

Poderes de Frenado y Transporte de Partículas Cargadas

Rafael Martín-Landrove
Escuela de Física

Univesidad Central de Venezuela



Latin American alliance for
Capacity building in Advanced physics
LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea

UAN
UNIVERSIDAD
ANTONIO NARIÑO





Casos de Interés con la Interacción de Coulomb Dominante

Con la interacción de Coulomb hay tres casos de interés:

a

**Radio atómico
ó tamaño típico**

b

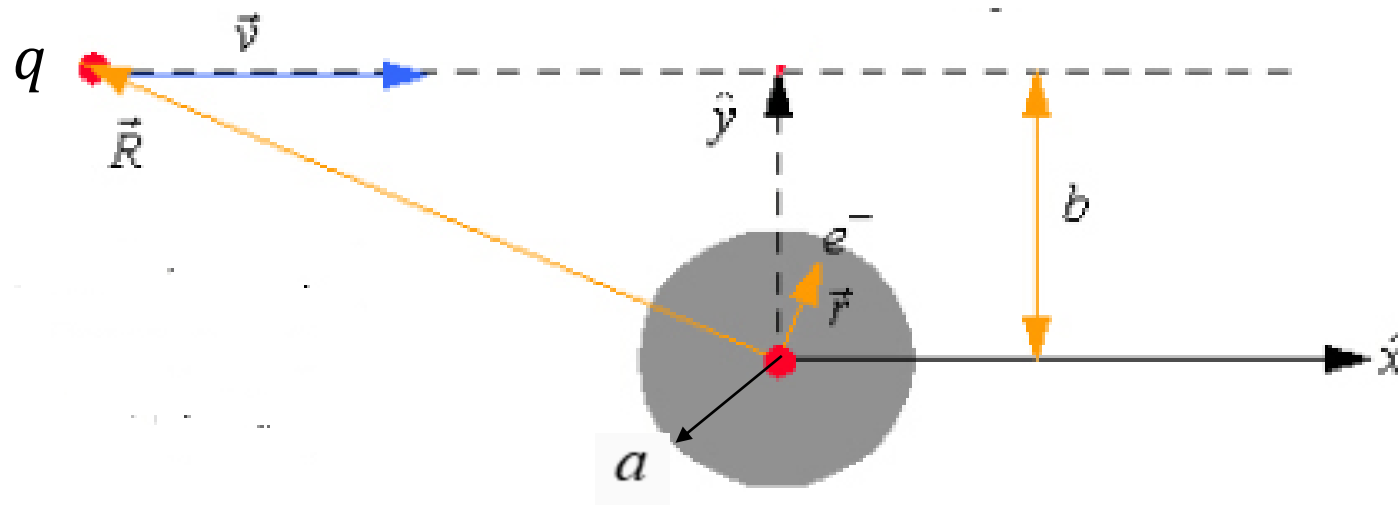
**Parámetro
de Impacto**

- Colisiones atómicas suaves
- Colisiones atómicas duras
- Colisión con el núcleo atómico

$(b \gg a)$

$(b \sim a)$

$(b \ll a)$





(1) Se afecta el átomo en conjunto:

- Las nubes electrónicas sufren una distorsión.
- Puede pasar a estados de mayor energía.
- Puede ocurrir una ionización.

(2) Los valores del parámetro de impacto b más probables son los más grandes: las colisiones suaves son las más probables.

(3) En medios de materia condensada la distorsión de las nubes electrónicas está asociada a fenómenos de polarización.



Efecto Cerenkov

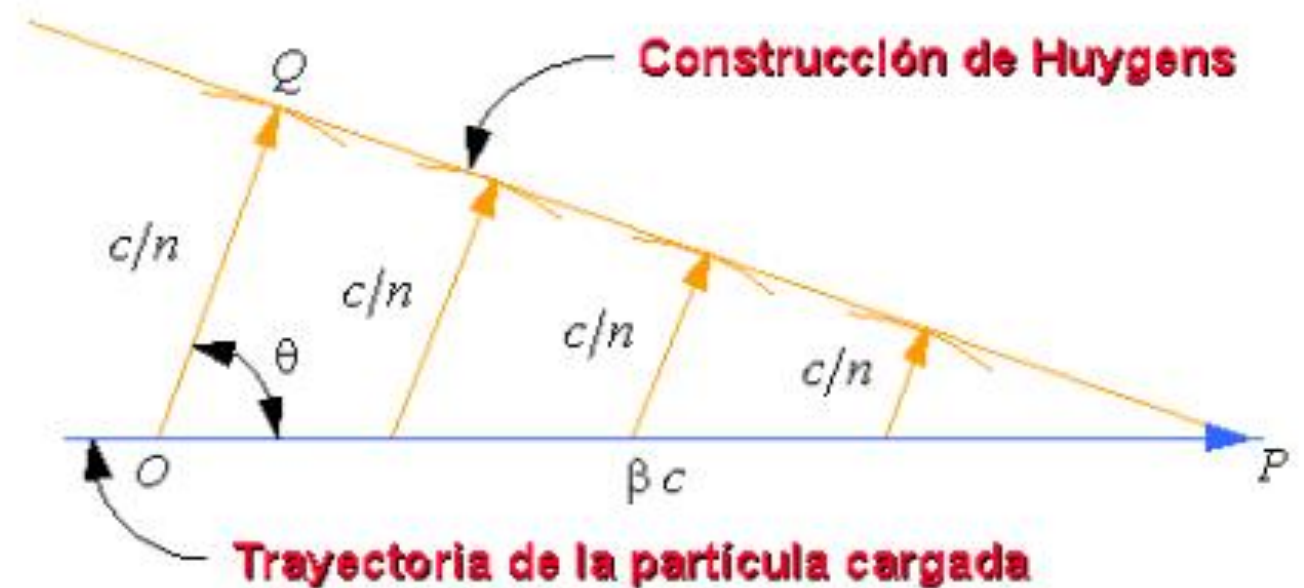
(4) Una fracción muy pequeña de la energía cedida al medio (menor a 0.1 %) en **colisiones muy suaves**, puede emitirse en forma de luz coherente (radiación Cerenkov):

- La pérdida está en el orden de **1 keV/cm** en vidrio ó lucite (despreciable comparado con las pérdidas por ionización).

- El espectro es continuo.

- Medida del ángulo θ se emplea para obtener el valor de β para la partícula cargada.

- Fenómenos de polarización y la radiación Cerenkov están relacionados.



$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{1}{\beta n}\right)$$



Colisión prácticamente frontal con el átomo:

- **Colisión con un electrón es muy probable: Es promovido fuera del átomo a gran energía cinética (rayos- δ).**
- **En el tratamiento teórico del problema de colisión la energía de enlace se desprecia y los electrones atómicos se tratan como libres (aproximación de electrón libre).**
- **Los rayos- δ tienen sus interacciones coulombianas subsecuentes y transfieren energía (dejan su propia traza).**



Aunque las colisiones duras son menos probables que las colisiones suaves la fracción de energía cedida por la partícula primaria es comparable.

- Pueden producirse rayos-X característicos y electrones Auger cuando un electrón atómico es removido de una capa interna por una colisión dura.**
- Por la vía anterior la energía transferida al medio puede transportarse a gran distancia de la traza de la partícula primaria.**



Colisiones con el Núcleo Atómico

Cuando $b \ll a$, la interacción de Coulomb se tiene con el núcleo.

Procesos:

(a) Elástico: No se deposita energía pero contribuye a la dispersión y transporte (electrones: 2 a 3% de las colisiones). $d\sigma/d\Omega \propto Z^2$, siendo más intenso a alto Z .

(b) Inelástico: No solamente se desvía, sino que entrega prácticamente la totalidad de su energía cinética a un fotón (rayos-X, bremsstrahlung).

Aquí:

- Electrones producen bremsstrahlung con facilidad.
- Protones tienen muy poca contribución. Sección eficaz $\propto 1/m$.
- En general es sensible a Z : Bajo Z (típico de tejido) y $E < 10 \text{ MeV}$ para electrones, es relativamente poco importante.



(c) Reacciones de aniquilación en vuelo del Positrón.

(d) Partículas de alta energía y cargadas (Ejemplo: protones a 100 MeV) pueden reaccionar con el núcleo. El núcleo producto queda excitado y normalmente se desintegra a través de procesos de cascada intranuclear (evaporación de partículas y rayos gamma).

(e) Piones: (masa: 139.6 MeV) $\tau = 2.54 \times 10^{-8} s^{-1}$ y pasa a muón con $\tau = 2.2 \mu s$ para pasar finalmente a electrón. En tejido es absorbido y aniquilado en oxígeno usualmente (producción de estrella): 70 MeV a neutrones, 30 MeV protones, alfas...



Poder de Frenado

Definición: El valor esperado de la tasa de cambio de la energía cedida por unidad de longitud por una partícula del **tipo Y** y energía **cinética T**, en un medio de número atómico Z, se denomina **poder de frenado**

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_{Y,T,Z} \longrightarrow 1 \text{ MeV/cm} = 1.602 \times 10^{-11} \text{ J/m}$$

Unidades:

Poder de frenado másico: ρ es la densidad del medio absorbente es

$$\left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_{Y,T,Z} \longrightarrow 1 \text{ MeV cm}^2/\text{g} = 1.602 \times 10^{-14} \text{ J m}^2/\text{kg}$$

Unidades:

$$D_{abs} = \Phi \frac{dT}{\rho dx}$$

fluencia de partículas

donde ρ se introduce por **conveniencia:** Es mejor para manejar las dosis



Descomposición del Poder de Frenado Másico

El poder de frenado másico se puede descomponer en:

$$\left(\frac{dT}{\rho dx}\right) \equiv \left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_c + \left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_r$$

Colisión → **radiativo**

Para el poder de frenado másico de colisión tenemos también:

$$\left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_c \equiv \left(\frac{dT_s}{\rho dx}\right)_c + \left(\frac{dT_h}{\rho dx}\right)_c$$

Colisiones suaves → **Colisiones duras**



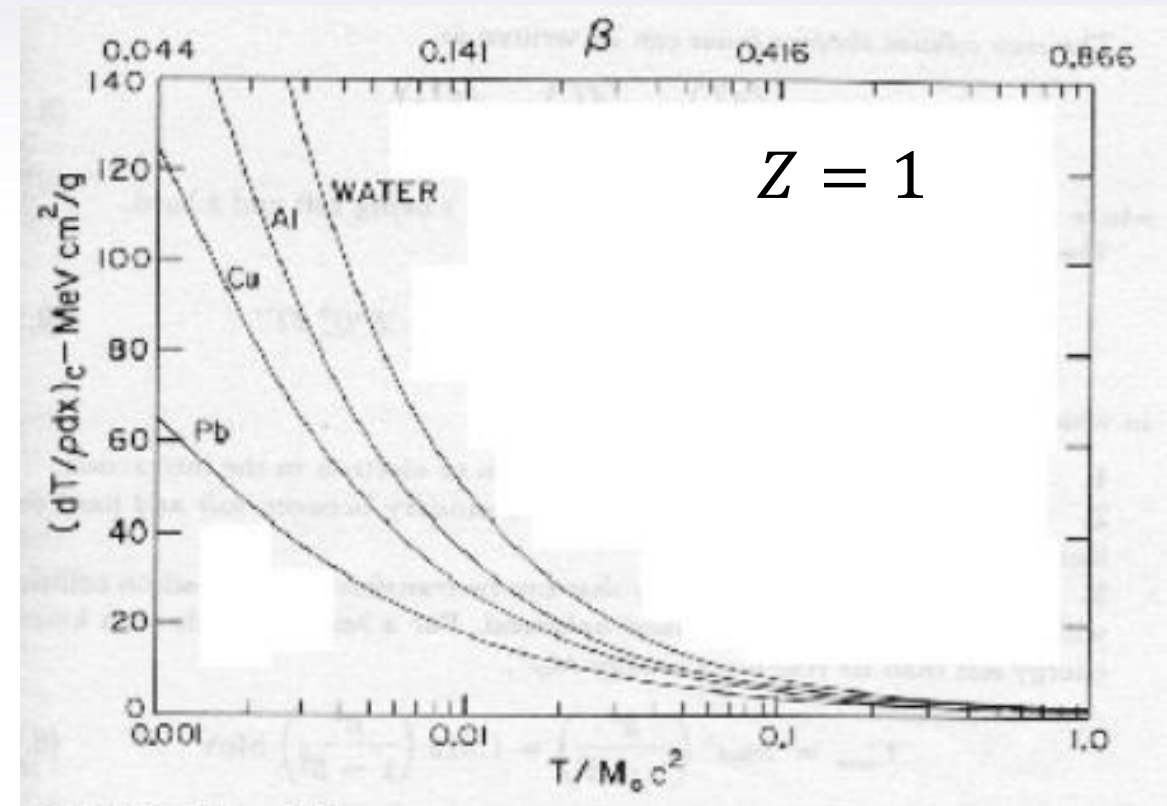
Fórmula de Bethe del Poder de Frenado Másico de Colisión

- Está dada por (expresión obtenida originalmente para colisiones suaves por Bethe en 1937 y luego ampliada para incluir las colisiones duras; no incluye el efecto de capas atómicas)

$$\left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_c = 2k \left\{ \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{\langle I \rangle_G (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 \right\}$$

$$k \equiv \frac{2C m_e c^2 z^2}{\beta^2} = 0.1535 \frac{Z z^2}{p_A \beta^2} \frac{\text{MeV cm}^2}{\text{g}}$$

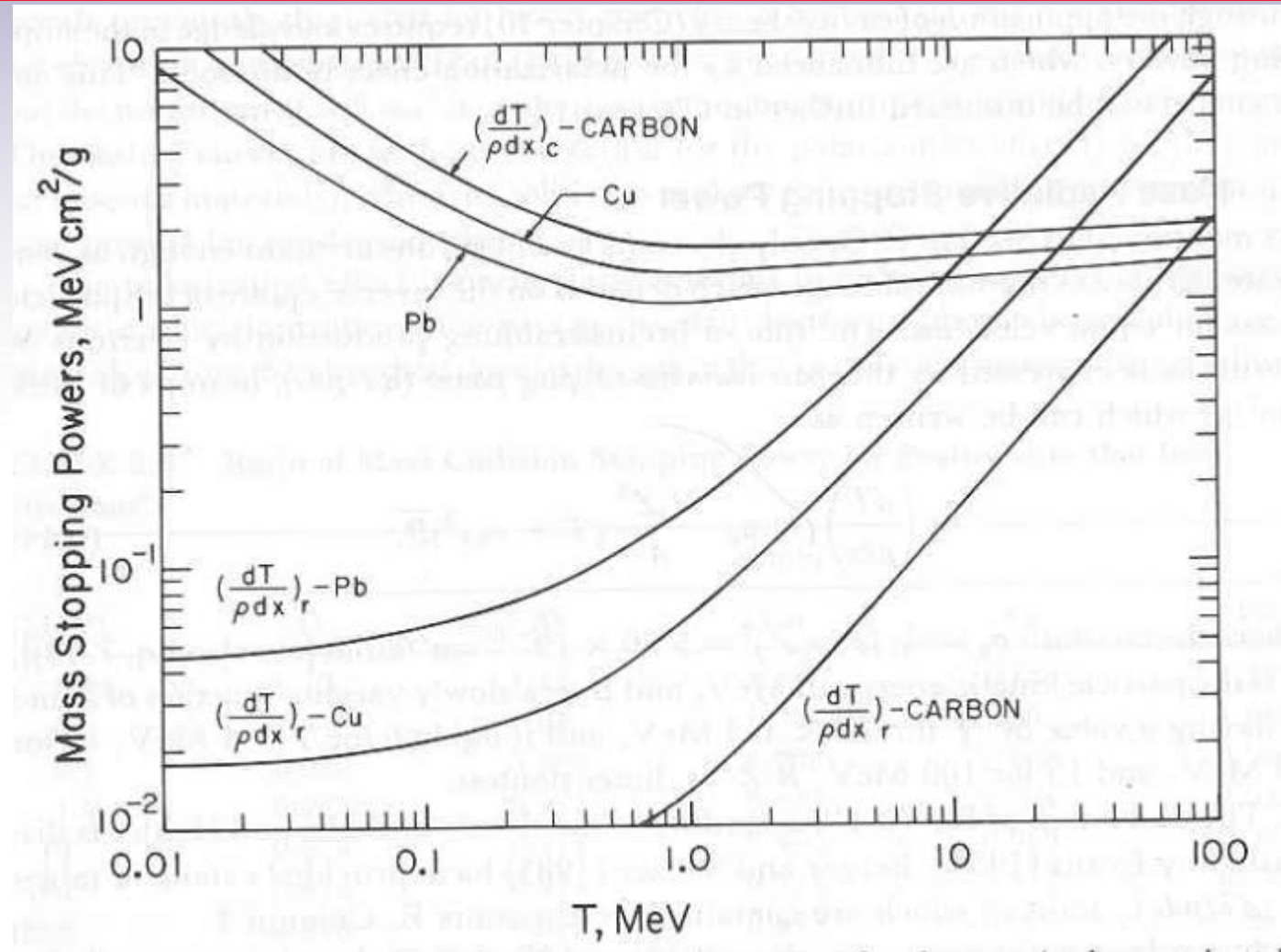
$$r_0^2 \equiv \frac{e^4}{m_e^2 c^4} \quad C \equiv \pi \frac{N_A Z}{p_A} r_0^2$$



- No reproduce lo observado para $\beta \rightarrow 0$ por la suposición de partícula cargada rápida que se usa en su derivación.



Poder de Frenado Másico Radiativo para Electrones



$$\frac{(dT/\rho dx)_r}{(dT/\rho dx)_c} \propto ZT$$



Poder de Frenado Másico en Compuestos

Según ICRU 37 (Stopping Powers for Electrons and Positrons, 1984) se tiene la regla de Bragg.

- **Regla de Bragg:** Los átomos contribuyen de manera independiente al poder de frenado y en consecuencia sus efectos son aditivos.

¿Qué pasó con la química? Cambios de tipo químico (formación de radicales libres y polimerización) no afectan el resultado por tener un efecto despreciable en la cantidad I en la expresión de Bethe. **Pero:** La energía depositada si produce alteraciones en el material.

- Si f_{Z_1}, f_{Z_2}, \dots , representan las fracciones de peso de los elementos con números atómicos Z_1, Z_2, \dots , que puedan estar presentes en el compuesto, el poder de frenado de la mezcla (n especies) viene dado por

$$\left(\frac{dT}{\rho dx} \right)_{mezcla} = \sum_{i=1}^n f_{Z_i} \left(\frac{dT}{\rho dx} \right)_{Z_i} \quad \sum_{i=1}^n f_{Z_i} = 1$$



Poder de Frenado Másico en Compuestos

- Para determinar el valor medio de la cantidad I en el compuesto se puede escribir

$$\ln I = \frac{\sum_{i=1}^n f_{Z_i} \frac{Z_i}{A_i} \ln I_i}{\sum_{i=1}^n f_{Z_i} \frac{Z_i}{A_i}}$$

- Una aproximación gruesa de la corrección de polarización δ puede escribirse como

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n f_{Z_i} \frac{Z_i}{A_i} \delta_i}{\sum_{i=1}^n f_{Z_i} \frac{Z_i}{A_i}}$$



Poder de Frenado Másico Restringido

- El poder de frenado de colisión másico es esencialmente la tasa (espacial) de pérdida de energía de una partícula cargada cuando tenemos colisiones.
- Uso del poder de frenado de colisión másico en el cálculo de dosis: Ocorre una sobrestimación a menos que haya CPE. Si no hay CPE hay rayos δ (**electrones de alta energía**) pueden escapar sin dejar energía.
- Poder de frenado restringido: Es la fracción del poder de frenado de colisión másico asociado con los rayos δ con energía igual ó menor que un valor de corte Δ y se simboliza como $\left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_\Delta$

- Hay una relación directa con la transferencia lineal de energía (LET, Linear Energy Transfer) L_Δ (ICRU 33, 1980) en:

$$L_\Delta (keV/\mu m) = \frac{\rho}{10} \left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_\Delta (MeV cm^2/g) \quad LET \equiv L_\Delta$$



Poder de Frenado Másico Restringido

- Si se verifica $\Delta = T_{max}$ tenemos que

$$\left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_{\Delta} = \left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_c \quad L_{\Delta} = L_{\infty}$$

- Para partículas cargadas pesadas

$$\left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_{\Delta} = k \left[\ln\left(\frac{2m_0 c^2 \beta^2 \Delta}{I^2(1-\beta^2)}\right) - 2\beta^2 - \frac{2C}{Z} \right] \quad \text{correcciones de capas atómicas}$$

- Para electrones y positrones (ICRU 37, 1984), si se define $\tau \equiv T/m_0 c^2$ y $\eta \equiv \Delta/T$:

$$\left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_{\Delta} = k \left[\ln\left(\frac{\tau^2(\tau+2)}{2(I/m_0 c^2)^2}\right) + G^{\pm}(\tau, \eta) - \delta - \frac{2C}{Z} \right]$$

$$\xi = \frac{1}{\tau+2}$$

$$G^+(\tau, \eta) = \ln(4\eta) - \beta^2 \left[1 + (2 - \xi^2)\eta - (3 + \xi^2)\eta^2 \frac{\xi\tau}{2} + (1 + \xi\tau)\eta^3 \frac{\xi^2\tau^2}{3} - \eta^4 \frac{\xi^3\tau^3}{4} \right]$$

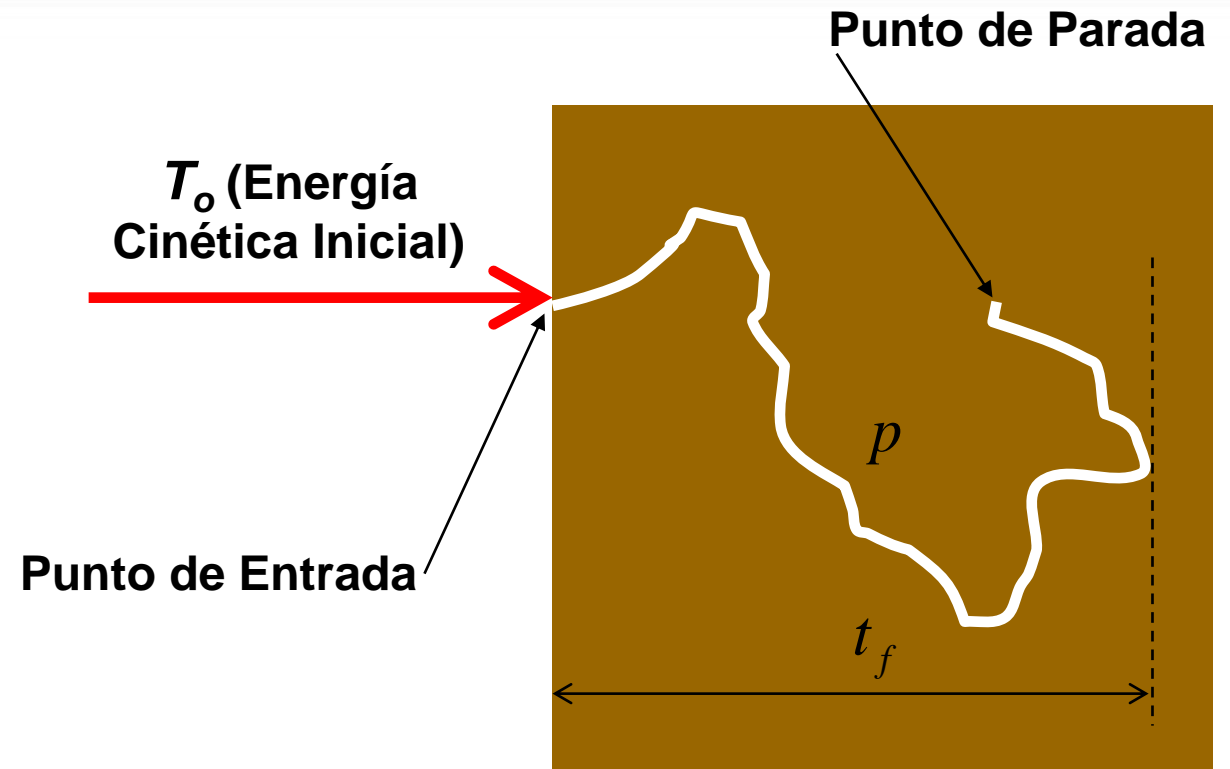
$$G^-(\tau, \eta) = -1 - \beta^2 + \ln[4(1-\eta)\eta] + \frac{1}{1-\eta} + (1 - \beta^2) \left[\tau^2 \frac{\eta^2}{2} + (2\tau + 1)\ln(1-\eta) \right]$$



Concepto de Alcance

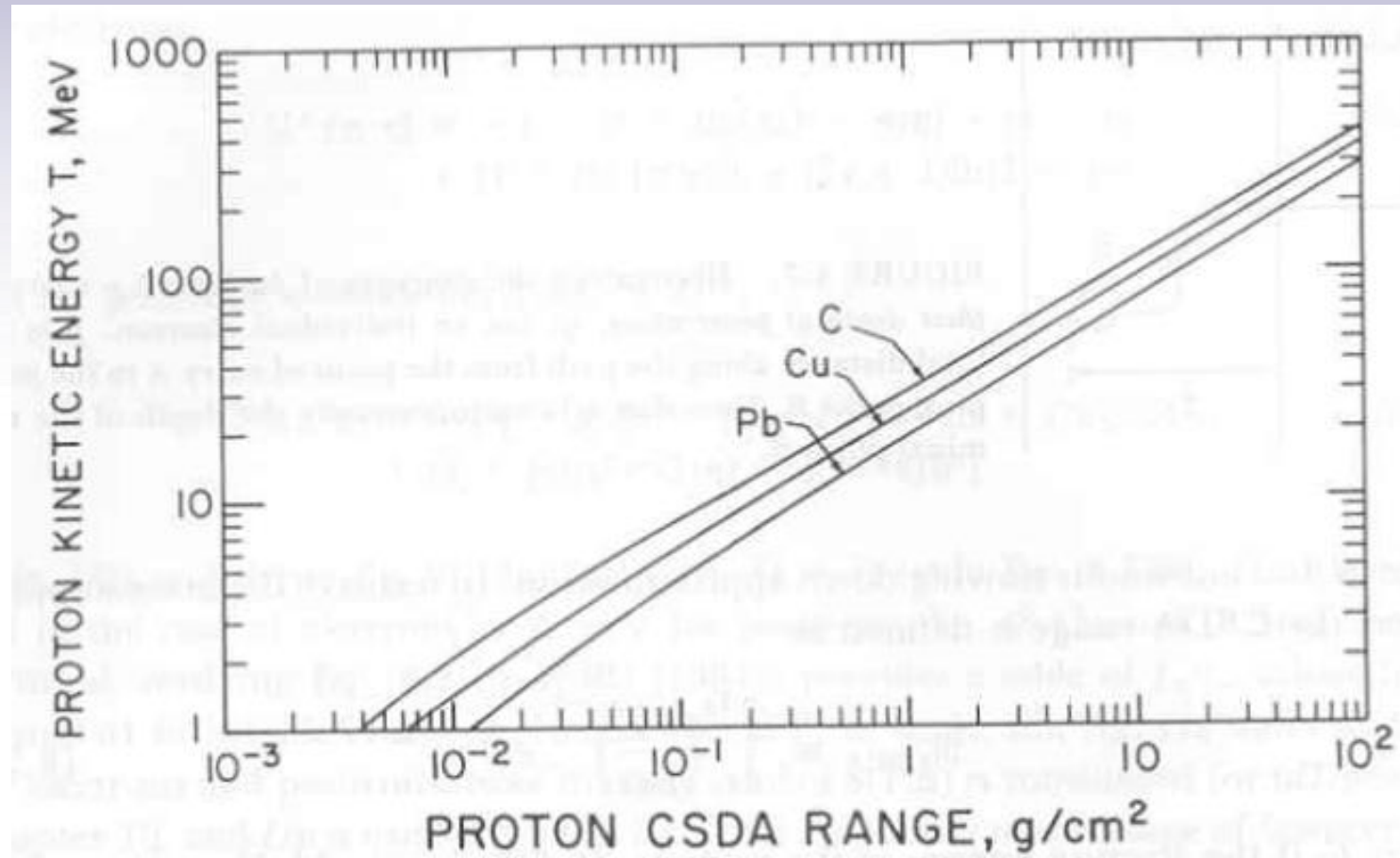
• El **alcance** \mathcal{R} de una partícula cargada de un tipo y energía inicial determinados es el valor esperado de la longitud p del recorrido que sigue hasta llegar al reposo, no tomando en cuenta el movimiento térmico. Se mide en unidades de masa/área, comúnmente g/cm^2 .

• El **alcance proyectado** $\langle t \rangle$ de una partícula cargada de un tipo y energía inicial determinados, en un medio dado, es el valor esperado de la máxima profundidad de penetración t_f de la partícula a lo largo de su dirección inicial. Unidades: masa/área, comúnmente g/cm^2 .





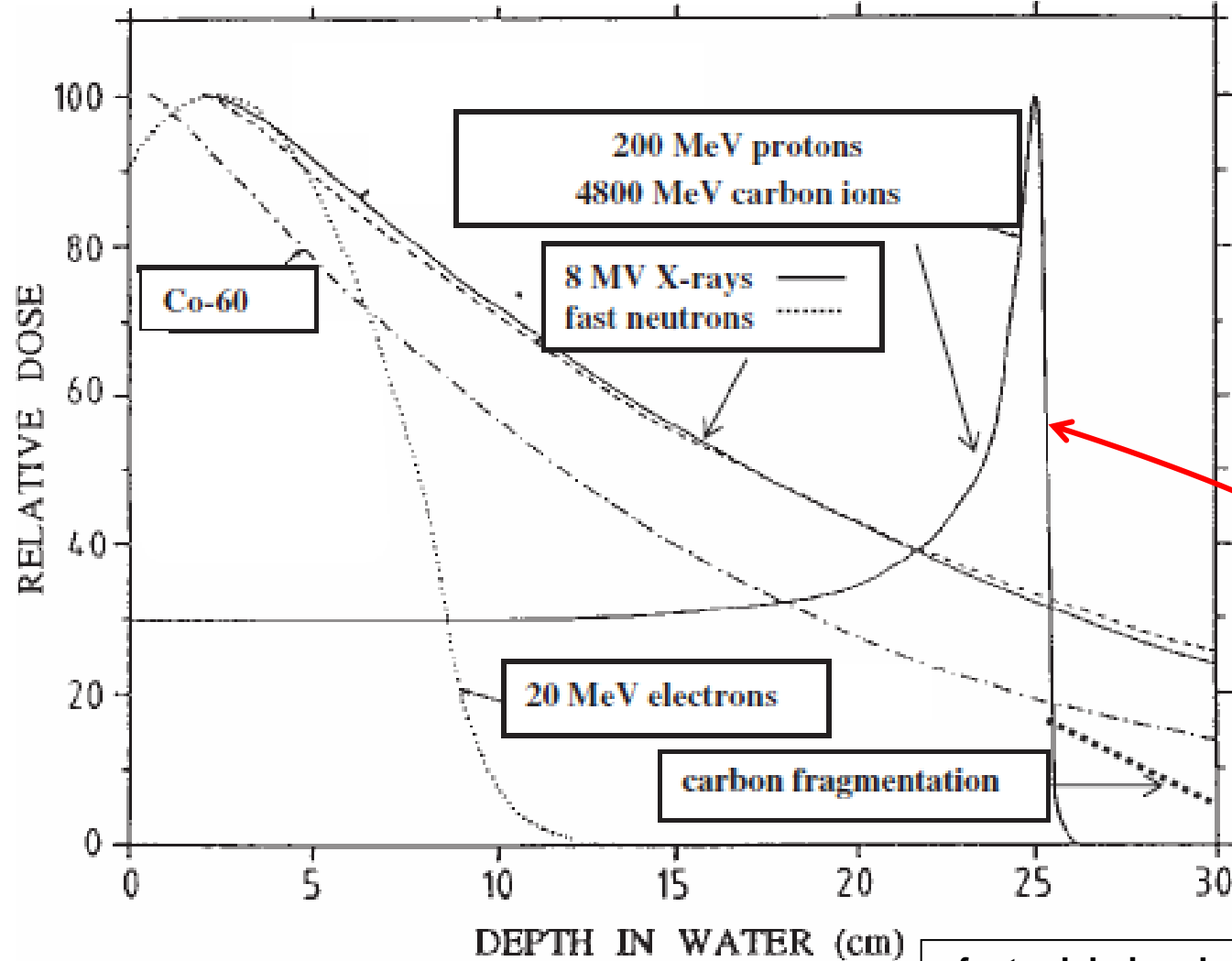
Alcance CSDA



$$R_{CSDA} \equiv \int_0^{T_0} \left(\frac{dT}{\rho dx} \right)^{-1} dT$$



Hadroterapia y Radioterapia de Alta Precisión



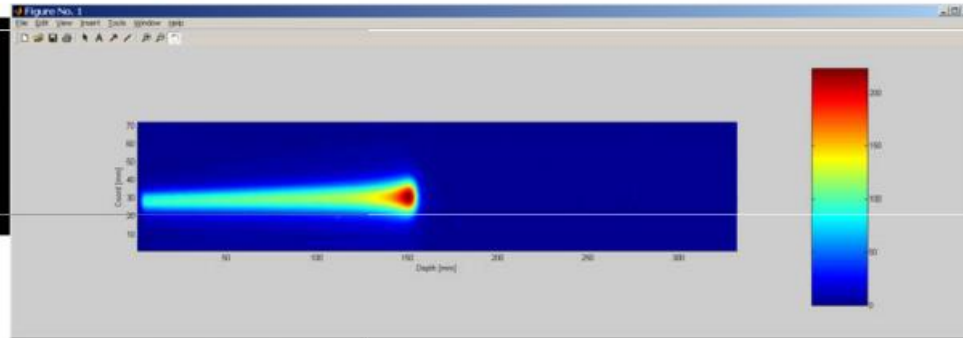
$$D_{cargadas} = \Phi \frac{dT}{\rho dx}$$

efecto del pico de Bragg

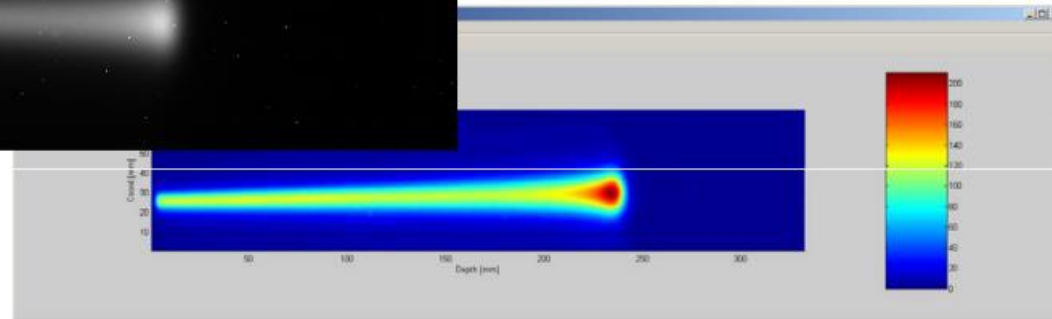


Pico de Bragg en Tres Dimensiones

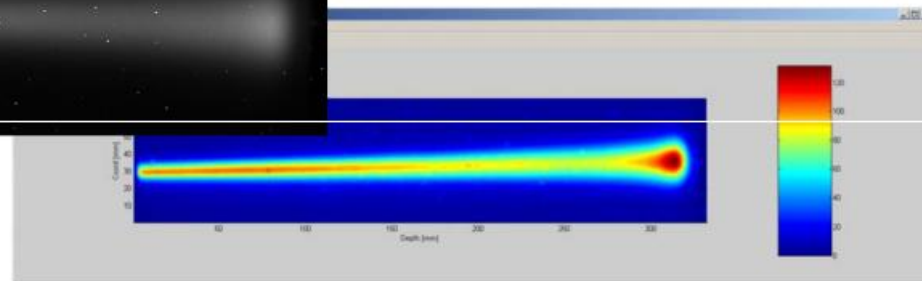
150 MeV, 15.8cm



190 MeV, 23.8cm



225 MeV, 31.7cm





<http://laconga.redclara.net>



contacto@laconga.redclara.net



lacongaphysics



Latin American alliance for
Capacity buildiNG in Advanced physics

LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea

El apoyo de la Comisión Europea para la producción de esta publicación no constituye una aprobación del contenido, el cual refleja únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en la misma.



Latin American alliance for
Capacity building in Advanced physics

LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea



