

Interacción de la radiación con la materia

Antonio Ortiz Velásquez

Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM

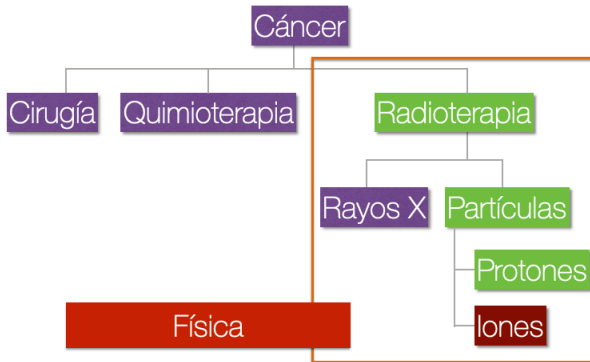
Marzo 14, 2024



La Masterclass de Terapia de Partículas (PTMC) es una actividad educativa práctica, dirigida a estudiantes del nivel medio superior, que demuestra aplicaciones directas de la ciencia básica, en particular la física, en beneficio de la sociedad, centrándose en el tratamiento de tumores cancerosos con partículas cargadas.



Opciones de tratamiento contra el cancer

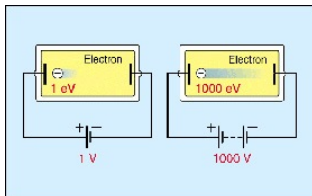


Aprenderemos:

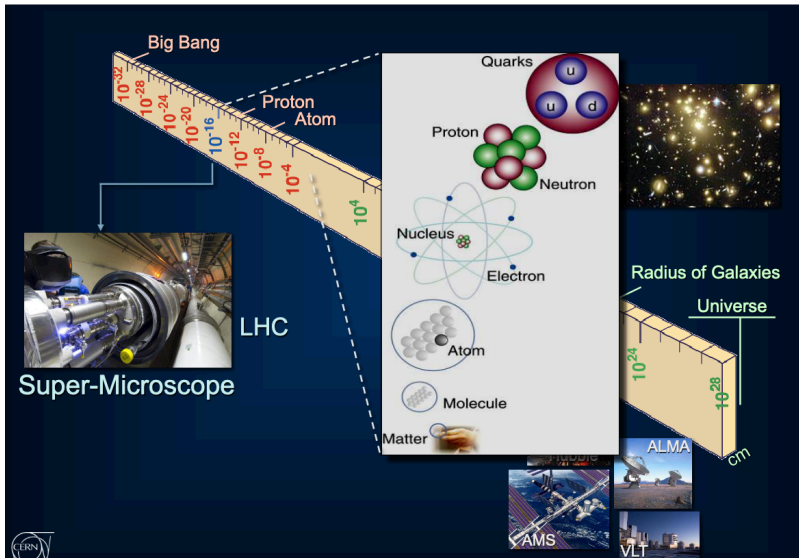
- Como interactúan los fotones, y partículas cargadas con la materia
- Como se aceleran partículas cargadas
- Efectos biológicos de la radiación
- Aplicaciones
 - Terapia con hadrones **[Alex]**
 - Radioterapia en hospitales mexicanos **[Amanda]**
 - Imágenes diagnósticas **[Victor]**
 - Sesión práctica **[Viri]**

Qué es el electrónvolt (eV)?

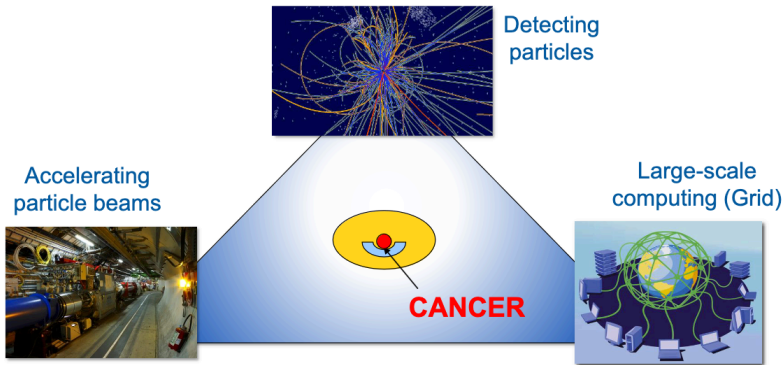
Un eV es el trabajo requerido para mover un electrón a través de una diferencia de potencial de un volt. Alternativamente, es igual a la energía cinética adquirida por un electrón cuando es acelerada a través de una diferencia de potencial de un volt



Qué hacen los físicos de partículas?

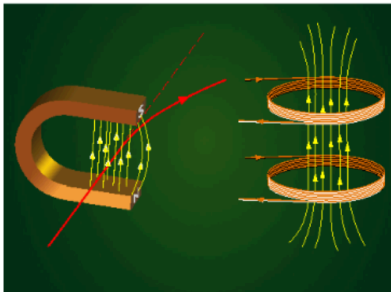


Tecnologías para física de altas energías



Cómo acelerar partículas?

- ✓ **Objetivo:** mantener partículas suficientes confinadas en un volumen bien definido para acelerarlas
- ✓ **¿Cómo?** **Fuerza de Lorentz.** Usar una secuencia (red) de magnetos y cavidades de aceleración



$$\vec{F}(t) = q[\vec{E}(t) + \vec{v}(t) \times \vec{B}(t)]$$

- El campo eléctrico acelera partículas
- El campo magnético confina a las partículas en una trayectoria dada

Interacción de partículas cargadas con la materia

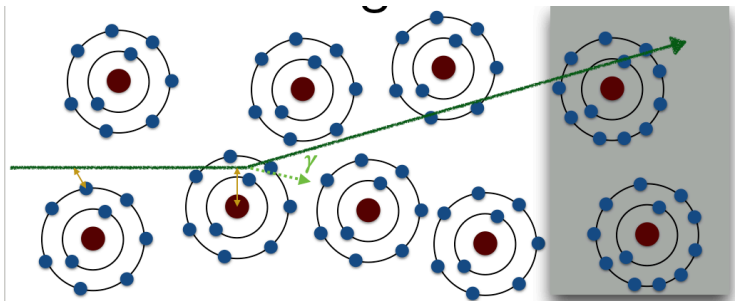
Dividimos a las partículas cargadas en dos clases (veremos más adelante porque):

- electrones y positrones
- Partículas pesadas, es decir, $m_{\text{part}} \gg m_e \approx 0.51 \text{ MeV}/c^2$

Las colisiones inelásticas son las principales responsables de la pérdida de energía de partículas pesadas en la materia. **La energía es transferida de las partículas al átomo causando ionización (colisiones duras) o excitación (colisiones blandas)**

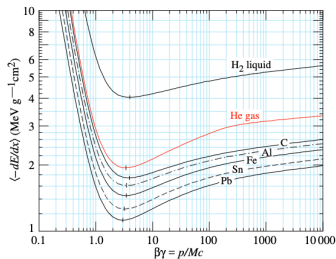
En cada colisión se transfiere una pequeña fracción de la energía cinética de la partícula, sin embargo, en materiales densos comunes, el número de colisiones por unidad de longitud de camino es grande, de tal manera que se acumula suficiente energía perdida que puede observarse incluso en materiales delgados

Energía perdida de partículas cargadas pesadas debido a colisiones atómicas



- A Interacción con electrones atómicos → la partícula incidente pierde energía y el átomo se excita o ioniza
- B Interacción con el núcleo atómico → la partícula se dispersa, se puede emitir luz (fotones)

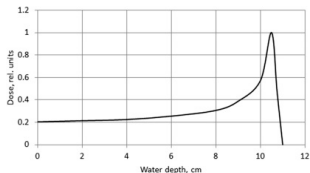
Energía depositada en la materia



- $\beta = v/c$, v es la velocidad de la partícula, y c es la velocidad de la luz
- Partículas de mínima ionización: MIP. Para protones ocurre a momentum de $p \approx 3 \text{ GeV}/c$
- Por debajo del MIP, la energía depositada en el medio va como: $-\frac{dE}{dx} \propto \frac{q^2}{v^2}$

Curva de Bragg

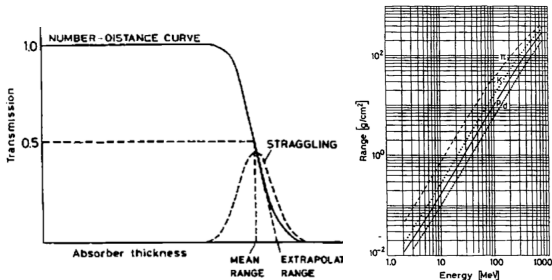
- Conforme una partícula pesada se “ralentiza” en la materia, su tasa de energía perdida cambia según su energía cinética. De hecho, cada vez depositará más energía conforme penetra en la materia, y depositará la totalidad de su energía al final. Ver ejemplo de abajo para protones de 121 MeV en agua



- La curva que dibuja se llama “curva de Bragg”. Este efecto es importante en aplicaciones médicas en las que se desea liberar una dosis de radiación a tumores profundamente inclustados, pero con un mínimo de destrucción de tejido sano circundante

Rango

El rango es la distancia de penetración de las partículas a la que pierden toda su energía. Una curva típica se encuentra abajo (lado izquierdo)

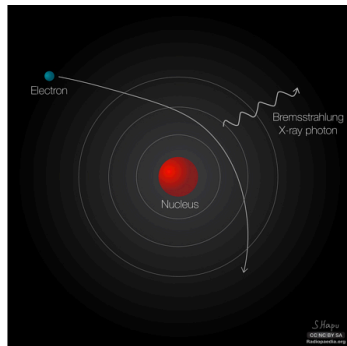


El cociente no cae abruptamente, debido a que la pérdida de energía no es continua sino un proceso de naturaleza estadística (dos partículas idénticas no sufrirán el mismo número de colisiones).

Pérdida de energía de electrones y positrones

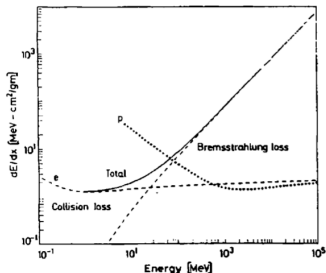
Los electrones (e^-) y positrones (e^+) además de la pérdida de energía por colisión, debido a su masa pequeña su trayectoria se modifica debido a la interacción con el campo eléctrico del núcleo atómico (aceleración) emitiendo radiación *bremstrahlung*:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{tot}} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{coll}}$$



Energía crítica

La figura de abajo muestra una comparación de la energía perdida por radiación vs energía perdida por colisión en Cu



Para cada material podemos definir una energía crítica, E_c , para la que $\frac{dE}{dx}_{\text{rad}} = \frac{dE}{dx}_{\text{col}}$, arriba de esta la energía perdida por radiación es dominante. Hay una fórmula aproximada que puede resultar útil:

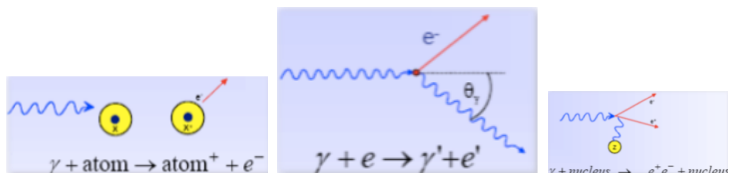
$$E_c \approx \frac{800 \text{ MeV}}{Z+1.2}$$

Interacción de fotones

Los fotones en la materia, en nuestro caso rayos-x ($\sim\text{keV}$) y γ ($\sim\text{MeV}$) debido a que no tienen carga eléctrica se comportan de manera diferente en la materia respecto a las partículas cargadas

Principales interacciones

- Efecto fotoeléctrico
- Dispersión Compton
- Producción de pares



- Los fotones no degradan su energía conforme atraviesan la materia, sólo se atenúa la intensidad:
 $I(x) = I_0 \exp(-\mu x)$ donde I_0 es la intensidad del haz incidente, x es el espesor del absorbente, μ es el coeficiente de absorción
- Recuerde: en partículas cargadas la situación es muy diferente, cada partícula pierde energía de manera continua, mientras que los fotones tienen cierta probabilidad de sobrevivir al atravesar un material

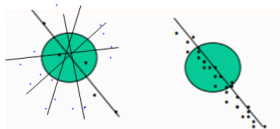
- Una cantidad para discutir el efecto de la radiación en la materia es la dosis absorbida D . Esta es una cantidad que mide la energía total absorbida por unidad de masa y es el parámetro fundamental en protección radiológica. Su unidad de medida es el Gray, que se define así:
$$1 \text{ Gray (Gy)} = 1 \frac{\text{Joule}}{\text{kg}}$$
- Note que la dosis absorbida no indica la tasa a la que la radiación ocurre ni el tipo específico de radiación, estos factores son importantes cuando se habla de efectos biológicos de la radiación

- Los estudios muestran que el daño biológico causado por la radiación depende del tipo de radiación y su energía. Una dosis de partículas α , por ejemplo, produce más daño que una dosis igual de protones y más daño que una dosis de electrones o rayos gamma
- La diferencia radica en la transferencia lineal de energía (LET por sus siglas en inglés) de las diferentes partículas, es decir, la energía depositada localmente por unidad de longitud de camino (para muchos propósitos dE/dx). Así que cuanto más ionice la partícula, mayor será el daño biológico local

Efectividad biológica efectiva, RBE

- Para tomar en cuenta este efecto, se asigna a cada tipo de radiación un factor de peso de radiación, w_R (o factor de calidad) que indica su efectividad biológica relativa (RBE)
- RBE de una radiación particular es el cociente (A/B) de la dosis absorbida de una radiación bajo estudio (A) que se requiere que logre el mismo nivel de efecto biológico que la dosis absorbida de una radiación de referencia (B, ^{60}Co γ -rays)

Radiation Type	LET (keV/ μm)	RBE
Linac X-rays (6–15 MeV)	0.3	~0.8
Beta particle (1 MeV)	0.3	0.9
Cobalt-60 γ -rays	0.2	0.8–0.9
250 kVp X-rays (standard)	2	1.0
150 MeV protons (therapy energies)	0.5	~1.1
Neutrons	0.5–100	1–2
Alpha particles	50–200	5–10
Carbon ions (in spread out Bragg peak)	40–90	2–5



Efectividad biológica efectiva, RBE

Para dosis iguales absorbidas, las partículas α se consideran más dañinas que β , y estas 5 veces más dañinas que los fotones

Tipo de radiación y energía	w_R
Fotones, todas las energías	1
e y μ , todas las energías	1
Neutrones	
< 10 keV	5
10 keV a 100 keV	10
> 100 keV a 2 MeV	20
> 2 MeV a 20 MeV	10
> 20 MeV	5
β , energía > 2 MeV	5
α , fragmentos de fisión, núcleos pesados	20

Dosis equivalente

Para obtener una medida normalizada del efecto biológico sufrido por un órgano o tejido debido a la radiación, se calcula la dosis equivalente, H_T , multiplicando el valor de la dosis absorbida (promediada sobre todo el órgano o tejido) por el factor de peso de la radiación

- Dosis equivalente = $H_T = w_R D_R$, donde D_R es la dosis absorbida promedio recibida por el órgano R
- Si se presenta más de un tipo de radiación, se calcula la suma de la dosis absorbida por cada tipo de radiación pesado por su correspondiente factor w_R

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

$D_{T,R}$ es la dosis absorbida promedio recibida por un órgano T debido a la radiación tipo R

Unidad de dosis equivalente

- La unidad de dosis equivalente es el Sievert (Sv) que tiene las mismas dimensiones que la dosis absorbida, Gray (J/kg)
- El uso del Sievert, indica que la dosis absorbida se escala por RBE, tal que 1 Sv de partículas α produce aproximadamente el mismo efecto que 1 Sv de rayos gamma
- Note que la dosis equivalente no es una cantidad directamente medible, mientras que la dosis absorbida sí
- El *rem* es una unidad más vieja, y su relación con el Sievert es: $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$

- La relación entre la probabilidad de desarrollar efectos biológicos como cáncer o anomalías genéticas debido a la radiación también depende del órgano específico o tejido que recibe la radiación
- Para tomar en cuenta esto, se define un “factor del tejido ponderado”, w_T para diferentes órganos del cuerpo

Factor del tejido ponderado

En 2007, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) publicó un nuevo conjunto de factores de ponderación de tejidos 2 como se muestra a continuación:

- $w_T = 0.12$ (para cada uno de 6): estómago, colon, pulmón, médula ósea (rojo), mama y resto de tejidos¹
- $w_T = 0.08$: gónadas
- $w_T = 0.04$: vejiga urinaria, esófago, hígado, tiroides
- $w_T = 0.01$: superficie ósea, piel, cerebro, glándulas salivales

La suma de todos los factores de tejido ponderados:

$$(0.12 \times 6) + 0.08 + (0.04 \times 4) + (0.01 \times 4) = 1.0$$

¹Tejidos restantes, en conjunto (13 órganos): glándulas suprarrenales, región extratorácica, vesícula biliar, corazón, riñón, ganglios linfáticos, músculo, mucosa oral, páncreas, intestino delgado, bazo, timo y útero/cuello uterino, próstata

Factor del tejido ponderado

- Note que los factor del tejido ponderado son independientes del tipo de radiación y energía
- Con estos factores se define la dosis efectiva E de la siguiente manera:

$E = \sum w_T H_T$, la suma corre sobre todos los órganos y tejido expuesto. La dosis efectiva se correlaciona muy bien con la probabilidad de desarrollar cáncer, y al igual que la dosis equivalente se mide en unidades de Sievert

- Note que para la dosis equivalente uniforme sobre todo el cuerpo, la dosis efectiva es numéricamente igual a la dosis equivalente

Dosis típicas de fuentes ambientales

- Estamos inmersos en un baño constante de radiación originada de fuentes naturales y artificiales: rayos cósmicos, isótopos radiactivos (tierra, materiales de construcción), diagnóstico médico y fuentes radiactivas usadas en la industria
- La dosis de radiación debida a la radiación cósmica variará con la altitud. Las altitudes más altas significan una mayor exposición a la radiación cósmica

Fuente de radiación natural	Dosis anual promedio ²	Porcentaje
Interno (por inhalación)	2.28 mSv (228 mrem)	73%
Externo (por exposición cósmica)	0.33 mSv (33 mrem)	11%
Interno (por ingestión)	0.29 mSv (29 mrem)	9%
Externo (por exposición terrestre)	0.21 mSv (21 mrem)	7%

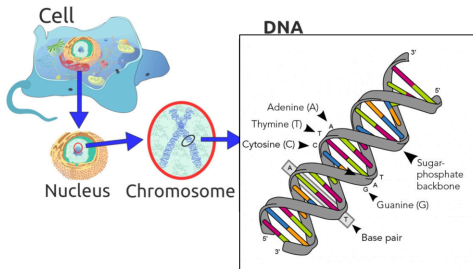
²National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP Report No. 160, Ionizing Radiation Exposure of the Population of US

Fuentes de radiación artificiales

- Los procedimientos médicos representan casi toda la exposición humana (96%) a la radiación artificial, e.g., una radiografía de tórax normalmente proporciona una dosis de aproximadamente 0.01 rem (10 mrem) y una tomografía computarizada (TC) de cuerpo completo proporciona una dosis de 1 rem (1000 mrem)

Medical Procedure Doses	
Procedure	Dose (mrem)
X-Rays-single exposure	
Pelvis	70
Abdomen	60
Chest	10
Dental	1.5
Hand/Foot	0.5
Mammogram (2 views)	72
Nuclear Medicine	400
CT	
Full body	1,000
Chest	700
Head	200

Información básica del ADN



- Cada célula contiene ácido desoxirribonucleico (ADN). Constantemente le dice a las células qué hacer
- Una molécula de ADN tiene una estructura de “escalera retorcida”. Los rieles largos se llaman “columna vertebral”. Cada peldaño es una combinación de bases de nucleótidos: “A” (adenina), “G” (guanina), “C” (citosina), y “T” (timina)

- La radiación daña al tejido vivo debido a su poder de ionización en la materia
- La ionización puede dañar las células vivas directamente rompiendo los enlaces químicos de moléculas biológicas importantes (particularmente el ADN), o creando radicales químicos de moléculas de agua en las células que después atacan químicamente a las moléculas biológicas
- Las moléculas son reparadas por procesos biológicos naturales, sin embargo, la efectividad de la reparación depende del daño

Si la reparación es exitosa, entonces no hay efectos observables, en caso contrario las células pueden sufrir tres fallas posibles

- Muerte de la célula
- Una discapacidad en el funcionamiento natural de la célula produciendo efectos somáticos como cáncer
- Una alteración permanente de la célula que se transmite a una siguiente generación, efecto genético

Efectos biológicos

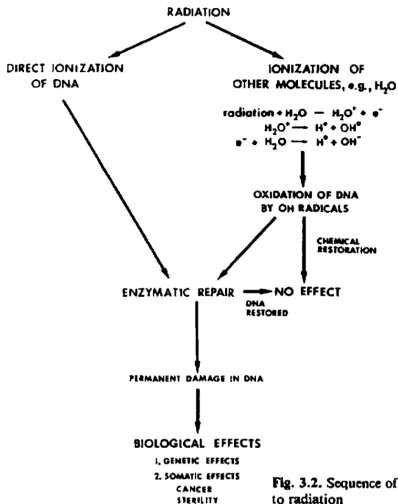


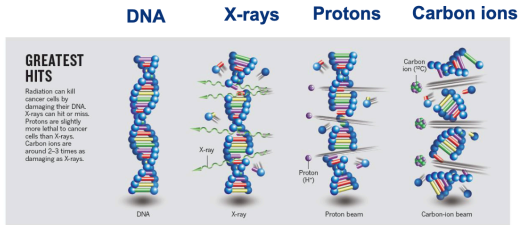
Fig. 3.2. Sequence of events occurring in living matter exposed to radiation

Comparaciones del riesgo de radiación con los riesgos de otras ocupaciones. La esperanza de vida se considera como 73 años

Occupation	Average loss of life expectancy [months]
20 rem (typical dose of radiation worker in research lab after 47 yrs i.e. age 18–65)	0.4
50 rem (typical dose of worker in nuclear power plant after 47 years)	1
235 rem	5
Trade	1
Service industries	1.2
Transportation and public utilities	5
Off-the-job accidents	7.5
Construction	10
Mining and quarrying	11

Radiación en diferentes tipos de células

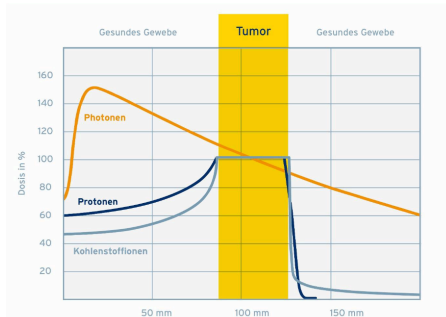
- Algunas células, como la sangre y las células reproductivas, se dividen más a menudo que otras. Este tipo de células son mucho más sensibles a la radiación. Las células tumorales de rápido crecimiento también son muy sensibles a la radiación. Por eso se puede utilizar radiación para matar las células cancerosas



Marx, Nature, 2014

Protones vs iones

- Las partículas cargadas incluyendo protones e iones relativamente pesados muestran un pico de Bragg similar
- Los iones pesados tienen un mayor pico respecto a la línea base
- Los iones tienen un perfil de dosis lateral más estrecho (menor daño al tejido sano)



- R. Fernow, Introduction to Experimental Particle Physics, Cambridge University Press, 1989
- W. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer, 1994
- P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020)