

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

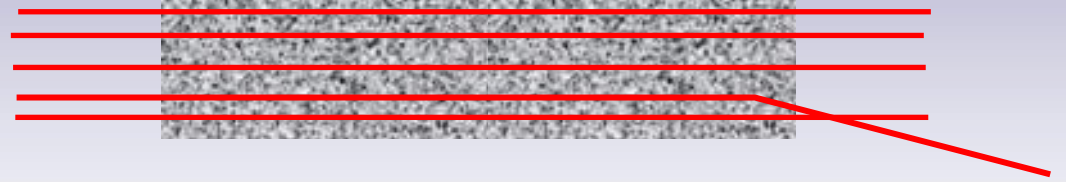




Colisiones de Partículas Cargadas con Átomos y Núcleos

Partículas no cargadas :

1. Tienen gran penetración.



2. Pierden energía prácticamente en un primer paso (en promedio).

Partículas cargadas:

1. Tienen poca penetración y se deflectan fácilmente.



2. Pierden energía después de varias colisiones (generalmente muchas en promedio).

$$\begin{array}{c} \uparrow \\ t \end{array}
 \begin{array}{c} \nearrow \\ \searrow \\ \nearrow \\ \searrow \end{array}
 \begin{array}{c} \gamma \\ \text{---} \\ \gamma \end{array}
 \begin{array}{c} \nearrow \\ \searrow \\ \nearrow \\ \searrow \end{array}
 +
 \begin{array}{c} \nearrow \\ \searrow \\ \nearrow \\ \searrow \end{array}
 \begin{array}{c} \gamma \\ \text{---} \\ \gamma \end{array}
 \begin{array}{c} \nearrow \\ \searrow \\ \nearrow \\ \searrow \end{array}
 + \dots
 \quad \alpha_{FS} \equiv \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137.08}$$

- Las partículas cargadas interactúan fundamentalmente mediante fuerzas electromagnéticas: **Domina Coulomb**
- ¿Por qué? Proceso de intercambio de un fotón tiene mayor probabilidad.



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

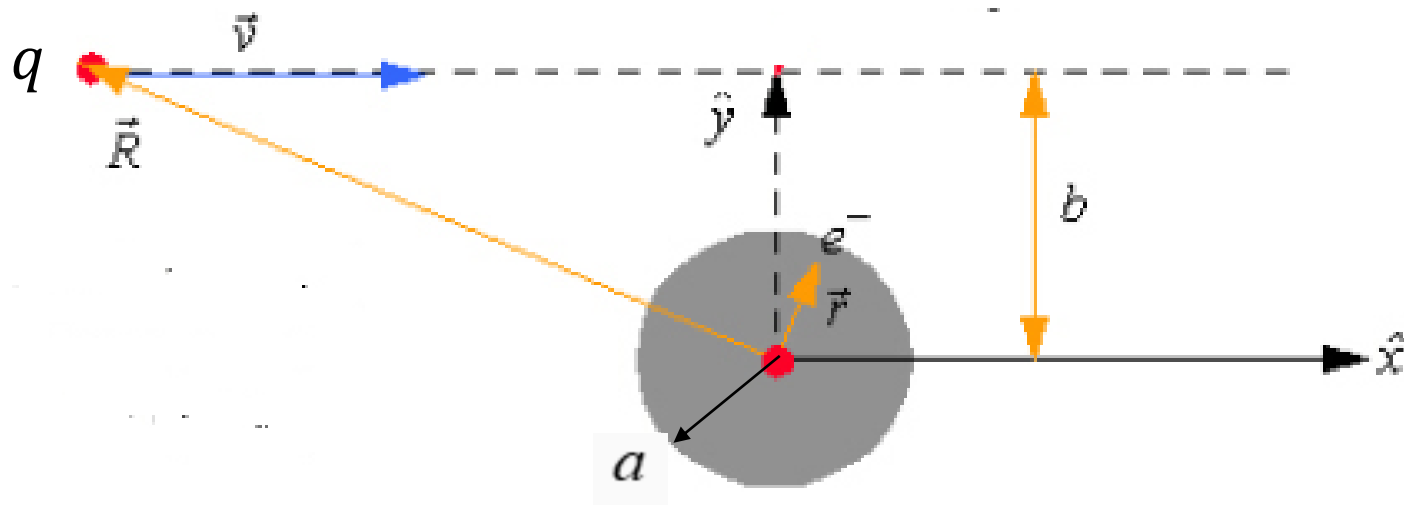
→ $(b \gg a)$

• Colisiones atómicas duras

→ $(b \sim a)$

• Colisión con el núcleo atómico

→ $(b \ll a)$





(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

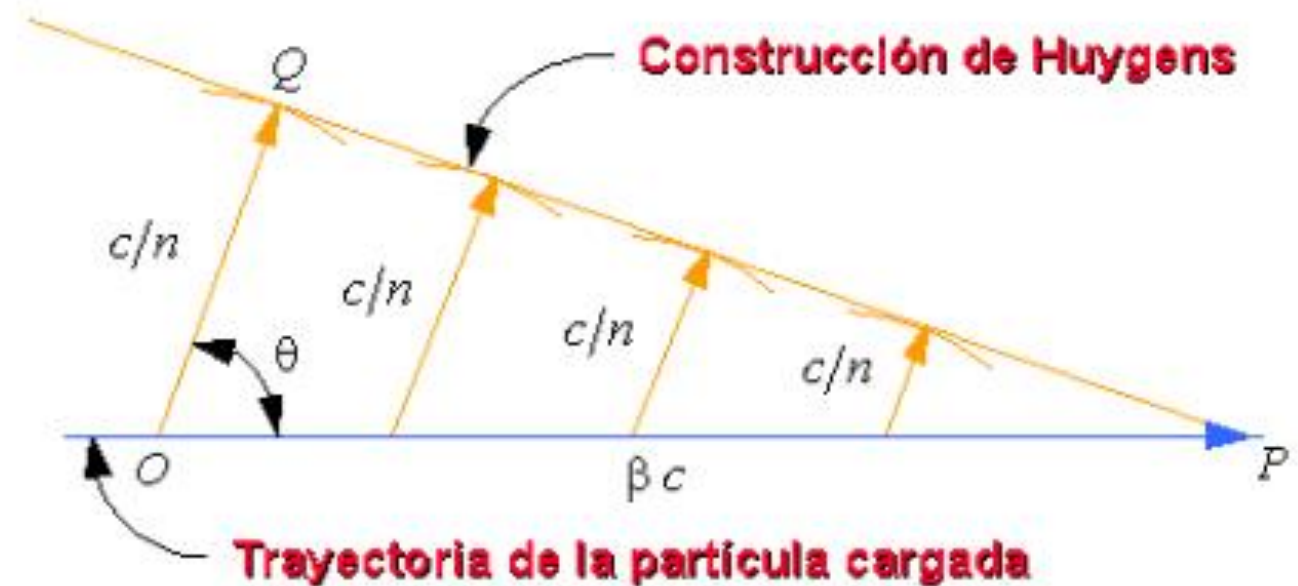
(4) Una fracción muy pequeña de la energía cedida al medio (menor a 0.1 %) en **colisiones muy suaves**, puede emitirse en forma de luz coherente (radiación Cerenkov):

- 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.

- El 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 $b \ll a$, tenemos fundamentalmente interacción de Coulomb 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) $\tau = 2.54 \times 10^{-8} s$ 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**



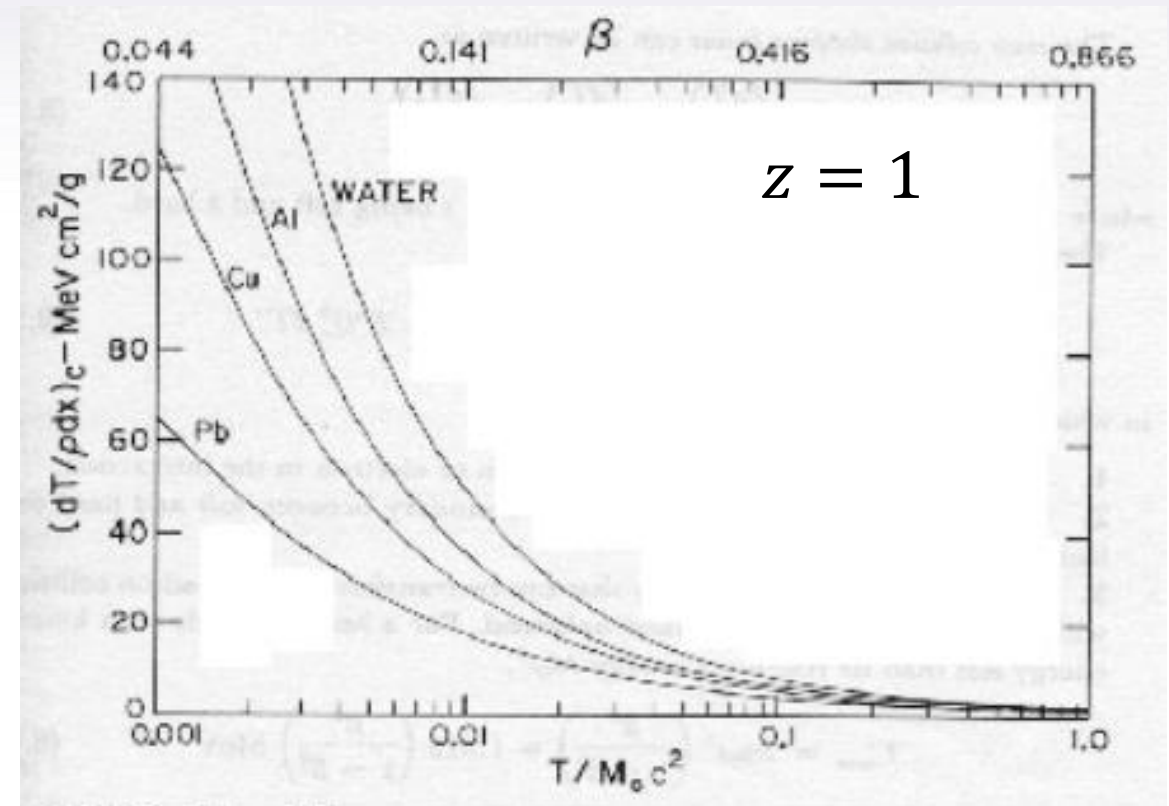
Fórmula de Bethe del Poder de Frenado Másico de Colisión

- 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)

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

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

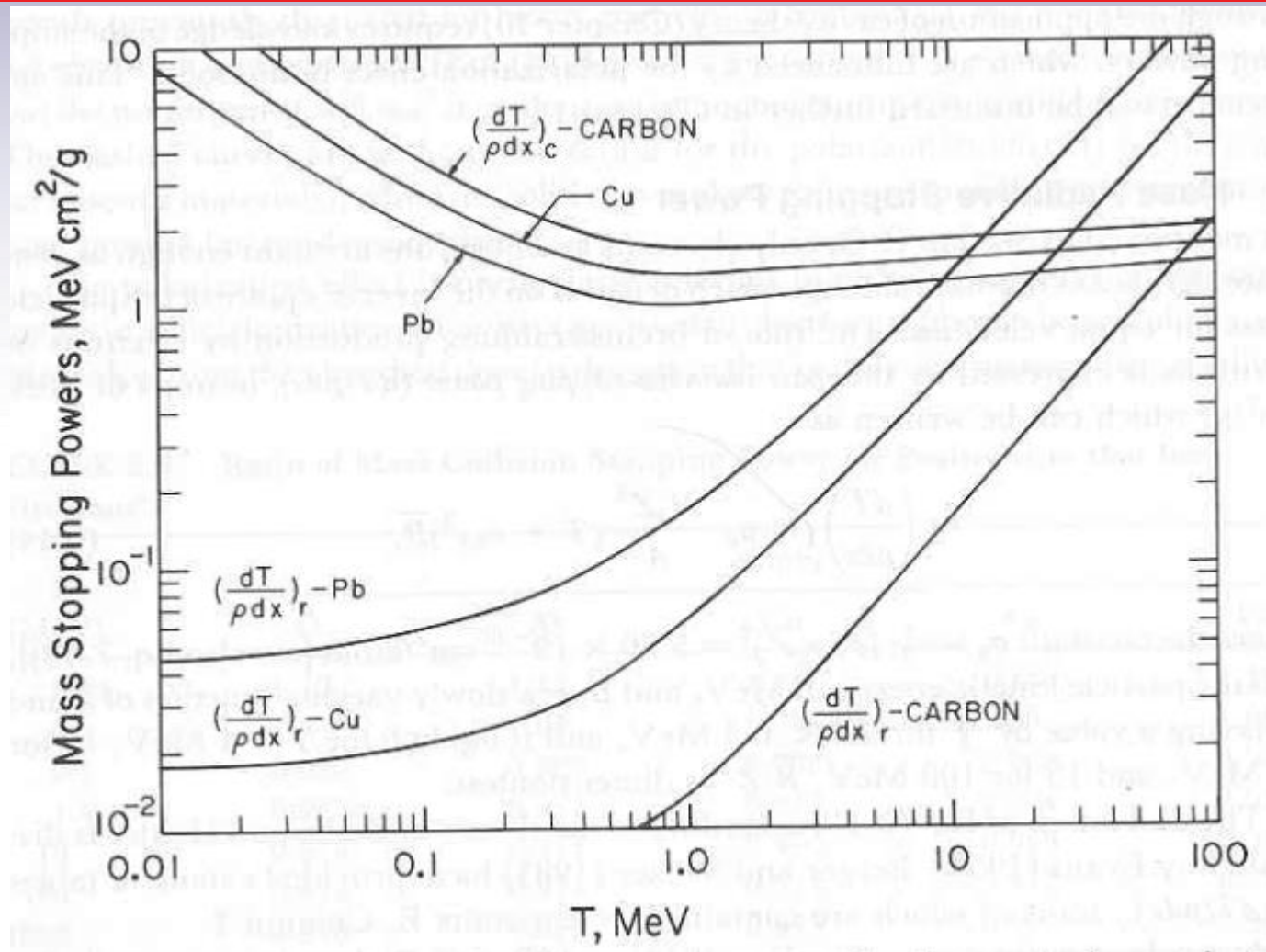
$$r_0^2 \equiv \frac{e^4}{m_e^2 c^4} \quad C \equiv \pi \frac{N_A Z}{p_A} r_0^2$$



- 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



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



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

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

**electrones por
unidad de masa
para el i-ésimo
elemento**


- 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:

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



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 $\eta \equiv \Delta/T$:

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

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

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

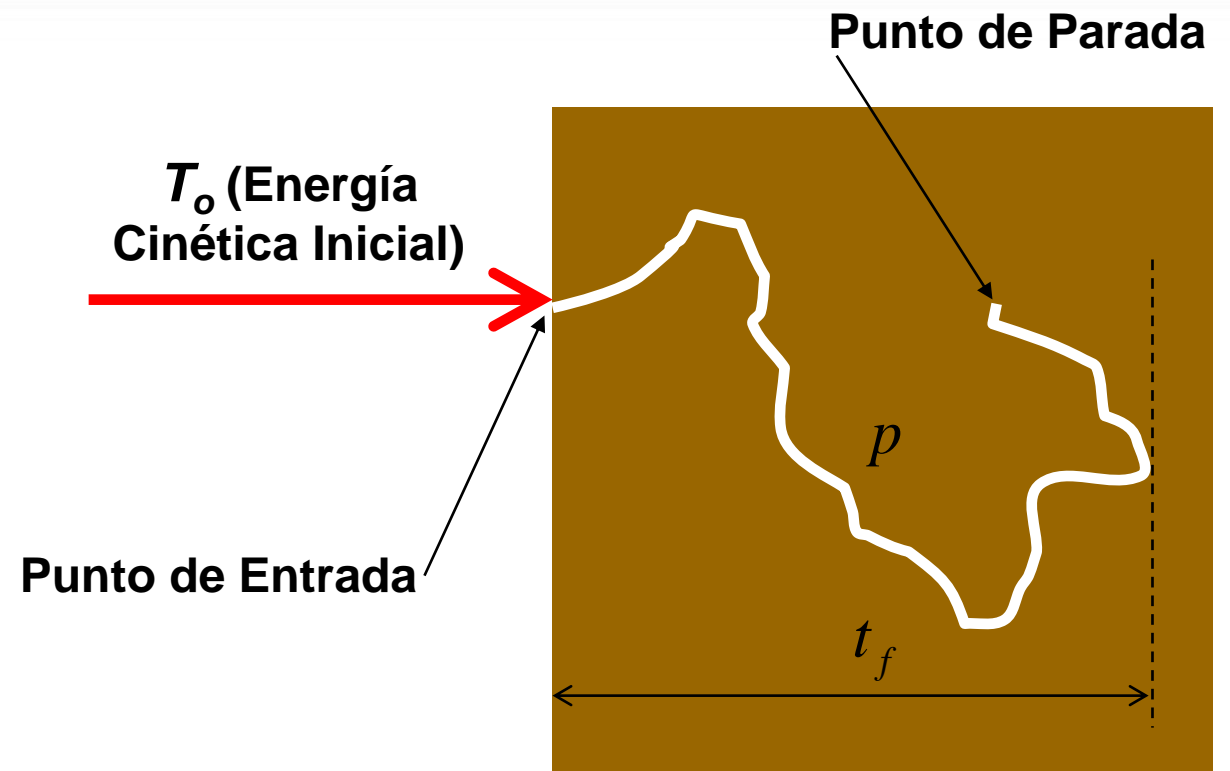
$$G^-(\tau, \eta) = -1 - \beta^2 + \ln[4(1 - \eta)\eta] + \frac{1}{1 - \eta} + (1 - \beta^2) \left[\tau^2 \frac{\eta^2}{2} + (2\tau + 1)\ln(1 - \eta) \right]$$



Concepto de Alcance

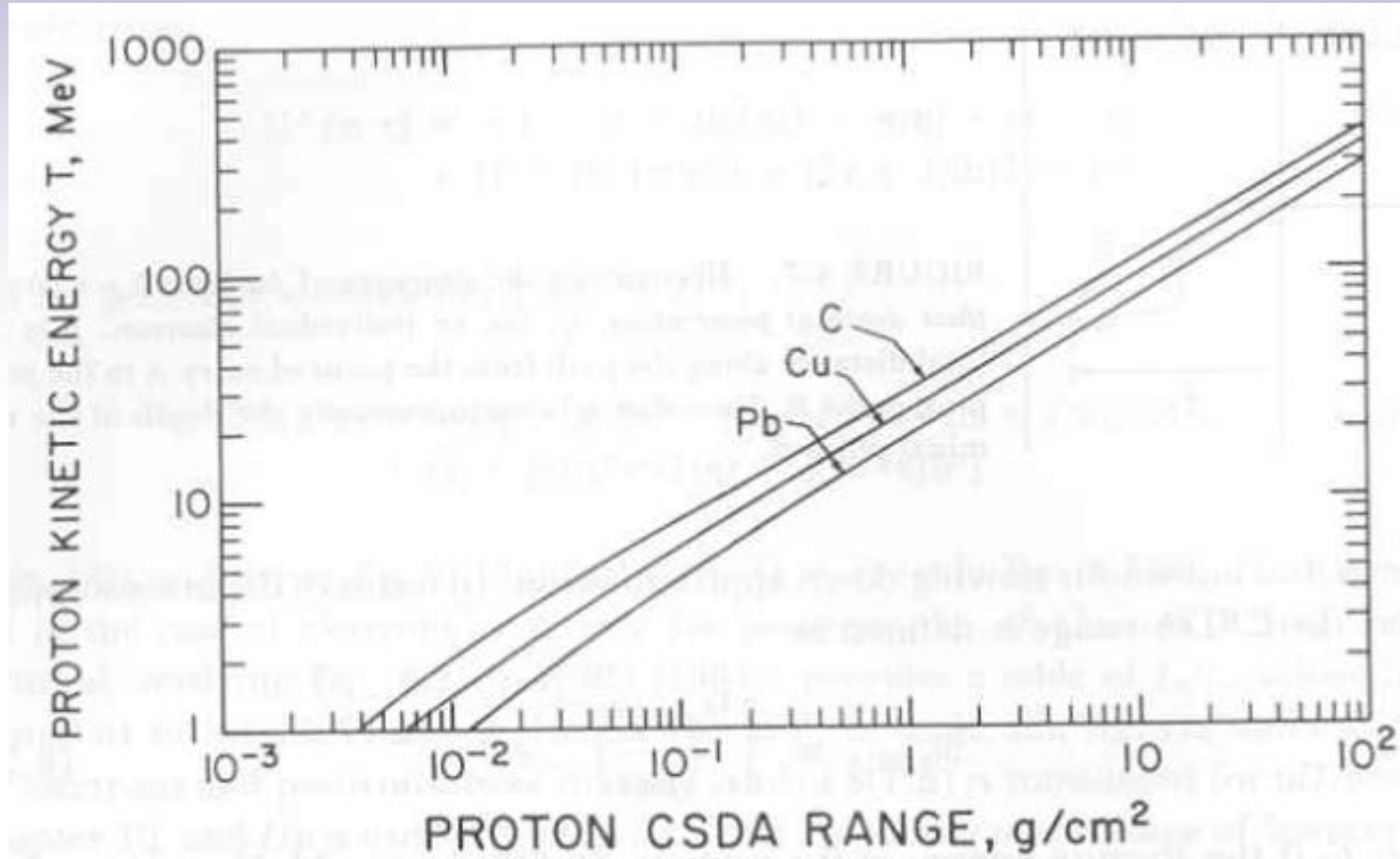
- El **alcance** \mathcal{R} de una partícula cargada de un tipo y energía inicial determinados es el valor esperado de la longitud p del recorrido que sigue hasta llegar al reposo, no tomando en cuenta el movimiento térmico. Se mide en unidades de masa/área, comúnmente g/cm^2 .

- 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 (Continuous Slowing Down Approximation)



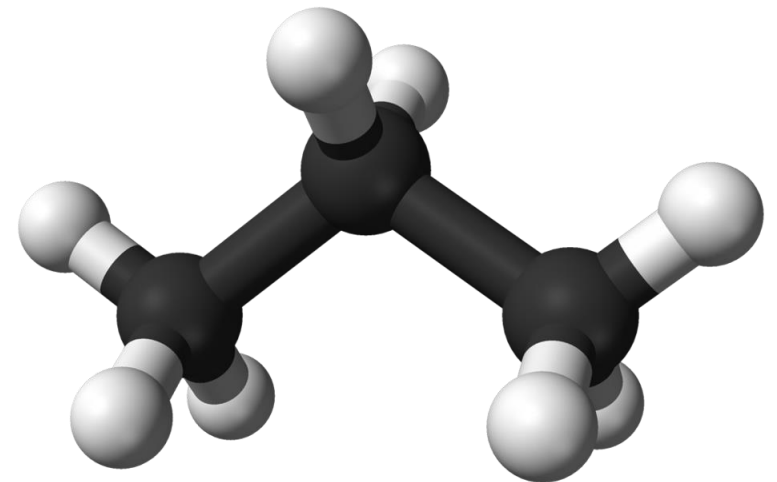
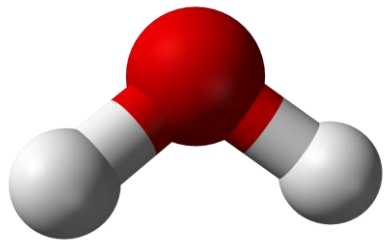
$$R_{CSDA} \equiv \int_0^{T_0} \left(\frac{dT}{\rho dx} \right)^{-1} dT$$



Escalamiento con Propano: De milímetros a nanómetros

• El uso de propano en forma de gas a baja presión como “agua equivalente” en mediciones nanodosimétricas se justifica porque en lo que respecta a los electrones secundarios o rayos- δ que se deben producir por efecto de la radiación ionizante incidente se observa:

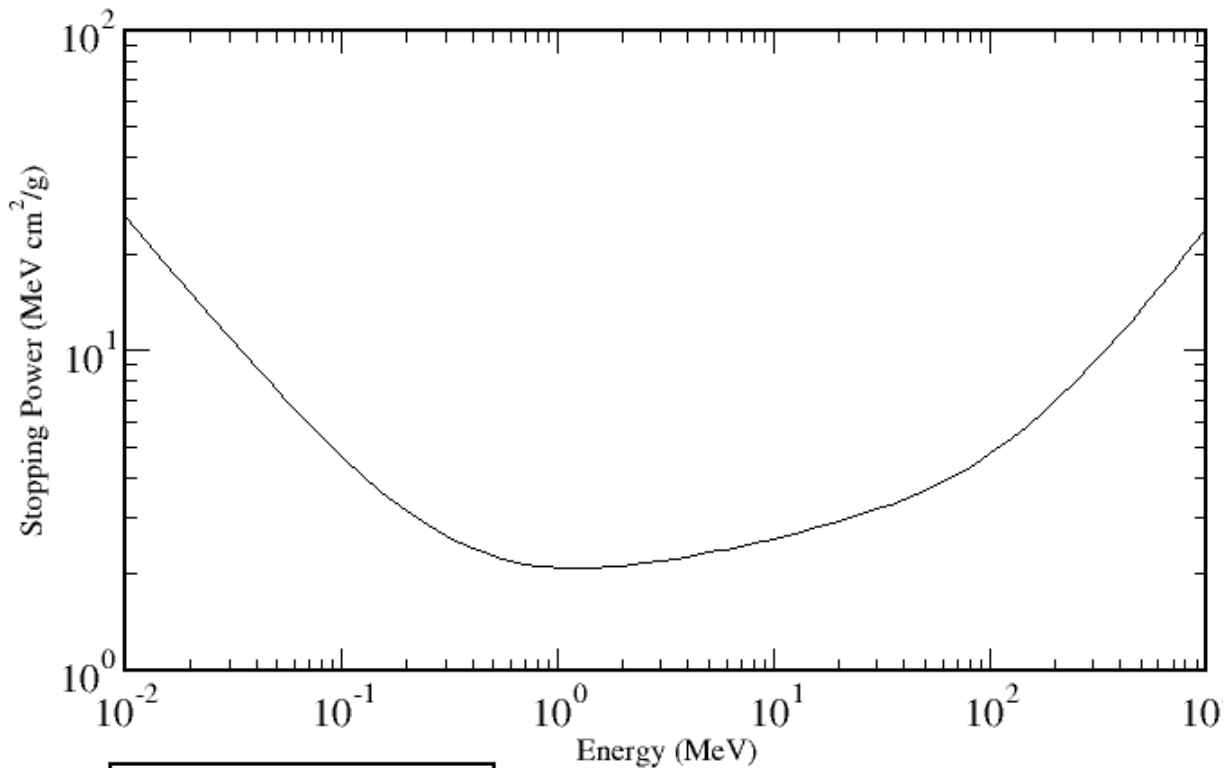
1. El camino libre medio es el mismo del agua.
2. La distribución espectral es la misma que la del agua.
3. La cesión o depósito de energía de estos electrones a lo largo de su traza es la misma que la del agua.



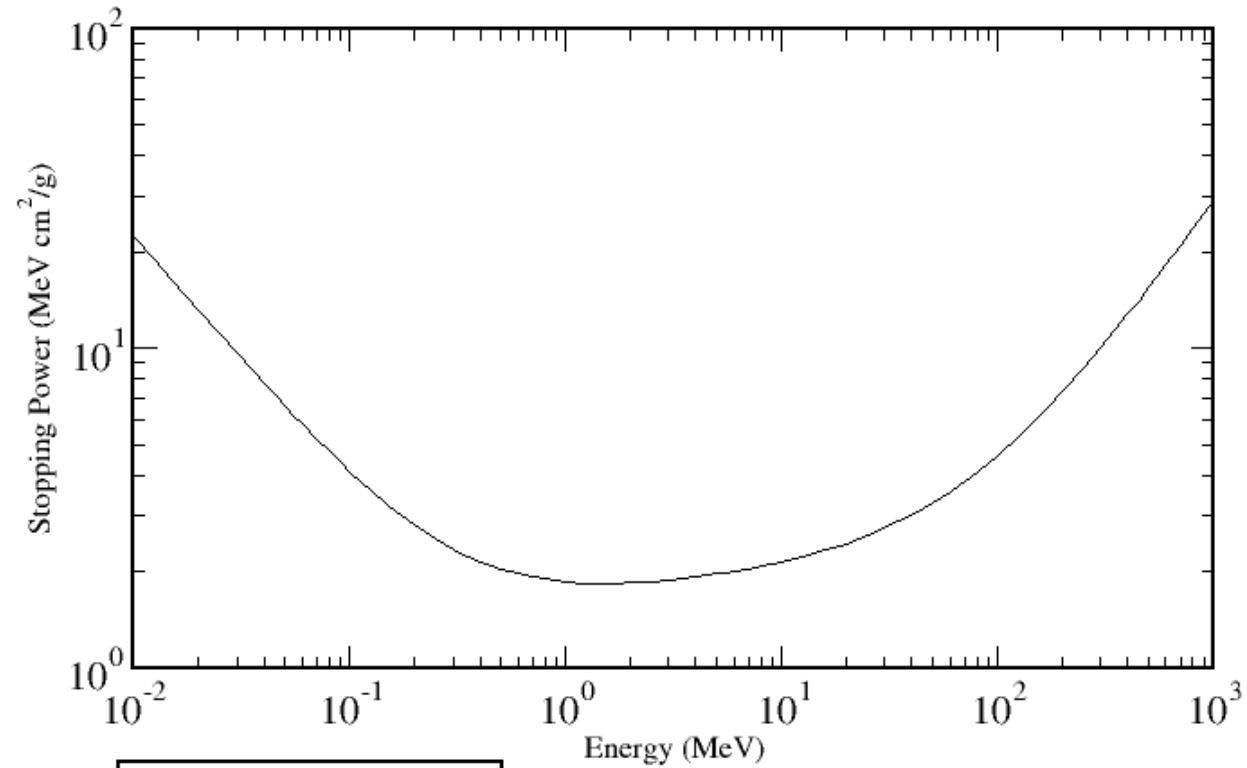


Poder de Frenado de Rayos δ : Propano Versus Agua

PROPANE



WATER, LIQUID



— Total Stopping Power

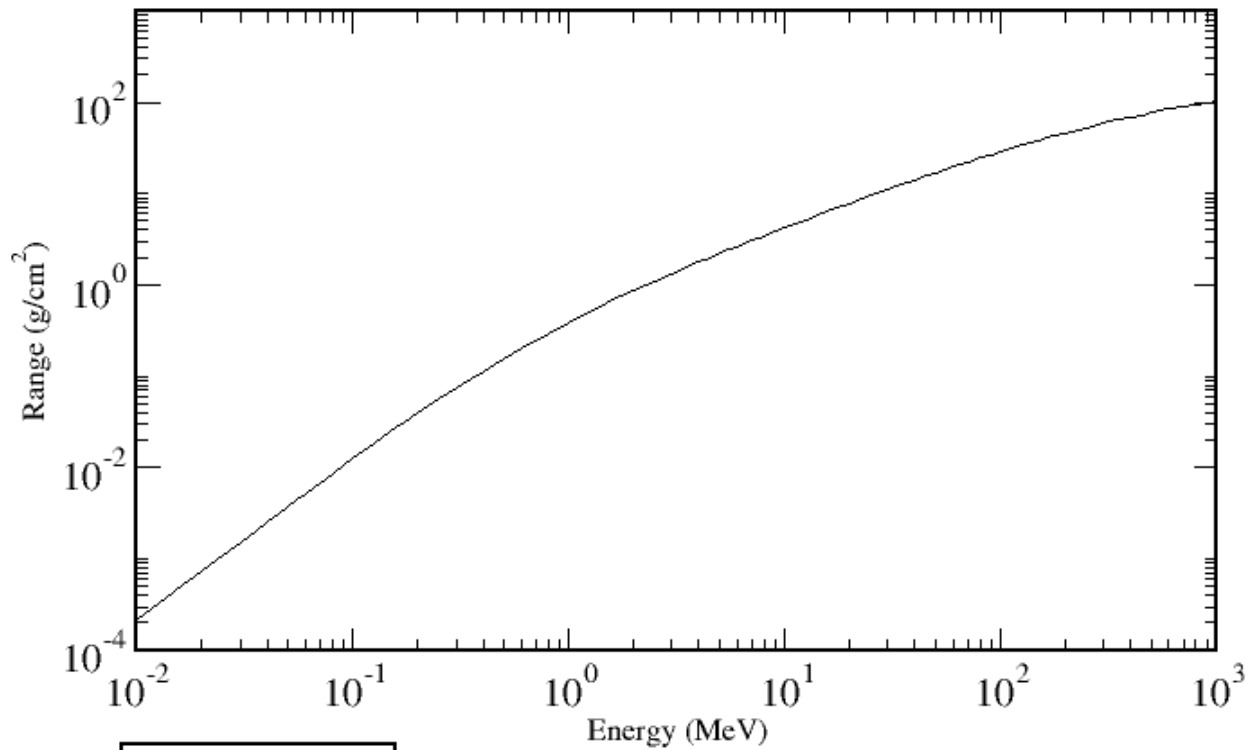
— Total Stopping Power

$$\frac{dT}{\rho dx}$$

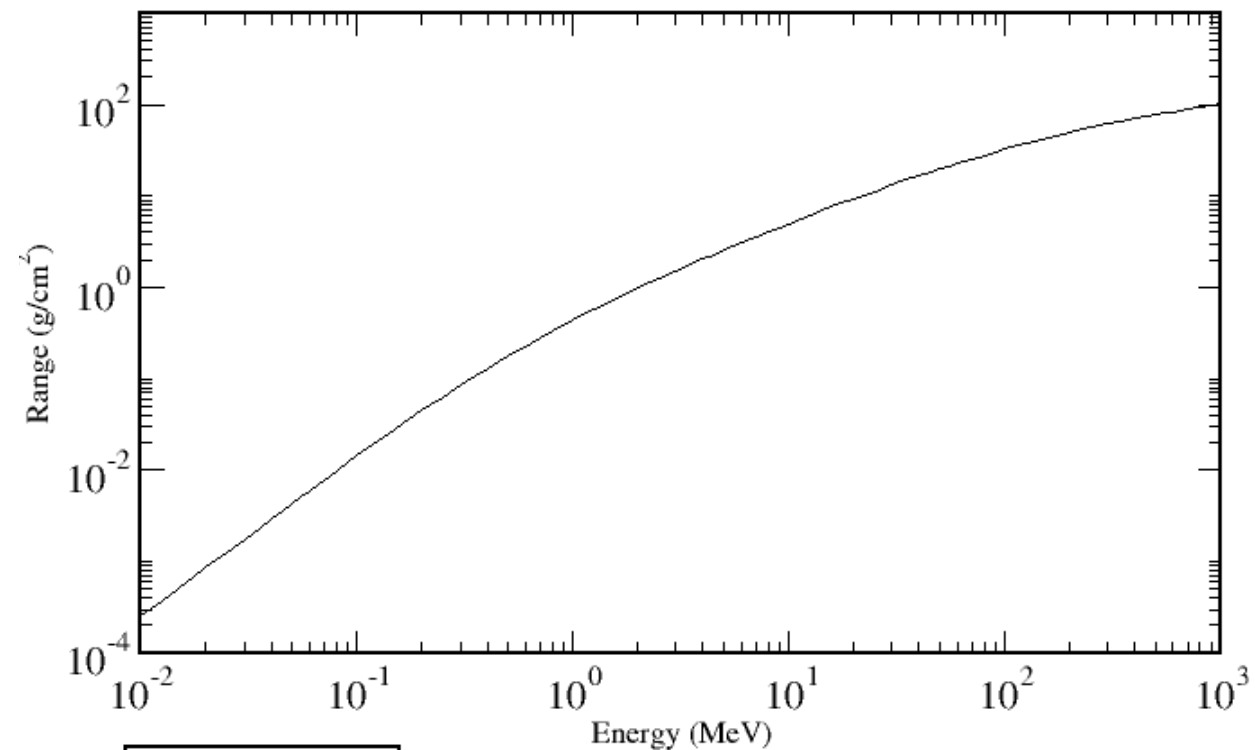


Alcance CSDA de Rayos δ : Propano Versus Agua

PROPANE



WATER, LIQUID



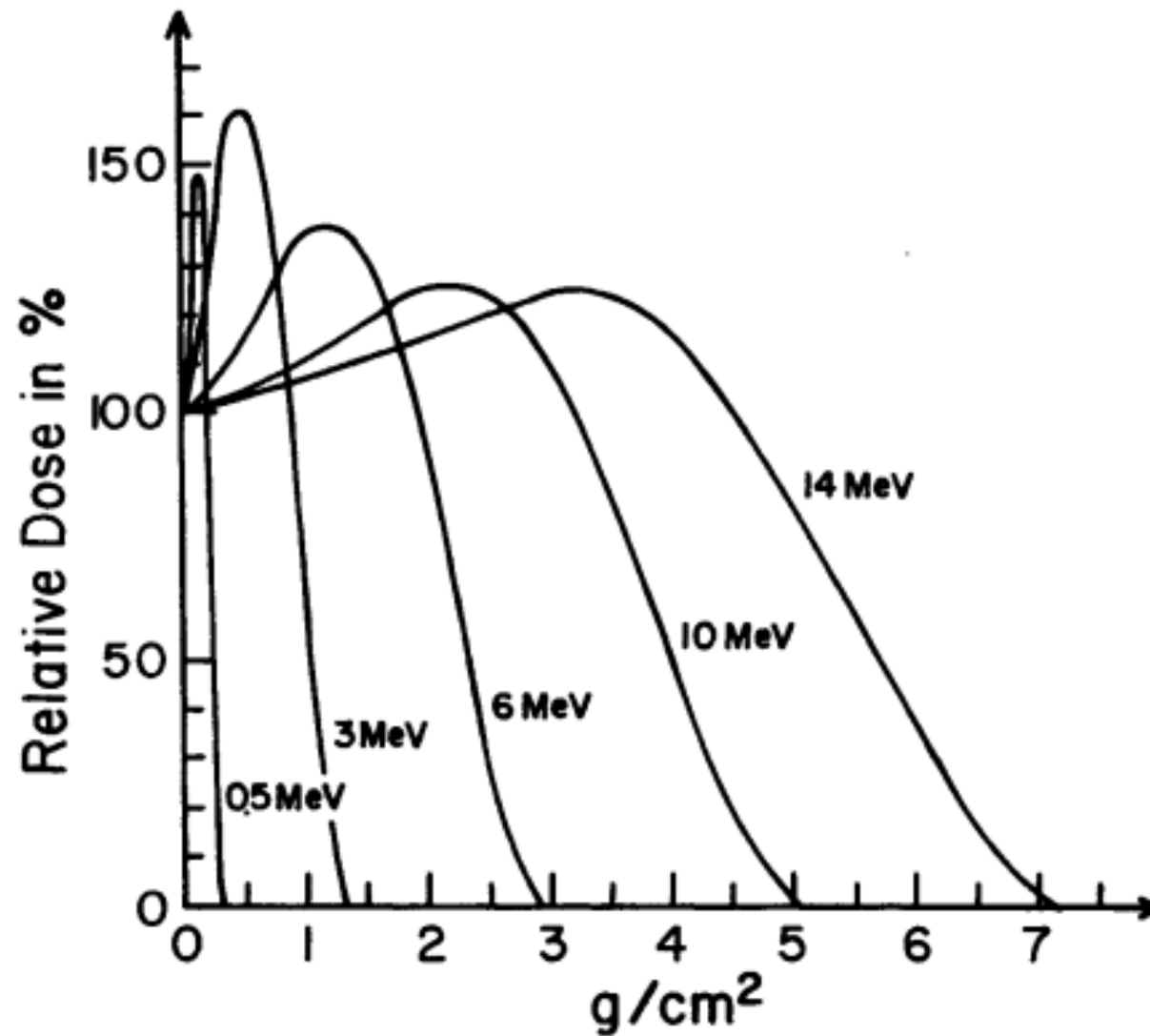
— CSDA Range

— CSDA Range

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



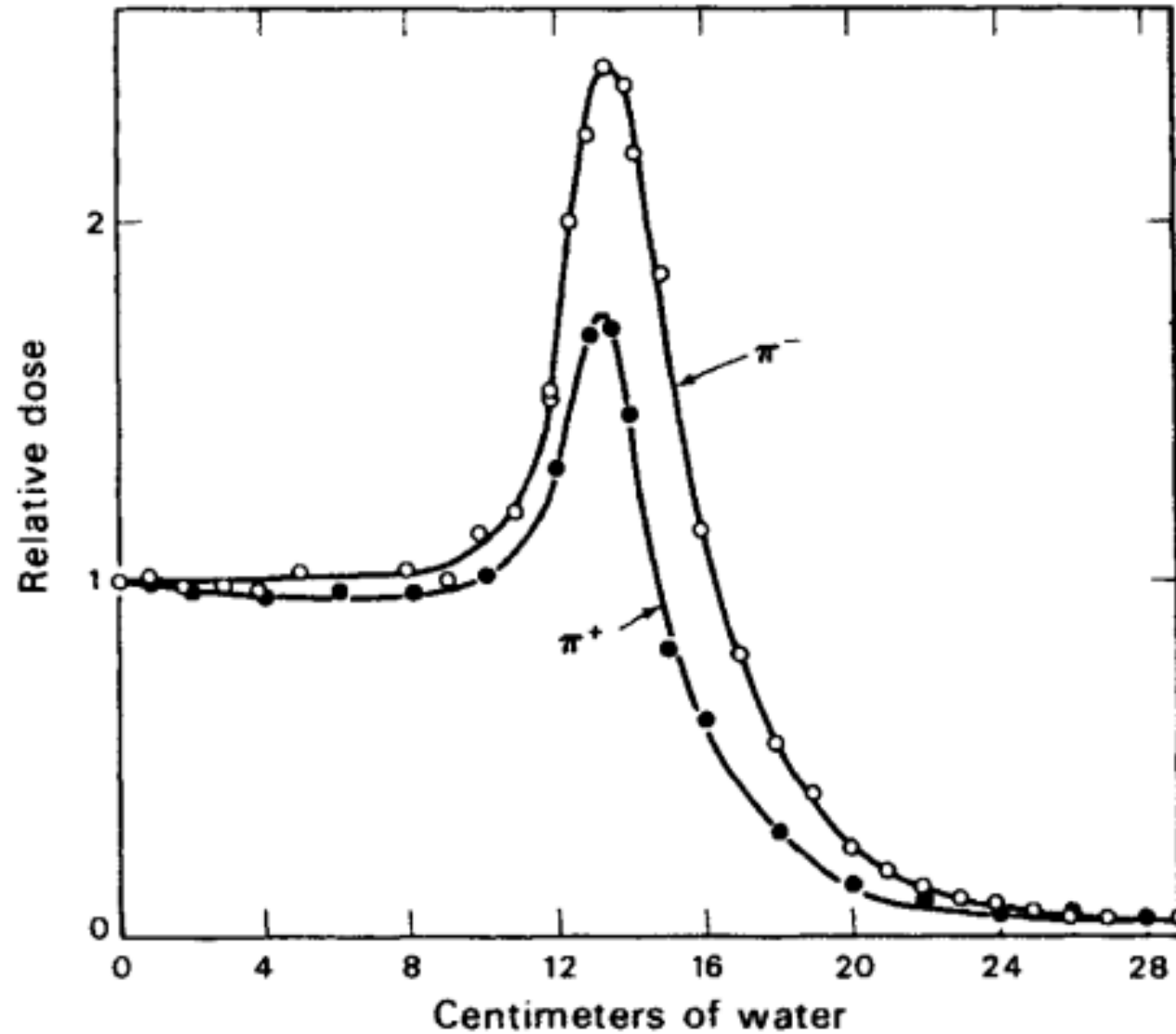
Perfil de Dosis a Profundidad para Electrones



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



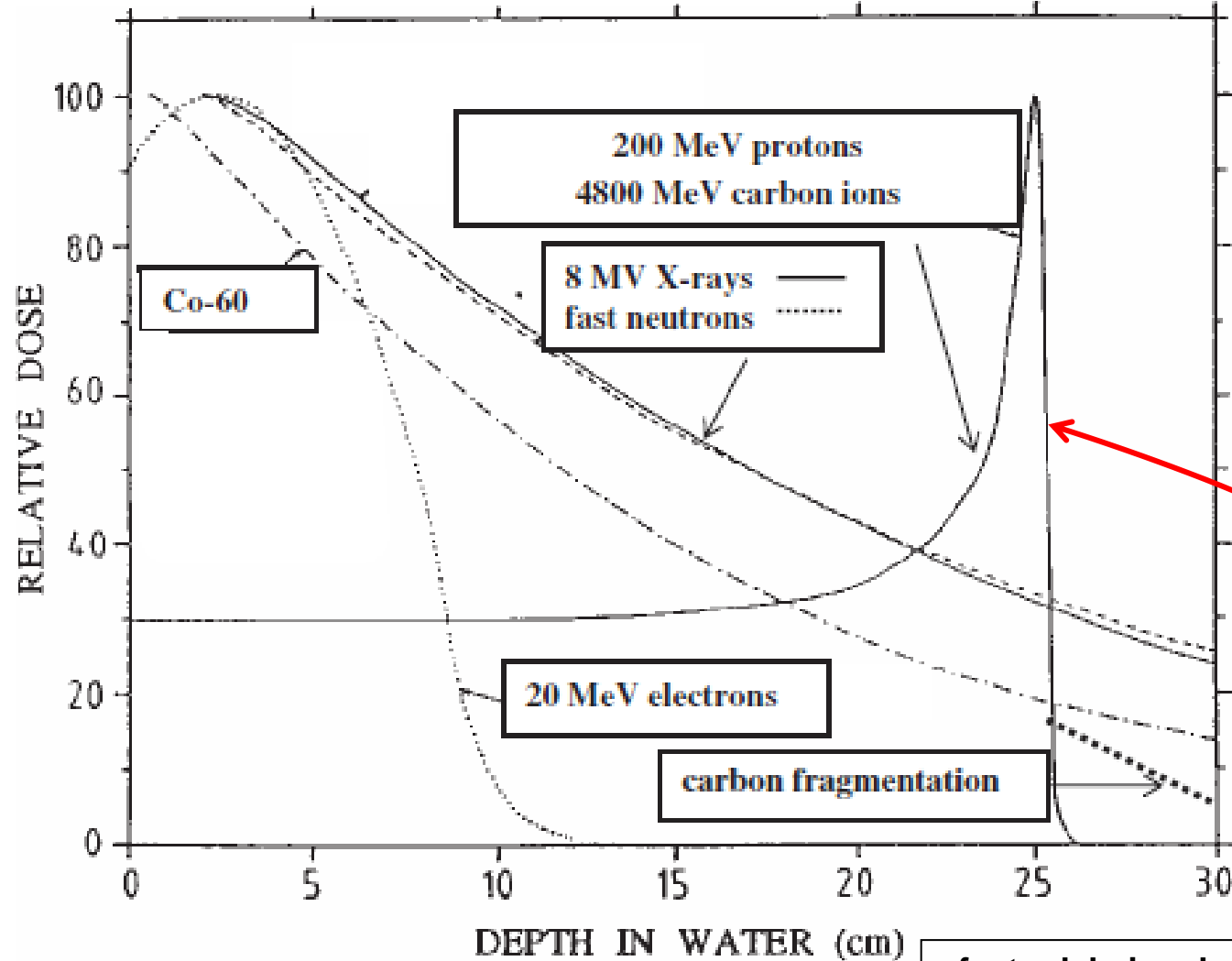
Perfil de Dosis a Profundidad para Piones de 65 MeV



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



Hadroterapia y Radioterapia de Alta Precisión



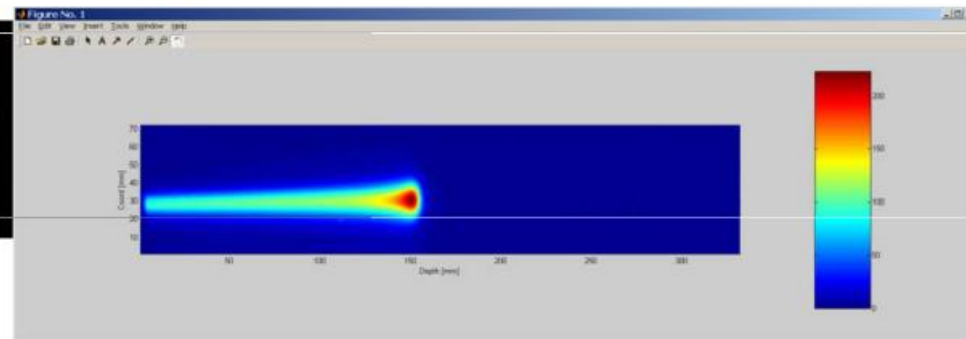
$$D_{cargadas} = \Phi \frac{dT}{\rho dx}$$

efecto del pico de Bragg

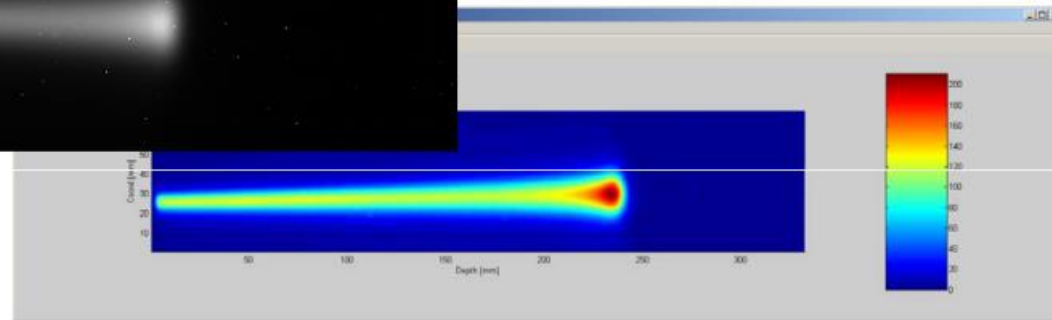


Pico de Bragg en Tres Dimensiones

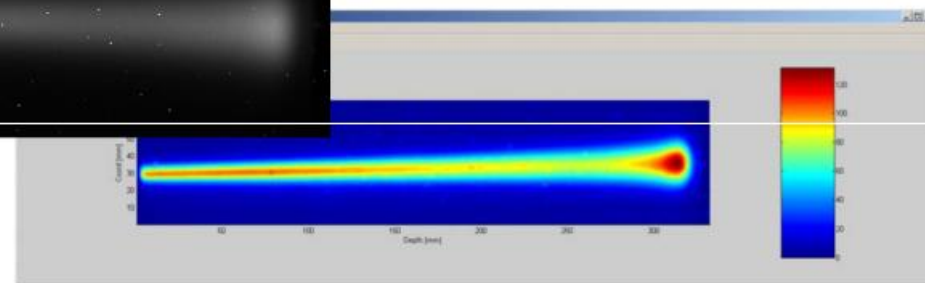
150 MeV, 15.8cm



190 MeV, 23.8cm



225 MeV, 31.7cm





PHYSICAL MEASUREMENT LABORATORY

About PML



Divisions



Products/Services



News/Multimedia

Programs/Projects

Facilities



Email Newsletter

CONNECT WITH US



Stopping-Power & Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions



NIST Standard Reference Database 124

Last Update to Data Content: July 2017 | NISTIR 4999 | [Version History](#) | [Disclaimer](#) |

DOI: <https://dx.doi.org/10.18434/T4NC7P>

M.J. Berger¹, J.S. Coursey², M.A. Zucker² and J. Chang²

¹National Institute of Standards and Technology (NIST), Physics Laboratory (now Physical Measurement Laboratory (PML)), Ionizing Radiation Division (deceased)

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



Contents:

1. [Introduction](#)
2. [ESTAR](#): Stopping Powers and Ranges for Electrons
3. [PSTAR and ASTAR](#): for Protons and Helium Ions (alpha particles)
4. [References](#)
5. [Appendix](#): Significance of Calculated Quantities

Access the Data:

1. [Electrons](#)
2. [Protons](#)
3. [Helium Ions](#)

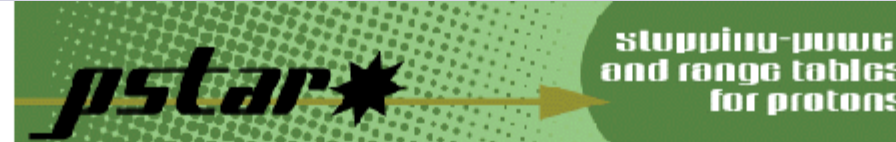
This work was supported in part by the Department of Energy, Office of Health and Environmental Research, Washington, D.C. 20585; and by NIST's Systems Integration for Manufacturing Applications (SIMA) Program.

NIST Standard Reference Database 124 | [Customer Support](#) | Online: October 1998 | Last update: July 2017



Acceso a los Datos de Protones

NIST
National Institute of
Standards and Technology
Physical Meas. Laboratory



The PSTAR program calculates stopping power and range tables for protons in various materials. Select a material and enter the desired energies or use the default energies. Energies are specified in MeV, and must be in the range from 0.001 MeV to 10000 MeV.

[Help](#)

[Text version](#)

[Material composition data](#)

Material:

1: Hydrogen

Graph stopping power:

- Total Stopping Power
- Electronic Stopping Power
- Nuclear Stopping Power

Graph range:

- CSDA Range
- Projected Range

Graph detour factor

No graph

Additional Energies (optional):

Use energies from a file*

No file chosen

or

Use energies entered below (one per line)

Include default energies

* Your browser must be file-upload compatible.



Curvas de Bragg (Brookhaven National Laboratory & NASA)

OUR SCIENCE | ABOUT | DEPARTMENTS | PARTNER WITH US | CAREERS | NEWS | FEEDBACK | DIRECTORY

Search web or people...



NASA Space Radiation Laboratory



[Home](#) | [User Guide](#) | [StackUp Tool](#) | [About](#) | [Apply for Beam Time](#) | [Run Information](#) | [Related Facilities](#) | [PETRA](#)

NSRL User Guide

III. Technical Data

Bragg Curves and Peaks

Bragg Curves

User Guide Contents

[User Guide Home](#)

I. Beamline Hardware

- [Sample Holders](#)
- [Collimators](#)
- [Remote Sample Flipper](#)

<https://www.bnl.gov/nsrl/userguide/bragg-curves-and-peaks.phpf>



<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.