



Tema 1: Introducción a las radiaciones

1. Introducción

La radiactividad es un fenómeno natural que nos rodea. Está presente en las rocas, en la atmósfera y en los seres vivos. Un fondo de radiactividad proveniente del espacio (principalmente del Sol) está presente en los rayos cósmicos.

La radiactividad fue descubierta a finales del siglo XIX. Este descubrimiento motivó la investigación de la estructura microscópica de la materia. La radiactividad no podría entenderse sin el estudio de los átomos, de los núcleos y de sus constituyentes,

El origen del término radiactividad proviene de la actividad del radio, elemento químico inestable que se transforma en otro espontáneamente por desintegración de sus núcleos, emitiendo partículas energéticas más pequeñas. Por extensión se aplicó el mismo término a todos los elementos que sufrían transformaciones similares.

Una definición más precisa de radiactividad sería *la cualidad que posee un material para emitir radiaciones*.

Radiación es *cualquier forma de energía o materia que se irradia por el espacio en distintas direcciones*. Dependiendo de su naturaleza, podemos considerar dos tipos principales: radiación electromagnética y radiación de materia.

2. Radiación electromagnética

2.1. Espectro electromagnético

La radiación electromagnética consiste en campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se propagan como ondas a la velocidad de la luz (en el vacío)

$$c = 299792 \text{ Km/s} \simeq 300000 \text{ Km/s} = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (1)$$

La luz visible es un tipo de radiación electromagnética. Los distintos tipos de radiación electromagnética se clasifican por sus frecuencias. En orden creciente de frecuencias tendríamos las ondas de radio, microondas, infrarrojo, luz visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma (γ).

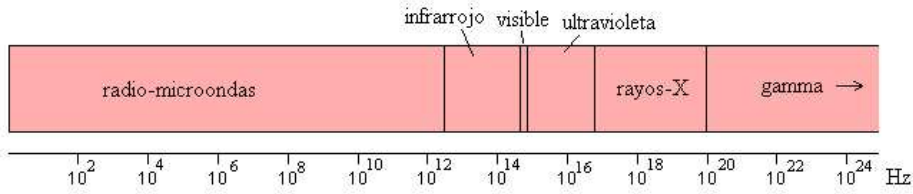


Figura 1: Espectro electromagnético

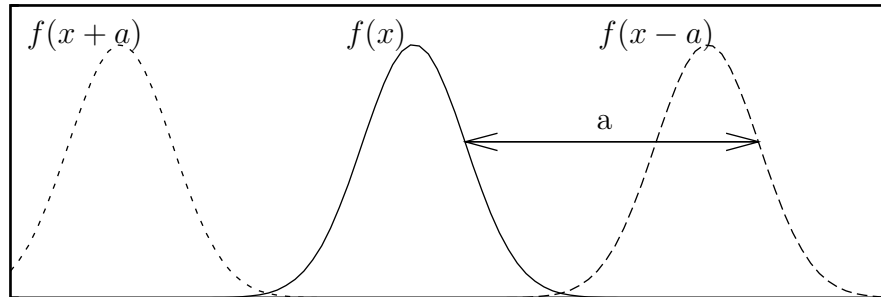


Figura 2: Traslación de una función

2.2. Frecuencia y longitud de onda

Una onda es una propiedad física que se propaga por el espacio o la materia. Matemáticamente se representa por una función de la posición y del tiempo, $\Psi(\vec{r}, t)$. Consideremos el caso más sencillo en una dimensión $\Psi(x, t)$. Una onda propagándose a velocidad constante v corresponde a una función del tipo

$$\Psi(x, t) = f(x - vt) \quad (2)$$

en donde $f(x)$ es una función arbitraria. En efecto, la función $f(x - a)$ se representa trasladando la gráfica de $f(x)$ a la derecha una distancia a (figura 2). Si la velocidad de desplazamiento es v , transcurrido un tiempo t , la gráfica de la función se habrá desplazado una distancia $a = vt$. Por tanto la onda está dada en función del tiempo por $f(x - a) = f(x - vt)$.

En el caso de la onda **sinusoidal**, $f(x) = \sin kx$, donde k es el **número de ondas**

$$\Psi(x, t) = \sin k(x - vt) = \sin(kx - \omega t) \quad (3)$$

donde $\omega = kv$ es la frecuencia angular. La longitud de onda λ es el periodo espacial, para t fijo,

$$k\lambda = 2\pi \implies \lambda = \frac{2\pi}{k}. \quad (4)$$

El periodo T es el periodo temporal, para x fijo,

$$\omega T = 2\pi \implies T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (5)$$

La frecuencia ν es el número de oscilaciones por unidad de tiempo. Como T es el tiempo por oscilación,

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{kv}{2\pi} = \frac{v}{\lambda} \quad (6)$$

Por tanto, λ es la distancia recorrida en un periodo de tiempo T , ya que

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu}. \quad (7)$$

La longitud de onda tiene unidades de longitud. Por ejemplo, la luz visible comprende desde 3800 Å (violeta) hasta 7800 Å (rojo)

La frecuencia ν tiene unidades de (tiempo)⁻¹. la unidad SI se denomina Hertzio (Hz) ¹

$$1\text{Hz} = 1\text{s}^{-1}. \quad (8)$$

A finales del siglo XIX se conocía el espectro electromagnético hasta el ultravioleta. Los rayos X, de mayor frecuencia y gran poder de penetración e ionización de la materia, fueron descubiertos accidentalmente por Roentgen en 1895, cuando estudiaba la fluorescencia en tubos de rayos catódicos. Los rayos γ , de frecuencia mucho más alta, los descubrió Villard en 1900, como una de las radiaciones emitidas por el radio. Al principio se desconocía el origen de tales radiaciones, de ahí sus nombres (X por desconocidos y gamma por ir a continuación de los rayos alfa y beta emitidos por sales de uranio):

2.3. Cuantización de la luz: fotones

2.3.1. Energía de los fotones

A principios del siglo XX se había demostrado que la radiación electromagnética transporta energía, que puede absorberse o emitirse. Para explicar los procesos de emisión y absorción, Plank y Einstein propusieron que la energía de la radiación está compuesta de unidades (cuantos) indivisibles. En cada proceso elemental sólo puede emitirse o absorberse un cuanto de luz. A cada uno de estos cuantos se les denominó "fotón". El fotón es una partícula que se denota con la letra griega γ . La energía de un fotón es proporcional a la frecuencia de la radiación:

$$E_\gamma = h\nu \quad (9)$$

donde $h = 6,626176 \times 10^{-34}$ J s es la constante de Plank. La energía de una onda electromagnética compuesta por N fotones es la suma de las energías de los fotones individuales.

Ejemplo. Calcular la intensidad de fotones (número de fotones por unidad de tiempo) emitidos por una bombilla de 60 W de luz amarilla ($\lambda = 5000$ Å).

Solución

Frecuencia de la radiación:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{2,998 \times 10^8 \text{m/s}}{5000 \times 10^{-10} \text{m}} = 5,996 \times 10^{14} \text{Hz}$$

Energía de cada fotón:

$$E_\gamma = h\nu = 6,55 \times 10^{-34} \text{Js} \times 5,996 \times 10^{14} \text{Hz} = 39,274 \times 10^{-20} \text{J}$$

Número de fotones por unidad de tiempo:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{E}{h\nu} = \frac{W}{E_\gamma} = \frac{60 \text{W}}{39,274 \times 10^{-20} \text{J}} = 1,528 \times 10^{20} \text{s}^{-1}$$

¹Hertz generó y detectó por primera vez ondas electromagnéticas en 1888

Como vemos, la energía de un fotón expresada en Julios es demasiado pequeña. A escala microscópica es conveniente emplear como unidad de energía el electrón-voltio

$$1\text{eV} = 1,602 \times 10^{-19}\text{J} \quad (10)$$

y múltiplos como el keV (kilo-electrón voltio = 1000 eV), el MeV (mega-eV = 10^6 eV), el GeV (giga-eV = 10^9 eV).

Ejemplo: Determinar la energía en eV de los fotones del ejercicio anterior.

Solución. La energía de los fotones es

$$E = h\nu = 6,55 \times 10^{-34}\text{Js} \times 5,996 \times 10^{14}\text{Hz} = 3,927 \times 10^{-19}\text{J}$$

Expresada en eV:

$$E = \frac{3,927 \times 10^{-19}\text{J}}{1,602 \times 10^{-19}\text{J/eV}} = 2,451\text{eV}$$

Observamos que la energía de la luz visible es del orden de varios eV

Ejemplo Calcular el valor de la constante de Plank en $\text{eV} \times \text{s}$

Solución:

$$h = \frac{6,55 \times 10^{-34}\text{Js}}{1,602 \times 10^{-19}\text{J/eV}} = 4,089 \times 10^{-15}\text{eV} \cdot \text{s}$$

2.3.2. Momento lineal de los fotones y Relatividad

Las propiedades de los fotones pueden estudiarse en experimentos donde se los hace incidir sobre la materia. Se observa así que, aunque los fotones no tienen masa, tienen un momento lineal \vec{p}_γ , cuyo módulo es proporcional a su energía

$$E_\gamma = p_\gamma c \quad (11)$$

Esto es un resultado de la relatividad especial, según la cual la energía y el momento de una partícula con velocidad v son

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (12)$$

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (13)$$

La energía y el momento de una partícula a la velocidad de la luz serían infinitos, lo cual no es físicamente aceptable, a no ser que su masa sea cero, en cuyo caso se obtendría una indeterminación $\frac{0}{0}$, que podría tener un límite finito. Como los fotones se propagan a la velocidad de la luz, deben tener masa nula.

Del sistema de ecuaciones (12) se deduce que en Relatividad no se cumple la relación clásica entre energía y momento $E = \frac{p^2}{2m}$, sino que la correcta relación energía-momento se obtiene calculando la diferencia de cuadrados:

$$E^2 - p^2c^2 = \frac{m^2c^4}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{m^2v^2c^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{m^2c^2(c^2 - v^2)}{\frac{c^2 - v^2}{c^2}} = m^2c^4$$

es decir

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4 \quad (14)$$

$$E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}. \quad (15)$$

En el caso particular de una partícula sin masa (fotón)

$$E = \sqrt{p^2c^2} = pc \quad (16)$$

Nota respecto a unidades De la relación energía-momento (14), o de la relación clásica $E = p^2/2m = \frac{1}{2}pv$, se deduce que el momento tiene unidades de $\frac{\text{energía}}{\text{velocidad}}$. Una unidad adecuada para medir el momento de las partículas subatómicas con energías del orden del eV es

$$\frac{\text{eV}}{c} \quad (17)$$

Esta unidad no recibe ningún nombre especial y tiene la ventaja, en el caso de los fotones, de que los valores numéricos de la energía en eV y del momento en eV/c coinciden.

Ejemplo Calcular la frecuencia, energía y momento lineal de un fotón con longitud de onda de 1000 Å.

Solución:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{m/s}}{1000 \times 10^{-10} \text{m}} = 3 \times 10^{15} \text{Hz}$$

Energía:

$$E = h\nu = 4,089 \times 10^{-15} \text{eVs} \times 3 \times 10^{15} \text{Hz} = 12,27 \text{eV}$$

Momento:

$$p = \frac{E}{c} = 12,27 \text{eV}/c$$

3. Radiación de Materia

La radiación de materia consiste en chorros de partículas submicroscópicas, que pueden ser elementales o compuestas

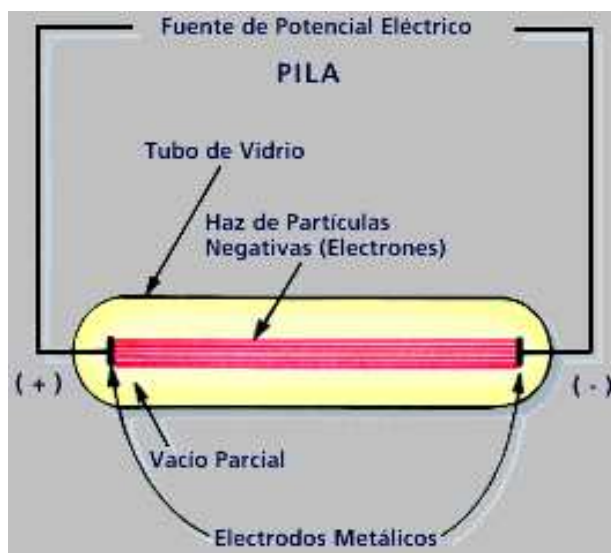


Figura 3: Espectro electromagnético

3.1. Electrones

Las primeras radiaciones de materia conocidas fueron los rayos catódicos, haces de partículas que se desplazan desde el cátodo hasta el ánodo en un tubo de gas a baja presión bajo una diferencia de potencial. Fueron estudiados a finales del siglo XIX.

Esta radiación era independiente del material del cátodo y del gas, producía sombras de objetos y poseía carga eléctrica negativa (al desviarse por un campo eléctrico). J.J. Thomson determinó en 1897 su relación carga/masa. Posteriormente, Millikan determinó en 1909 su carga eléctrica. Se obtuvieron así los siguientes valores

$$q = -e = -1,6021 \times 10^{-19} \text{C} \quad (18)$$

$$m = 9,1091 \times 10^{-31} \text{Kg} \quad (19)$$

A las partículas con estas propiedades se les llamó electrones.

3.2. Unidad microscópica de energía

El electrón-voltio es útil para expresar la energía de una partícula microscópica como el electrón en un tubo de rayos catódicos. Un eV es la energía adquirida por un electrón al ser acelerado por una diferencia de potencial de 1 voltio.

Ejemplo: Encontrar la relación entre el eV y el Julio a partir de la carga del electrón.

$$1\text{eV} = 1,6021 \times 10^{-19} \text{C} \cdot \text{V} = 1,6021 \times 10^{-19} \text{J}$$

3.3. Radiaciones alfa y beta

Estas radiaciones son emitidas espontáneamente por ciertos materiales como el uranio. En 1896 Becquerel, estudiando fenómenos de fluorescencia, observó que las sales de uranio impresionaban las placas fotográficas próximas, aunque estas estuvieran envueltas para no exponerlas a la luz. A este hecho se le considera el descubrimiento de la radiactividad. Rutherford descubrió en 1899 que había dos tipos distintos de radiactividad, que fueron denominados alfa (α) y beta (β). Posteriormente se encontró que los rayos alfa consisten en núcleos de helio. Los rayos beta pueden ser de dos tipos: β^- , que consisten en electrones de mayor energía que los rayos catódicos, y β^+ , que son positrones (partículas con la misma masa que el electrón y carga opuesta).

3.4. Protones

El protón es el núcleo del átomo de hidrógeno, que pudo observarse tras ionizar H en un tubo de rayos catódicos y se le consideró una partícula elemental. Tiene carga igual y opuesta a la del electrón, y su masa es 1836 veces mayor que la de éste. Protones de alta energía pueden emitirse en reacciones nucleares provocadas artificialmente.

3.5. Neutrones

Estas partículas son eléctricamente neutras y por tanto más difíciles de estudiar que los electrones y protones. Fueron descubiertos en los años 30 y son constituyentes fundamentales del núcleo, junto al protón. Su masa es ligeramente mayor que la del protón. En los reactores nucleares se produce gran cantidad de neutrones energéticos como resultado de la fisión nuclear.

3.6. Otros tipos de radiación de materia.

Existen otros muchos tipos de partículas que se descubrieron en los rayos cósmicos que inciden sobre la atmósfera terrestre. Estas partículas también se producen artificialmente al bombardear núcleos con radiación de alta energía o en colisiones entre partículas en un acelerador. Entre estas partículas cabe citar los piones π o los muones μ , con masa intermedia entre la del electrón y la del protón. Por otra parte, los neutrinos ν son abundantes en los rayos cósmicos y que son emitidos espontáneamente junto a la radiación beta. Al no tener carga ni masa son casi indetectables.

3.7. Tabla de partículas

Trataremos con las siguientes partículas “elementales”:

Partícula	Símbolo	mc^2 (MeV)	carga	Antipartícula
electrón	e^-	0.511	-e	positrón, e^+
positrón	e^+	0.511	+e	electrón, e^-
protón	p	938.26	+e	anti-protón, \bar{p}
neutrón	n	939.53	0	anti-neutrón, \bar{n}
neutrino	ν	0	0	anti-neutrino, $\bar{\nu}$
antineutrino	$\bar{\nu}$	0	0	neutrino, ν

- **Carga eléctrica:** todas las partículas de la tabla tienen carga igual u opuesta a la del electrón o nula
- **Masa:** La unidad de masa atómica (uma) se define como la doceava parte de la masa del átomo de carbono-12, muy próxima a la masa del protón

$$1\text{uma} = 1,6604 \times 10^{-27}\text{Kg} \quad (20)$$

La unidad más extendida en física nuclear es el MeV/c^2 , que corresponde a la masa de una partícula cuya energía en reposo equivalente según la expresión relativista, $E = mc^2$, es de $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$. El factor de conversión a unidades de masa atómica es

$$1\text{uma} = 931,502\text{MeV}/c^2 \quad (21)$$

- **Antipartículas** Para cada partícula existe también una antipartícula, con propiedades similares (masa, espín, etc), pero carga eléctrica opuesta (y las cargas asociadas a las interacciones no electromagnéticas que también son opuestas).

Una partícula puede aniquilarse al colisionar con su antipartícula, emitiéndose energía en forma de fotones (u otras partículas).

En el caso del electrón y el positrón, cuando se aniquilan emiten dos fotones de energía $m_e c^2$. Este es un ejemplo de la equivalencia entre masa y energía.

3.8. Conservación de la energía y momento

Cuando dos o más partículas colisionan, intercambian sus energías y momentos, e incluso alguna de ellas puede desaparecer o transformarse en una o varias partículas distintas, o bien se pueden producir partículas adicionales. En estas reacciones se debe conservar la energía y el momento total del sistema.

Recordemos que la energía relativista de una partícula con velocidad v y masa m es

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (22)$$

Se puede obtener una expresión más similar si suponemos que $v \ll c$ o bien $v/c \ll 1$. Entonces podemos tomar los primeros términos en el desarrollo de Taylor

$$\frac{1}{\sqrt{1+x}} = 1 - \frac{x}{2} + \dots \quad (23)$$

y por tanto, para $x = -v^2/c^2$, se tiene

$$E \simeq mc^2 \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} \right) = mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 = mc^2 + T \quad (24)$$

donde

$$T = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m} \quad (25)$$

es la energía cinética clásica. La energía relativista de una partícula es, pues, la suma de su energía cinética y de su energía en reposo $E_0 = mc^2$.

La relación (25) para la energía cinética es sólo válida para velocidades pequeñas. Es natural definir la energía cinética relativista como

$$T = E - mc^2 = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} - mc^2 \quad (26)$$

en donde hemos usado la relación energía-momento

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \quad (27)$$

Una forma directa de saber si estamos en condiciones relativistas es comparando las cantidades pc ó T con mc^2 :

- $pc, T \ll mc^2 \implies$ partícula no relativista; se pueden emplear las expresiones clásicas.
- $pc, T \sim mc^2 \implies$ partícula relativista; deben usarse las expresiones relativistas.
- $pc, T \gg mc^2 \implies$ partícula ultra-relativista; se puede despreciar la energía en reposo $E \simeq pc$ (igual que los fotones)

3.8.1. Ejemplo 1

Calcular el momento lineal de electrones con energía cinética 1 eV, 1 MeV y 1 GeV.

Solución: Puesto que $mc^2=0.511$ MeV, el primer electrón es no relativista, luego

$$p = \sqrt{2mT} = \frac{1}{c}\sqrt{2mc^2T} = \frac{1}{c}\sqrt{2 \times 0,511 \times 10^6\text{eV}} = 1,01\text{keV}/c$$

El segundo electrón es relativista, con energía $E = 1 + 0,511 = 1.511$ MeV y momento $(pc)^2 = E^2 - (mc^2)^2$

$$p = \frac{1}{c}\sqrt{(1,511)^2 - (0,511)^2}\text{MeV} = 1,42\text{MeV}/c$$

El tercer electrón es ultra-relativista

$$p \simeq \frac{E}{c} = 1\text{GeV}/c$$

3.8.2. Ejemplo 2

Calcular el momento lineal de un protón con energía cinética de 1 MeV, mediante las expresiones relativista y no relativista. Comparar los resultados.

Solución: Para el protón $mc^2 = 938.26$ MeV. Como $T=1$ MeV $\ll mc^2$, estamos en régimen no relativista.

$$p = \sqrt{2mT} = \frac{1}{c}\sqrt{2mc^2T} = \frac{1}{c}\sqrt{2 \times 938,26\text{MeV}} = 43,3188\text{MeV}/c,$$

mientras que mediante la fórmula relativista

$$p = \frac{1}{c}\sqrt{E^2 - (mc^2)^2} = \frac{1}{c}\sqrt{939,26^2 - 938,26^2}\text{MeV} = 43,3304\text{MeV}/c$$

El error cometido empleando la fórmula no relativista es

$$\frac{43,3188 - 43,3304}{43,3304} \times 100 = -0,03\%$$

4. Radiaciones ionizantes y estructura de la materia

4.1. Radiaciones ionizantes

Las radiaciones de interés en radiactividad son la radiación electromagnética de alta energía (rayos X y gamma) y las radiaciones de materia emitidas por los núcleos (alfa y beta, así como neutrones). Estas radiaciones penetran en los materiales tienen suficiente energía como para ionizar una gran cantidad de átomos o moléculas, por lo que se denominan **radiaciones ionizantes**. Por tanto la radiación puede alterar la estructura química del material cuando lo atraviesan. El estudio de la interacción entre radiación y materia es un campo de gran interés y, en particular, se aplica a la protección de los organismos biológicos frente a la radiación.

4.2. Estructura microscópica de la materia

Las radiaciones ionizantes tienen su origen en la estructura de la materia a escala atómica y nuclear. Por lo tanto es necesario iniciar el estudio de la radiactividad con una descripción de la estructura del átomo y del núcleo atómico. Un estudio profundo de estos sistemas requeriría las herramientas de la mecánica cuántica, aunque en los próximos capítulos serán descritos de forma elemental.