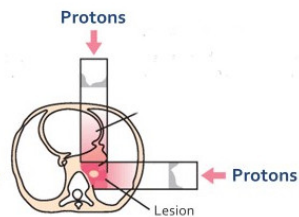
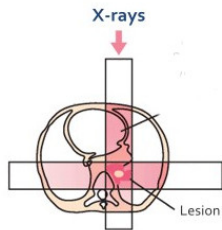
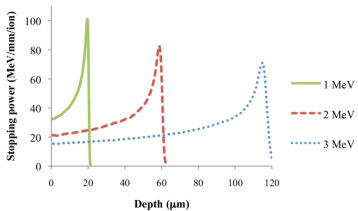
Por qué aparece el pico: al avanzar en el material, el proyectil se frena y su velocidad v disminuye (aprox. $S \propto 1/\beta^2$). Por eso, cerca del final de la trayectoria, la energía depositada localmente crece rápido y aparece el **pico de Bragg**.

Rango y posición del pico: la profundidad característica se obtiene integrando

$$R \simeq \int_0^{E_0} \frac{dE}{S(E)}.$$

Al aumentar la energía inicial E_0 , crece el rango y el pico se desplaza a mayores profundidades.

Protonterapia



De Stopping Power a LET

Stopping Power: denota *toda* la energía perdida por el proyectil incidente.

Linear Energy Transfer (LET): cuenta la energía *depositada localmente* en el medio.
Generalmente se expresa en (keV/ μm)

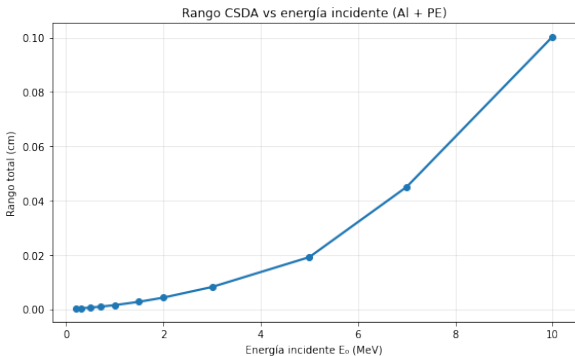
Aproximación para Ingenieros:

$$\text{LET}(E) \approx S_{\text{coll}}(E)$$

Conversión de unidades:

$$\text{LET}(E) [\text{keV}/\mu\text{m}] = 0.1 \times S(E) [\text{MeV}/\text{cm}]$$

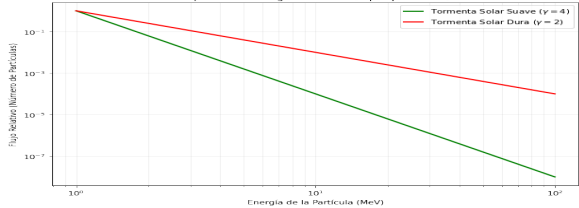
$$\left(1 \text{ MeV}/\text{cm} = \frac{10^3 \text{ keV}}{10^4 \mu\text{m}} = 0.1 \text{ keV}/\mu\text{m} \right)$$



Tormentas

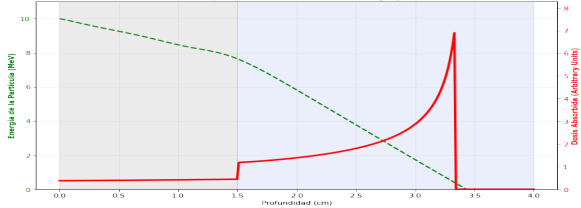
Flujo Real en Tormentas

Espectro de Energía Incidente (Input para la IA)



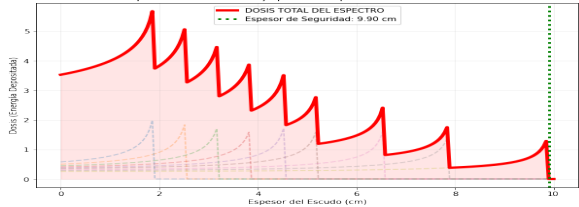
Energía y Dosis

IA Multi capa. Cambio de Pendiente en Energía y Dosis



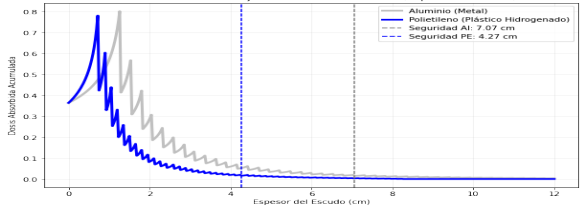
Rango en Tormentas

Optimización de Blindaje para un Espectro de Tormenta Solar



Blindajes

Física Atómica en Blindaje: Aluminio vs. Polietileno (Espectro Continuo)



Conclusiones (Stopping)

- El stopping power NO es una propiedad de una sola colisión
- Es el **promedio estadístico** sobre todas las colisiones posibles
- La sección eficaz diferencial $d\sigma/dT$ contiene la física microscópica
- La integral $\int T \frac{d\sigma}{dT} dT$ tiene unidades de Energía $\times$ Área
- La densidad electrónica n convierte a Energía/Longitud

$$-\frac{dE}{dx} = n \int_I^{T_{\max}} T \frac{d\sigma}{dT} dT$$

Conexión fundamental

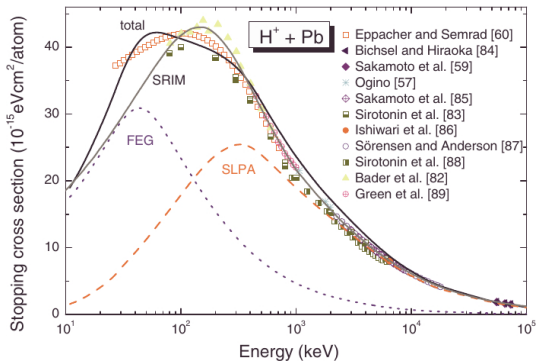
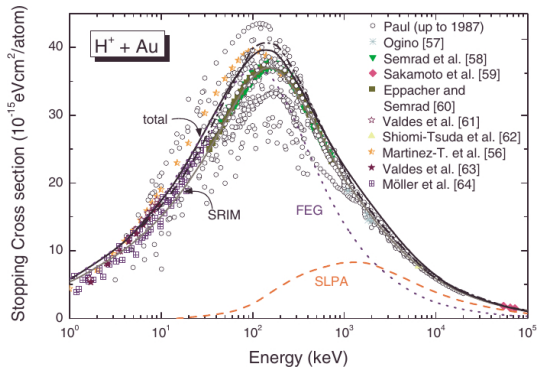
Microscópico (colisiones) $\xrightarrow{\text{estadística}}$ Macroscópico (pérdida continua)

Para profundizar

Referencias clásicas:

- *Passage of Particles Through Matter* - Particle Data Group
- *The Stopping and Range of Ions in Solids* - Ziegler, J.F.
- *Radiation Detection and Measurement* - Knoll, G.F.
- NIST Stopping Power Tables:
<https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables>

Stopping Power: Resultados Experimentales



C.C. Montanari, C.D. Archubi, D.M. Mitnik, and J.E. Miraglia, PRA **79**, 032903 (2009).

Comparativa de Daño: Fotones vs. Partículas Cargadas

Fotones (γ , Rayos X):

- **Interacción Estocástica:** Recorren grandes distancias y luego interactúan de golpe (Fotoeléctrico/Compton/Par).
- **Transferencia Indirecta:** Liberan electrones secundarios (Kerma) que luego depositan la dosis.
- **Atenuación Exponencial:** Siguen la Ley de Beer-Lambert $I = I_0 e^{-\mu x}$.
- **Penetración:** Muy alta; requieren blindaje denso para interactuar.
- **Daño por Ionización (TID):** Causan degradación gradual en aislantes y óxidos (corrientes de fuga).

Partículas Cargadas (p^+ , e^- , HZE):

- **Interacción Continua:** A lo largo de toda la trayectoria.
- **Deposición Localizada:** La dosis no es uniforme a lo largo del camino.
- **Pico de Bragg:** Depositán la mayoría de su energía justo antes de detenerse. Daños biológicos/electrónicos.
- **Eventos Únicos (SEE):** Un solo ion pesado puede causar un corto o cambio de bit (SEU) debido a su alto LET.
- **Daño por Desplazamiento (DD):** Arrancan átomos de la red cristalina, degradando paneles solares y sensores CCD.

Implicaciones en Ingeniería Espacial: Blindaje

Masa de Lanzamiento:

- En ingeniería espacial, la masa es "todo". El espesor (x) importa menos que la masa por área (g/cm^2).

Estrategia de Blindaje Graduado:

- Usar Materiales Ricos en Hidrógeno (Bajo Z) para frenar iones HZE suavemente.
- Usar Materiales de Alto Z (Plomo/Tántalo) para detener los fotones secundarios (Bremsstrahlung) resultantes.

- **Órbita LEO (Cinturones de Van Allen):** Dominada por protones y electrones atrapados. El aluminio estructural suele bastar para absorber la radiación secundaria.
- **Espacio Profundo / Marte:** Exposición a GCR (iones pesados muy energéticos). El blindaje metálico es contraproducente por la radiación secundaria; se prefieren materiales ricos en hidrógeno (agua/polietileno).

Conclusión de Ingeniería: El diseño óptimo es un **blindaje graduado**: materiales ligeros al exterior (frenan iones) y materiales densos al interior (detienen fotones).

Fuentes estándar y bases de datos de *stopping power* (I)

Base / Reporte	Contenido principal	Acceso / institución
IAEA Stopping Power DB	Compilación global de datos experimentales y teóricos de <i>stopping</i> , con referencias cruzadas a ICRU y NIST.	https://www-nds.iaea.org/stopping/
NASA CREME96 / HZETRN	Modelos y herramientas para radiación cósmica y flujos de partículas pesadas (HZE) en entorno espacial.	https://creme.isde.vanderbilt.edu
ESA SPENVIS	Entorno de simulación que integra modelos de radiación, degradación de materiales y <i>stopping</i> en misiones ESA.	https://www.spenvis.oma.be

Fuentes estándar y bases de datos de *stopping power* (II)

Base / Reporte	Contenido principal	Acceso / institución
NIST PSTAR / ASTAR / ESTAR	Tablas de poder de frenado y rango para protones, partículas alfa y electrones en diversos materiales.	https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text
SRIM / TRIM	Simulación universal de <i>stopping</i> electrónico/nuclear, rangos y daño para cualquier par ión-blanco.	http://www.srim.org
ICRU Reports 49, 73, 90	Valores sugeridos basados en datos y/o modelos para un universo de blancos acotado (proyectiles: protones, electrones, positrones, iones de Li a Ar).	https://icru.org

Tipos de datos de *stopping power* en aplicaciones aeroespaciales (I)

Aplicación	Tipo de SP	Energía típica	Materiales	Fuentes
Protección radiológica y escudos espaciales	Electrónico (Se) y nuclear (Sn) para p, He, C, Fe, HZE	10 MeV – 10 GeV/nuc	Al, Ti, C, polímeros, agua, LiH	NIST PSTAR/ASTAR, ICRU 73/90, SRIM
Evaluación de daño por radiación en satélites	Se en semiconductores y Sn a bajas energías	100 keV – 1 GeV	Si, GaAs, SiO ₂ , Ge	NIST, SRIM, CREME96, ESA SPENVIS
Propulsión iónica y <i>plasma thrusters</i>	Se en gases nobles y materiales estructurales	0.1 – 100 keV	Xe, Ar, Kr, Mo, W	SRIM/TRIM, ICRU 49, ADAS

Tipos de datos de *stopping power* en aplicaciones aeroespaciales (II)

Aplicación	Tipo de SP	Energía típica	Materiales	Fuentes
Interacción con materiales ópticos y detectores	Se electrónico	10 keV – 10 MeV	Si, Ge, NaI(Tl), CsI, plásticos	NIST ESTAR, SRIM
Degradación superficial y <i>sputtering</i>	Sn nuclear dominante	1 keV – 1 MeV	Al, Cu, Au, TiN, SiC	SRIM
Blindaje en misiones interplanetarias (rayos cósmicos)	Se y Sn de HZE (C, O, Fe, Ni)	10 MeV – 100 GeV/nuc	Polietileno, Al, H ₂ O, compuestos ligeros	NASA CREME96, HZETRN, ICRU 90
Materiales para fusión espacial o propulsión nuclear térmica	Se en materiales refractarios	1 keV – 10 MeV	Be, W, Li, Zr, C	IAEA, SRIM, NIST, EXFOR