

Descripción de los Campos de Radiación, Atenuación y Transporte de Haces

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





Cantidades Empleadas en la Descripción de los Campos de Radiación



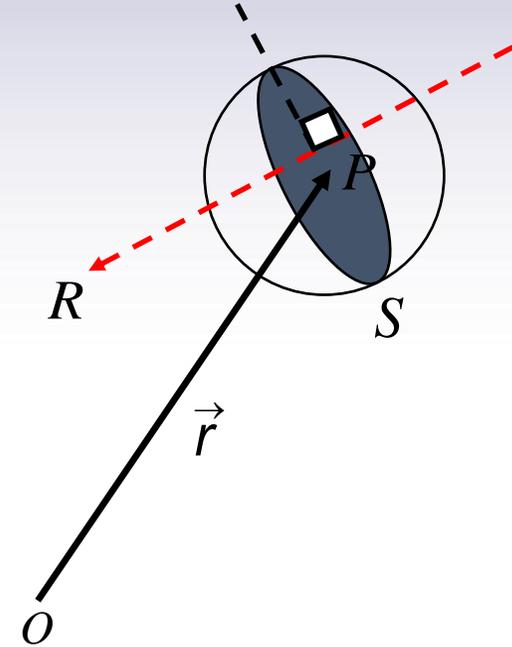
¿Cómo Aproximarnos a la Determinación de Esos Campos?

En el punto P:

¿Qué número de rayos pasan por P por unidad de tiempo?

Hay que pensar en una **sección eficaz finita** y un **volumen finito** alrededor de P.

- **Necesidad de la esfera:** Es la más simple pues ofrece la misma **sección eficaz** para cualquier rayo que se le atravesase.
- **¿Qué tamaño debe tener?** Depende de la naturaleza **estocástica** ó **no estocástica** de las cantidades a utilizar en la descripción del campo de radiación.





¿Qué son las Variables Estocásticas?

- **Sus valores ocurren aleatoriamente y no se pueden predecir, existe una distribución de probabilidad.**
- **Está definida para dominios finitos solamente y sus valores varían de manera discontinua en el espacio y el tiempo. No tiene sentido referirse a gradientes.**
- **Se pueden medir con errores arbitrariamente pequeños.**
- **Si X es una variable estocástica, entonces**

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \bar{X} = \langle X \rangle$$

- \bar{X} \longrightarrow **Valor promedio para n medidas**
- $\langle X \rangle$ \longrightarrow **Valor esperado**



¿Qué son las Variables No Estocásticas?

- **Para ciertas condiciones su valor puede ser calculado en principio, es decir, se puede predecir.**
- **Es una función continua y diferenciable del espacio y del tiempo. Los gradientes tienen sentido (en el espacio y en el tiempo).**
- **Su valor está relacionado con el valor esperado de la correspondiente cantidad estocástica.**



Estocásticas vs. No Estocásticas: ¿Cómo se Usan?

La no estocástica:

- Cuando la escala es lo suficientemente grande como para que el valor esperado pueda aproximarse al valor medio para un número finito de mediciones y cifras significativas.
- En este caso pasamos a una aproximación al continuo, porque el tamaño relativo de las fluctuaciones es despreciable.
- **Ejemplo:** Dosis absorbida.

La estocástica:

- Cuando trabajamos a pequeña escala.
- El tamaño relativo de las fluctuaciones es grande.
- **Ejemplo:** Energía depositada en una célula (microdosimetría).



Número de Eventos por Medida

Para una eficiencia del detector fija y un intervalo de tiempo fijo:

- **Número pequeño de eventos por medida nos lleva a una distribución de Poisson.**

$$P(n) = \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda} \quad \lambda = Np$$

- **Número grande de eventos por medida nos lleva a una distribución de Gauss (teorema del límite central).**

Variable estocástica x \longleftrightarrow Distribución de probabilidad $f(x)$

El promedio y_N tiene la distribución: $f(y_N - \langle x \rangle) \rightarrow \sqrt{\frac{N}{2\pi}} \frac{1}{\sigma} e^{-\frac{N(y_N - \langle x \rangle)^2}{2\sigma^2}}$

$$y_N = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N}$$

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} dx f(x)x$$

$$\sigma \equiv \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2$$

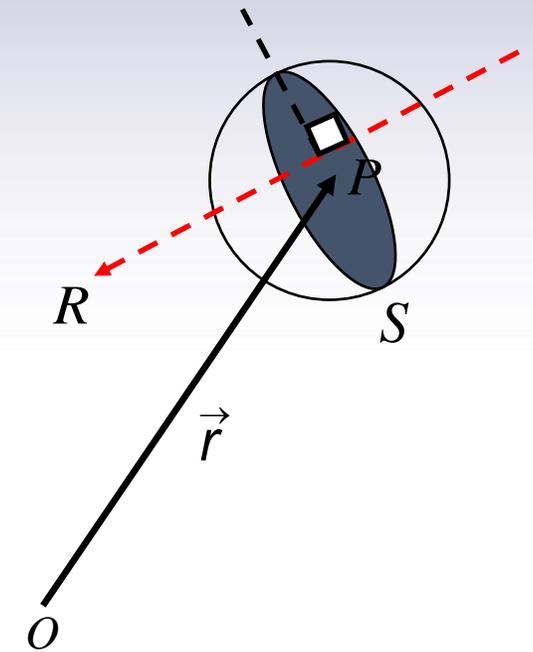


Fluencia de Partículas

Si tenemos una **distribución normal (un número de grande de eventos por medida)**: Entonces $\langle N \rangle$ es el valor esperado del número de rayos N que atraviesan ó penetran la esfera S centrada en el punto P , de sección Δa , en el intervalo de tiempo que va del instante t_0 al instante t y la fluencia de partículas ó simplemente fluencia Φ en un punto P en la posición \vec{r} se define como

$$\Phi(\vec{r}; t_0, t) \equiv \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{\Delta \langle N \rangle}{\Delta a} = \frac{d \langle N \rangle}{da}$$

- Φ se expresa en unidades de m^{-2} ó cm^{-2}
- Depende de la posición y del tiempo.
- Es función monótona creciente del tiempo.





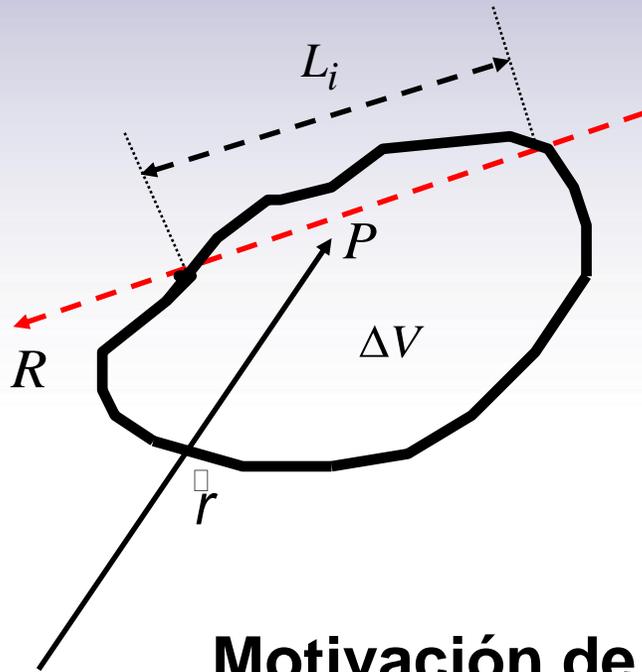
Tasa de Fluencia (Densidad de Corriente de Partículas)

$$\varphi(\vec{r}, t) \equiv \frac{d\Phi(\vec{r}; t_0, t)}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{d\langle N \rangle}{da} \right)$$

- La fluencia y la tasa de fluencia son campos escalares.
 - Aplica principio de superposición.
 - Cuando los campos son producidos por fuentes puntuales e isotrópicas, su intensidad cae con el inverso del cuadrado de la distancia.
 - Para proceder con la medición se emplea un detector esférico.
- ¿Hay forma de proponer un detector alternativo? (lo que implicaría que hay una manera alternativa de medir fluencia)



Manera Alternativa de Definir la Fluencia (Chilton, 1978)



(1) Sumar todas las longitudes de las trazas internas dejadas por los rayos:

$$\sum_i L_i$$

(2) Para calcular la fluencia hay que dividir lo anterior por el volumen ΔV y tomar el límite $\Delta V \rightarrow 0$

$$\Phi \equiv \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \sum_i L_i$$

Motivación de esta propuesta:

- Desde el punto de vista **operacional** resulta más fácil de manejar.
- Se puede trabajar estocásticamente (en Monte Carlo) y no estocásticamente.
- Se abandona el detector esférico.



Fluencia de Energía y Tasa de Fluencia de Energía

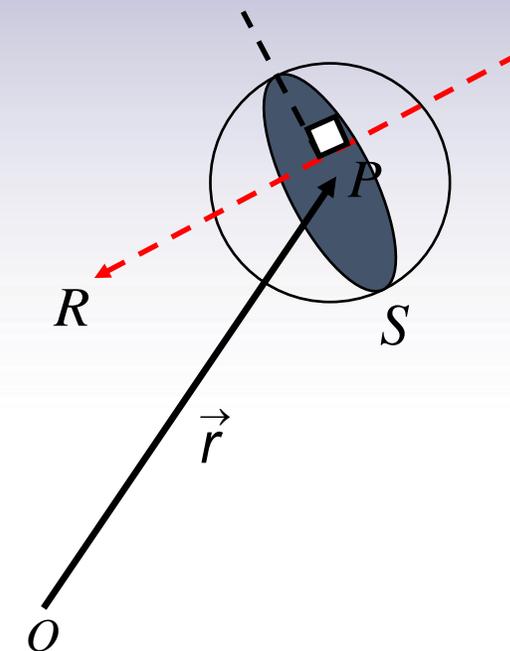
Si $\langle E \rangle$ es el valor esperado de $E \equiv E_T - m_0c^2$, que es la energía (donde se ha restado a la energía total E_T la energía en reposo m_0c^2 , **ICRU 33**) que transportan los $\langle N \rangle$ rayos que atraviesan ó penetran una esfera centrada en el punto P en el intervalo de tiempo que va a ir del instante t_0 al instante t , entonces Ψ es la **fluencia de energía** y viene dada por (como variable no estocástica)

$$\Psi(\vec{r}; t_0, t) \equiv \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{\Delta \langle E \rangle}{\Delta a} = \frac{d \langle E \rangle}{da}$$

- Se expresa en unidades de J/m^2 ó erg/cm^2
- Depende de la posición y del tiempo.
- Es función monótona creciente del tiempo.

$$\psi(\vec{r}; t_0, t) \equiv \frac{d\Psi(\vec{r}; t_0, t)}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{d \langle E \rangle}{da} \right)$$

Tasa de fluencia de energía:
 J/m^2s o erg/cm^2s



ICRU: International Commission on Radiation Units and Measurements



¿Qué Sucede si Tenemos Diferentes Tipos de Rayos?

$p_i \rightarrow$ probabilidad de tener un rayo del tipo i

 Tiene asociada una energía E_i

 N_i Número de rayos en $[t_0, t]$

$$\langle N \rangle \equiv \sum_i p_i N_i \quad \langle E \rangle \equiv \sum_i p_i N_i E_i \quad \sum_i p_i \equiv 1$$

Rayos Monoenergéticos:

$$\langle E \rangle = \sum_i p_i N_i E_i = E_0 \sum_i p_i N_i = E_0 \langle N \rangle \quad \Psi(\vec{r}; t_0, t) = E_0 \Phi(\vec{r}; t_0, t)$$

En general tenemos:

$$\Phi(\vec{r}; t_0, t) = \sum_i p_i \Phi_i(\vec{r}; t_0, t) \quad \Psi(\vec{r}; t_0, t) = \sum_i p_i \Psi_i(\vec{r}; t_0, t) = \sum_i p_i E_i \Phi_i(\vec{r}; t_0, t)$$

Atenuación y Transporte de Haces





Energía Radiante y Energía Transferida

Energía Radiante: $R \rightarrow [R \equiv \langle E \rangle]$ Energía de las partículas que es emitida, transferida ó recibida, excluyendo la masa en reposo (ICRU 33, 1980).

Energía Transferida: ε_{tr} al volumen V (estocástica)

$$\varepsilon_{tr} \equiv (R_{in})_u - (R_{out})_u^{nonr} + \Sigma Q$$

$(R_{in})_u \rightarrow$ **Energía radiante de las partículas neutras que entran a V .**

$(R_{out})_u^{nonr} \rightarrow$ **Energía radiante de las partículas neutras que salen de V , excepto aquellas que se produzcan por pérdidas radiativas que sufran las partículas cargadas en V .**

$\Sigma Q \rightarrow$ **Energía neta obtenida a partir de conversiones relacionadas con la masa en reposo.**

$$M \rightarrow E(+)$$

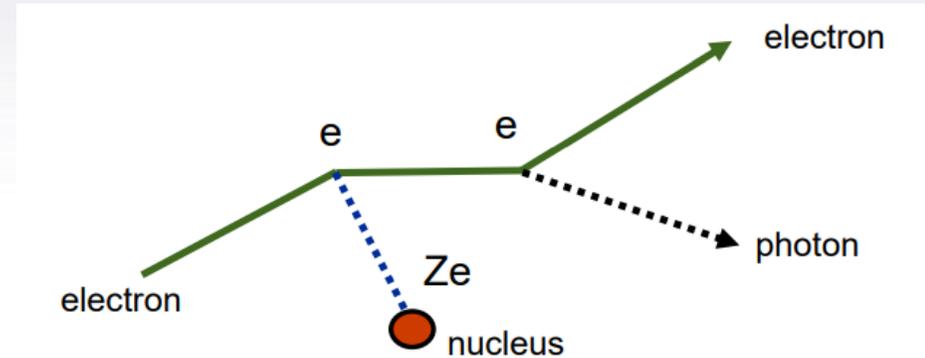
$$E \rightarrow M(-)$$

ICRU: International Commission on Radiation Units and Measurements



¿Qué se considera pérdida radiativa?

- Conversión de energía cinética de una partícula cargada en energía de fotones, a través de mecanismos como:
- Producción de rayos-X por Bremsstrahlung.



- **Aniquilación de positrones:** Solamente la energía cinética del positrón sobre el umbral de $2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV}$ del par electrón-positrón, se considera pérdida radiativa.



Kerma (Kinetic Energy Released per Unit MAss)

- Cantidad no estocástica relevante solamente para campos de radiaciones neutras (fotones ó neutrones) ó cualquier fuente de radiación ionizante distribuida dentro del medio absorbente.
- Los neutrinos van a ser completamente ignorados en el contexto de física radiológica y dosimetría. ¿Por qué?

Kerma: Es el valor esperado de la energía trasferida a partículas cargadas, por unidad de masa, en el punto **P** de interés, incluyendo pérdidas radiativas y excluyendo la energía trasferida de una partícula cargada a otra en V .

$$K = \frac{d\langle \varepsilon_{tr} \rangle}{dm} \quad dm \longleftrightarrow dV$$

Unidades: $1 \text{ Gy} \equiv 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad} = 10^4 \text{ erg/g}$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy}$$



Relación entre el Kerma y la Fluencia de Energía de Fotones

σ_{tr} → **Sección eficaz total** asociada al proceso de **transferencia de energía de los fotones.**

n → **Densidad de átomos** en el material.

$\mu_{tr} = n\sigma_{tr}$ → **Probabilidad por unidad de longitud** de que los fotones transfieran su energía.

$n\sigma_{tr}\Phi$ → **Número de fotones por unidad de volumen** que interactúan con la materia transfiriendo su energía.

$n\sigma_{tr}\Phi E dV = \mu_{tr}\Psi dV$ → **Energía transferida** en el volumen dV

Entonces:

$$d\langle \varepsilon_{tr} \rangle = \mu_{tr} \Psi dV = \frac{\mu_{tr}}{\rho} \Psi dm \quad \rho \equiv \frac{dm}{dV} \quad \Psi = E\Phi$$

y entonces:

$$K = \frac{d\langle \varepsilon_{tr} \rangle}{dm} = \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{E,Z} \Psi$$

$\left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{E,Z}$ → **Coefficiente de transferencia energía-materia. Unidades: área/masa.**



¿Si No Estamos en Presencia de Fotones Monoenergéticos?

Suponemos que en P existe un **espectro de energía**: $\frac{\partial \Psi(E)}{\partial E}$

Unidades: $J m^{-2} keV^{-1}$, $erg cm^{-2} keV^{-1}$

El **kerma** a calcular en este caso viene dado por

$$K = \int_0^{E_{max}} dE \frac{\partial \Psi}{\partial E} \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{E,Z}$$

$$\left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{E,Z} \longrightarrow \left\langle \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right\rangle_{\Psi,Z} = \frac{K}{\Psi} = \frac{\int_0^{E_{max}} dE \frac{\partial \Psi}{\partial E} \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{E,Z}}{\int_0^{E_{max}} dE \frac{\partial \Psi}{\partial E}}$$

**Tabulado (NIST,
National Nuclear
Data Center Attix
1986)**



PHYSICAL MEASUREMENT LABORATORY

About PML



Divisions



Products/Services



News/Multimedia

Programs/Projects

Facilities



Email Newsletter

X-Ray Mass Attenuation Coefficients



NIST Standard Reference Database 126

Last Update to Data Content: July 2004 | NISTIR 5632 | [Version History](#) | [Disclaimer](#) |

DOI: <https://dx.doi.org/10.18434/T4D01F>

Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements $Z = 1$ to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest*

CONNECT WITH US



<https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>



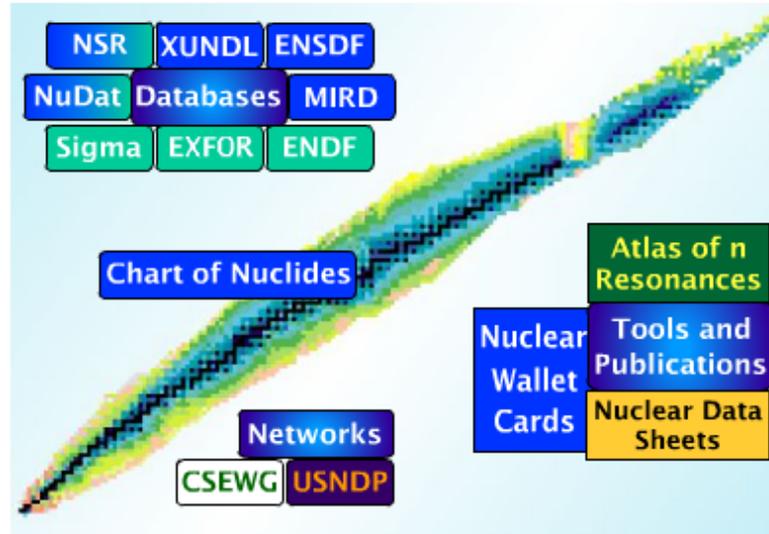
National Nuclear Data Center



National Nuclear Data Center

BROOKHAVEN
NATIONAL LABORATORY

Site Index



Tweets by @NNDCC_BNL

National Nuclear Data Center Retweeted

Quanta Magazine @QuantaMagazine
Marie Curie's laboratory first observed water radiolysis, in which particles from the radioactive decay of elements like uranium split water molecules, in the early 1900s. Researchers have found evidence that this process fuels life in deep ocean sediment.

Embed View on Twitter

Main

Structure & Decay

Reactions

Bibliography

Networks & Links

Publications

AMDC Atomic Mass Data Center, *Q-value Calculator*

Covariances of Neutron Reactions

ENSDF Evaluated Nuclear Structure Data File

Atlas of Neutron Resonances Parameters & thermal values

CSEWG Cross Section Evaluation Working Group

IRDF IRDF International Reactor Dosimetry and Fusion File

CapGam Thermal Neutron Capture γ -rays

EXFOR Nuclear reaction experimental data

MIRD Medical Internal Radiation Dose

Chart of Nuclides Basic properties of atomic nuclei

ENDF Evaluated Nuclear (reaction) Data File, *Sigma*

NDWG Nuclear Data Working Group

<https://www.nndc.bnl.gov>



Relación entre Kerma y Fluencia de Energía de Neutrones

Lo hecho anteriormente para **fotones** también vale para **neutrones**.

• Tradicionalmente los **campos de neutrones** se describen en términos de **fluencia y tasa de fluencia**. No se suele hacer con fluencia de energía y tasa de fluencia de energía (no hay razón técnica para ello).

• Para **neutrones monoenergéticos**: $\Psi = E\Phi$

Factor kerma para neutrones: Aparece tabulado.

$$(F_n)_{E,Z} = E \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{E,Z}$$

Unidades:

$$\left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{E,Z} \longrightarrow \text{cm}^2/\text{g} \quad (F_n)_{E,Z} \longrightarrow \text{rad cm}^2 \quad K \longrightarrow \text{rad o cGy}$$

$$1 \text{ MeV} / \text{neutron} \longrightarrow 1.602 \times 10^{-8} \text{ g} - \text{rad}$$

Entonces adoptamos para **neutrones**:

$$K = \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{E,Z} \Psi \rightarrow K = (F_n)_{E,Z} \Phi$$



¿Si no Estamos en Presencia de Neutrones Monoenergéticos?

Suponemos que en P existe un **espectro de energía**: $\frac{\partial \Phi(E)}{\partial E}$

Unidades: $m^{-2} MeV^{-1}$, $cm^{-2} MeV^{-1}$

El **kerma** a calcular en este caso viene dado por

$$K = \int_0^{E_{max}} dE \frac{\partial \Phi}{\partial E} (F_n)_{E,Z}$$

$(F_n)_{E,Z}$ → **Tabulado (NIST,
National Nuclear
Data Center,
Attix, 1986)**

$$\langle F_n \rangle_{\Phi,Z} = \frac{K}{\Phi} = \frac{\int_0^{E_{max}} dE \frac{\partial \Phi}{\partial E} (F_n)_{E,Z}}{\int_0^{E_{max}} dE \frac{\partial \Phi}{\partial E}}$$



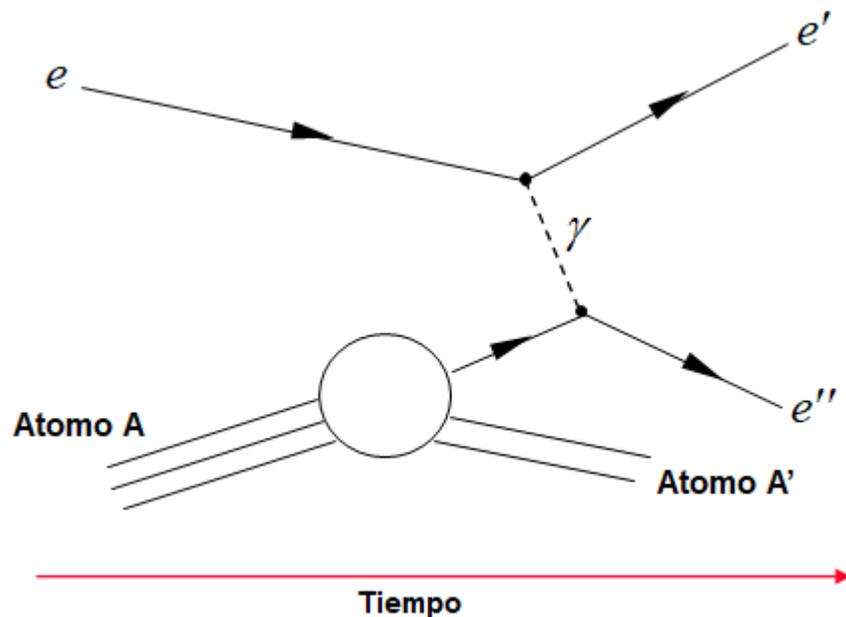
¿Cómo se Compone el Kerma?

La radiación ionizante formada por partículas neutras promueve partículas cargadas:

- **Rayos-X y gammas:** Kerma consiste en la energía transferida a las entidades cargadas por unidad de masa del medio. La energía cinética suministrada a un electrón pueden distribuirse en el medio a través de los mecanismos:

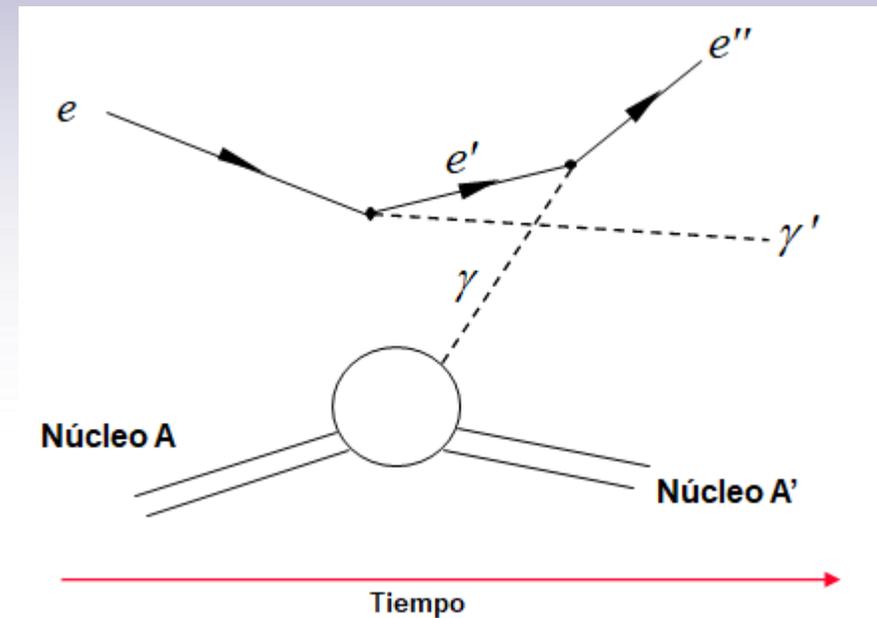
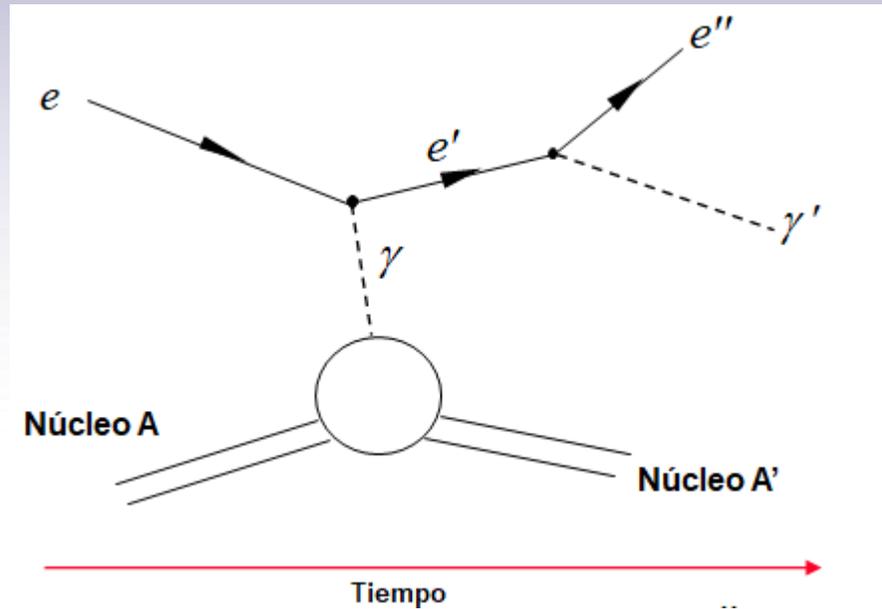
INTERACCIÓN DE COLISIÓN

(1) Por interacción Coulombiana con electrones atómicos del material absorbente. Ionización ó excitación ocurren cerca de la traza dejada por el electrón rápido.





¿Cómo se Compone el Kerma?



CONTRIBUCIÓN RADIATIVA

(2) Interacción de Coulomb con el núcleo atómico con desaceleración del electrón (**bremsstrahlung**). Los rayos-X producidos llevan su energía lejos de la traza dejada por la partícula cargada.



¿Cómo se Compone el Kerma?

(3) Aniquilación en vuelo del positrón: La energía cinética del positrón antes de la aniquilación pasa a ser parte de la de los fotones, que por no tener carga, pueden transportar esta energía lejos de la traza de la partícula cargada.



Otra forma de pérdida radiativa

Entonces podemos escribir:

$$K = K_c + K_r$$

kerma de
colisión

kerma radiativo

¿Qué Ocurre con los Neutrones?

• **Neutrones:** Las partículas cargadas que promueven son protones y en general núcleos más pesados (productos de la reacción). En este caso el kerma radiativo es despreciable y entonces

$$K = K_c$$



Energía Transferida Neta

Energía transferida neta: ε_{tr}^n en el volumen V (Estocástica)

$$\varepsilon_{tr}^n = (R_{in})_u - (R_{out})_u^{nonr} - R_u^r + \Sigma Q = \varepsilon_{tr} - R_u^r$$

$R_u^r \rightarrow$ **Energía radiante** emitida como **pérdida radiativa** por las **partículas cargadas generadas en V**, independientemente del **lugar** donde las pérdidas radiativas tengan lugar.

Las **pérdidas radiativas** están **eliminadas** en ε_{tr}^n



Kerma de Colisión y Radiativo

Kerma de colisión en el punto P: $K_c \equiv \frac{d\langle \varepsilon_{tr}^n \rangle}{dm}$

Kerma de colisión: Es el valor esperado de la energía transferida neta a las partículas cargadas por unidad de masa en el punto P de interés, excluyendo las energías asociadas a las pérdidas radiativas y la energía que se transfiere de una partícula cargada a otra.

Kerma radiativo: Se define por **diferencia** $K_r \equiv K - K_c$

También: $K_r \equiv \frac{d\langle R_u^r \rangle}{dm}$



Kerma de Colisión y Fluencia de Energía de Fotones

En forma paralela:

$$K = \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{E,Z} \Psi \rightarrow K_c = \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{E,Z} \Psi$$

$$\left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{E,Z} \rightarrow$$

Coefficiente másico de transferencia de energía

Unidades:

$$\begin{aligned} &cm^2/g \\ &m^2/kg \end{aligned}$$

$$\mu_{tr} \rightarrow$$

Coefficiente lineal de transferencia de energía

$$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{E,Z} \rightarrow$$

Coefficiente másico de absorción de energía

$$\mu_{en} \rightarrow$$

Coefficiente lineal de absorción de energía



¿Si No Estamos en Presencia de Fotones Monoenergéticos?

Suponemos que en P existe un **espectro de energía**: $\frac{\partial \Psi(E)}{\partial E}$

Unidades: $J m^{-2} keV^{-1}$, $erg cm^{-2} keV^{-1}$

El **kerma de colisión** a calcular en este caso viene dado por

$$K_c = \int_0^{E_{max}} dE \frac{\partial \Psi}{\partial E} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{E,Z}$$

$$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{E,Z} \longrightarrow \text{Tabulado (NIST, National Nuclear Data Center, Attix, 1986)} \quad \left\langle \frac{\mu_{en}}{\rho} \right\rangle_{\Psi,Z} = \frac{K}{\Psi} = \frac{\int_0^{E_{max}} dE \frac{\partial \Psi}{\partial E} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{E,Z}}{\int_0^{E_{max}} dE \frac{\partial \Psi}{\partial E}}$$



Energía Impartida

Energía impartida: La energía impartida ε (**cantidad estocástica**) por la radiación ionizante a materia de masa m y volumen finito V .

$$\varepsilon = (R_{in})_u - (R_{out})_u + (R_{in})_c - (R_{out})_c + \Sigma Q$$

$(R_{out})_u$ \longrightarrow **Energía radiante** de toda la radiación no cargada que abandona V .

$(R_{in})_c$ \longrightarrow **Energía radiante** de toda la radiación cargada que ingresa a V .

$(R_{out})_c$ \longrightarrow **Energía radiante** de toda la radiación cargada que abandona V .



Dosis Absorbida

Dosis Absorbida: En un punto **P** de **V**, se define como

$$D \equiv \frac{d\langle \varepsilon \rangle}{dm} \quad dm \longleftrightarrow dV$$

$\langle \varepsilon \rangle$ \rightarrow **Valor esperado** de la energía impartida en el volumen **V**, en $[t_0, t]$

Dosis Absorbida: Es el **valor esperado** de la **energía impartida** a la materia por unidad de masa en un punto.

Unidades: **Las mismas del kerma.**

Dosis integral: El promedio de la dosis en un volumen **V** de masa **m** y la simbolizamos por \bar{D}

- **No se puede escribir una relación directa** de la dosis absorbida con la fluencia ó la fluencia de energía. **La dosis es depositada por las partículas cargadas secundarias.**



<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

UAN
UNIVERSIDAD
ANTONIO NARIÑO



