

Resumen de la asignatura

[http://www.hep.uniovi.es/jfernan/Radiologia/
Javier.Fernandez@cern.ch](http://www.hep.uniovi.es/jfernan/Radiologia/Javier.Fernandez@cern.ch)

- **Enero** (esta semana, de 16 a 17h, aula B07)
 - Radioactividad, radiaciones ionizantes y unidades de medida de radiación
 - el Radón y su cadena de desintegración radioactiva
 - recordatorio de detectores de radiación, en particular Geiger-Müller
- **Febrero**
 - 3+1 Prácticas (3 grupos simultáneos, **mañana del jueves**, 10am, laboratorio Geológicas):
 - medida de la radioactividad con dos GM portátiles usando muestras radioactivas (calibración)
 - estudio de los parámetros que regulan la ventilación en el interior de cuevas y que pueden afectar a la medida de la radiación en su interior, principalmente proveniente de Radón
 - medida de la radiación en el interior de las cuevas de el Llonín, Loja, Candamo y Covaciella. 3 salidas de campo (1 grupo por salida), mañana de los jueves días 28 de Feb., y 7 & 14 de Marzo (Proyecto firmado con Conserjería y Museo Arqueológico)
 - **Evaluación de esta parte:** informes de las 3 prácticas de aula + informe de la medida en las cuevas de Asturias
- Resto del curso: Jorge Pisonero

Radiación No Ionizante

Campos electromagnéticos (entre 0 Hz y 300 GHz) de origen natural o artificial. Características: energía insuficiente para modificar átomos o moléculas, pero con consecuencias para los seres vivos (corrientes eléctricas inducidas, corrientes de contacto, efectos termales, etc.).

Radiación ionizante

Concepto de radiaciones ionizantes:

La energía necesaria para producir la ionización de un átomo se encuentra entre 4 y 25 eV.

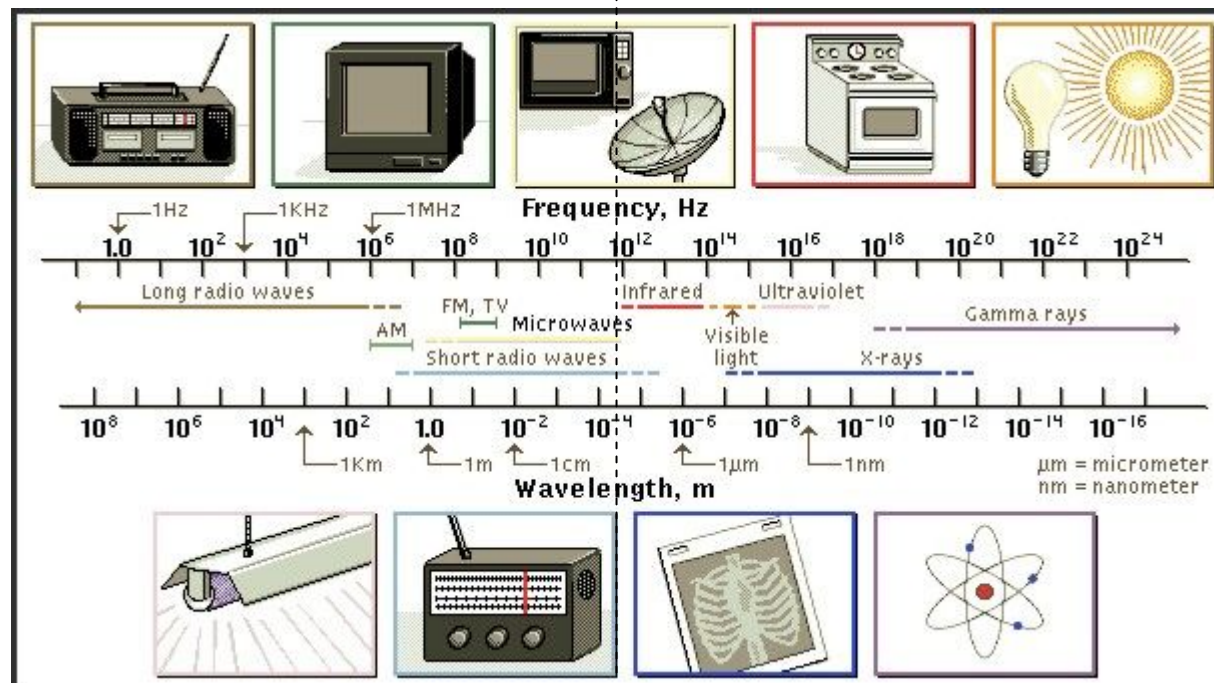
$$E_{\gamma} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1239.8 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{\lambda}$$

Por tanto las radiaciones de longitud de onda inferior a 320 nm serán ionizantes. Sin embargo suele excluirse la región de 10 a 400 nm (UV) debido a su bajo poder de penetración en la mayoría de los materiales.

0 Hz

$\lambda \rightarrow \infty$

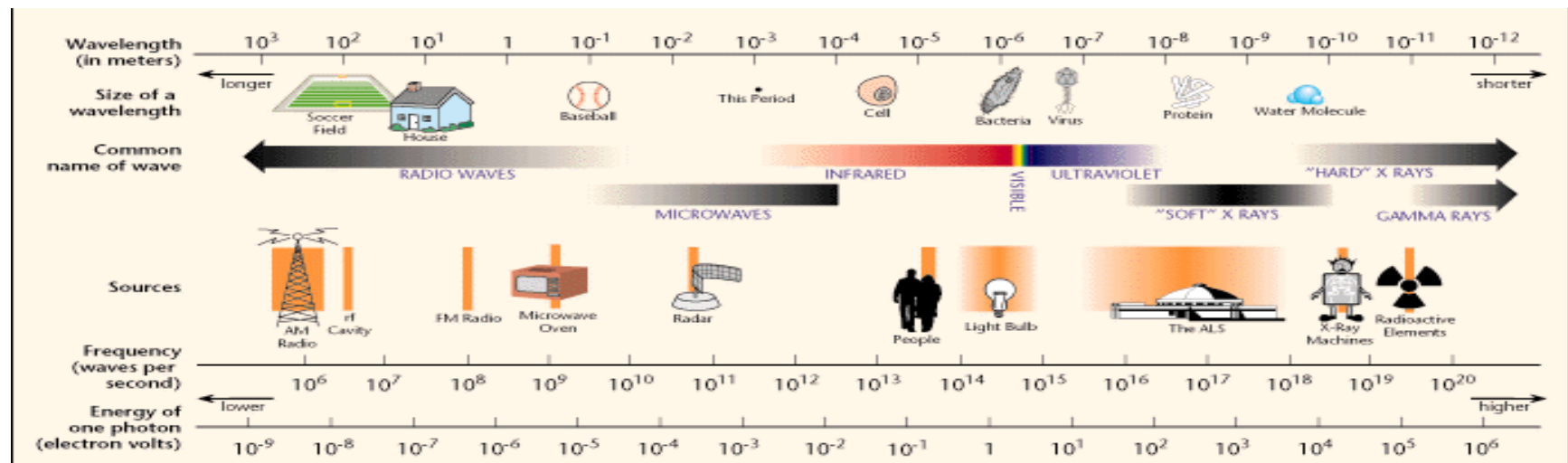
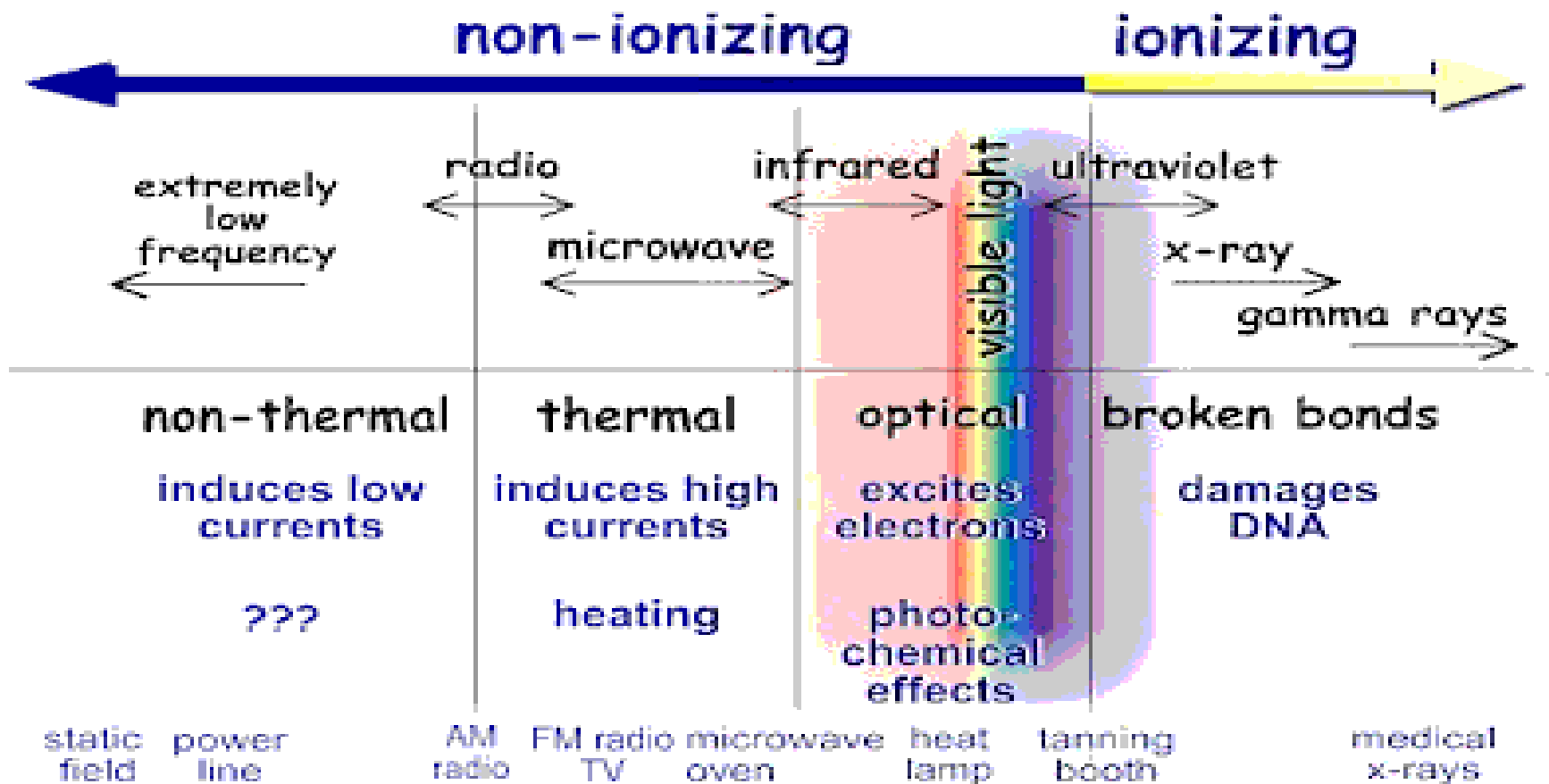
Vacío

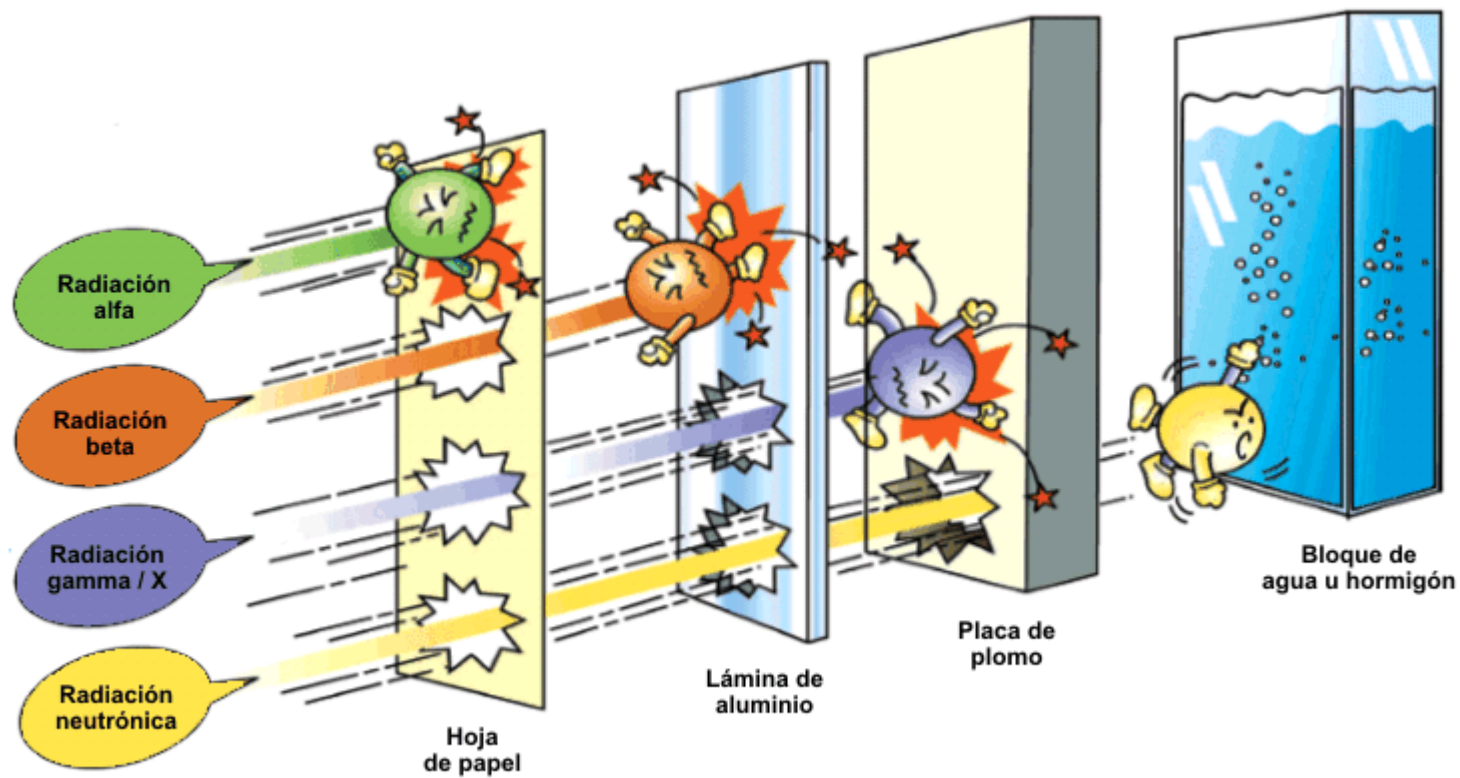


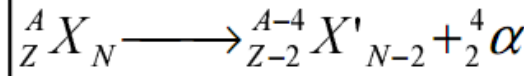
$\nu \rightarrow \infty$ Hz

$\lambda \rightarrow 0$

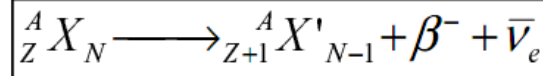
Big Bang?



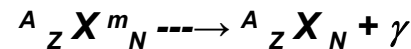




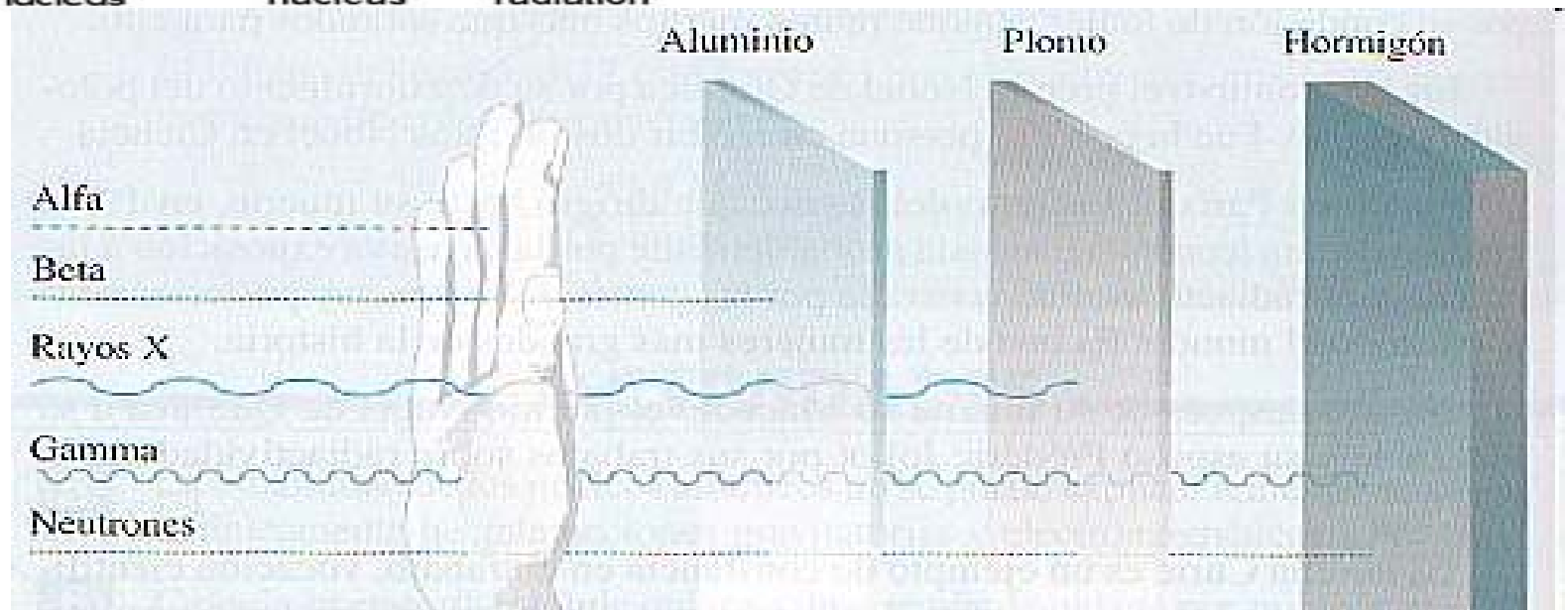
Alpha (α): atom decays into a new atom & emits an alpha particle (2 protons and 2 neutrons: the nucleus of a helium atom)



Beta (β): atom decays into a new atom by changing a neutron into a proton & electron. The fast moving, high energy electron is called a beta particle



Gamma (γ): after α or β decay, surplus energy is sometimes emitted. This is called gamma radiation & has a very high frequency with short wavelength. The atom is not changed



Tipos de radiación ionizante

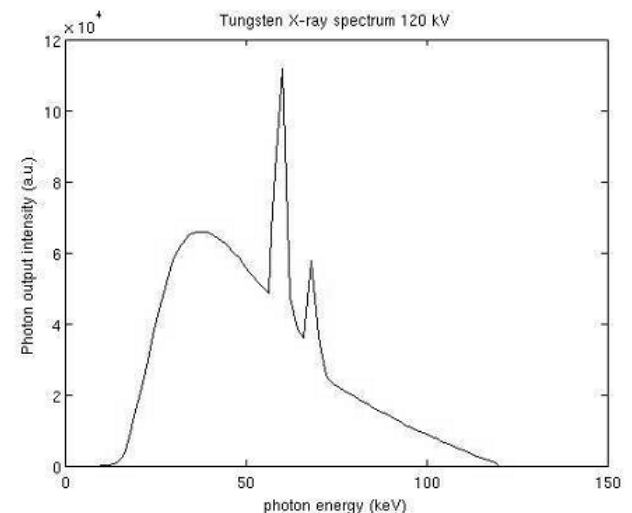
- Rayos- γ : radiación electromagnética emitida en la desintegración nuclear o en la aniquilación materia-antimateria. (0.5 MeV $e^+ e^-$ hasta los 7.1 MeV de ^{16}N)
- Rayos- X: radiación electromagnética emitida por partículas cargadas (electrones) cuando se frenan en un campo de Coulomb (continuos o de frenado o de bremsstrahlung) o bien cuando excitan transiciones electrónicas en átomos (característicos o de fluorescencia).

Rayos X, clasificación

- 0.1 – 20 kV rayos X de baja energía (o blandos)
- 20 – 120 kV rayos X de uso diagnóstico
- 120 – 300 kV rayos X de ortovoltaje (terapia superficial)
- 300 – 1 MV rayos X de energía intermedia (terapia)
- > 1 MV rayos X de Megavoltaje (radioterapia)

No confundir kV con keV!!

Rango energía hasta 50 MeV



Espectro modelo del programa Spektr

- **Electrones rápidos:** (o antielectrones o positrones) Si provienen de la desintegración nuclear se denominan rayos β (+ o -). Si son consecuencia de una colisión de una partícula cargada (i.e. detector gaseoso) se denominan rayos δ . Se obtienen en forma de haces pulsados de aceleradores lineales (linacs) (frec 100 a 400 Hz) (duración pocos μ s) (betatrones, megatrones, klystrons). O bien de aceleradores Van de Graaff. Rango energía hasta 50 **MeV**

- **Partículas cargadas pesadas:** se obtienen mediante la aceleración en ciclotrones, sincrotrones o aceleradores de partículas. Las partículas α también se obtienen por desintegración nuclear.

- Protones (< 300 MeV)
- Deuterones (p+n)
- Tritio (p+2n)
- Partícula α (2p+2n) (núcleo de ^4He) (< 1 GeV)
- Núcleos pesados total o parcialmente ionizados (i.e. ^{12}C) (< 10 GeV)
- Piones (π) como consecuencia de reacciones de fragmentación nuclear (< 100 MeV)



Ciclotrón PET Trace de GE (proton + deuterón)

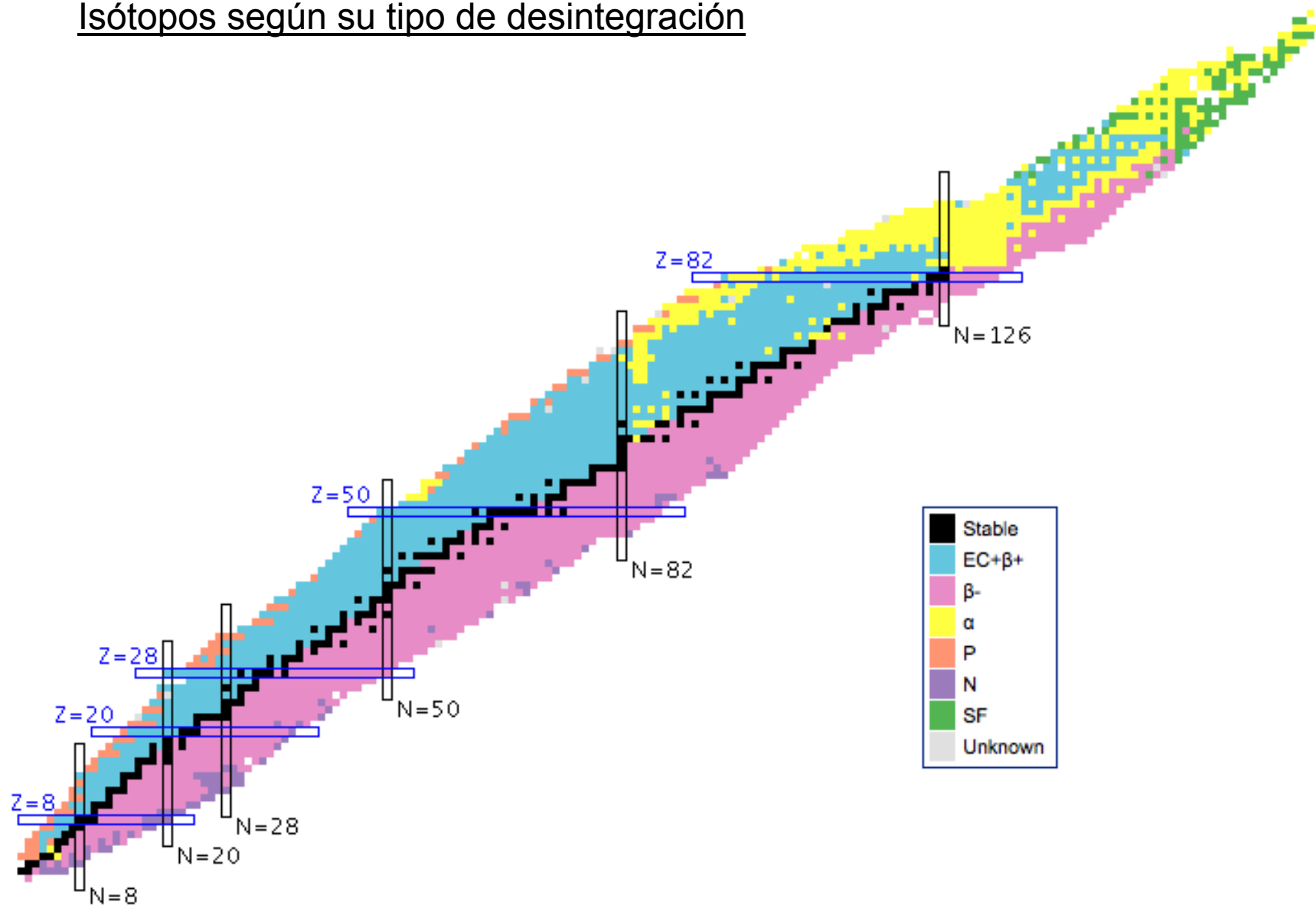
- **Neutrones (n):** partículas eléctricamente neutras producidas en reacciones nucleares (i.e. producción foto-nuclear o fisión).

- térmicos ($E = 0.025$ eV; $v = 2200$ m/s) ($T=273$ K) ($E < 0.4$ eV)

- epitérmicos (0.4 eV < $E < 10$ keV)

- rápidos ($E > 10$ keV) (rango típico $E < 100$ MeV)

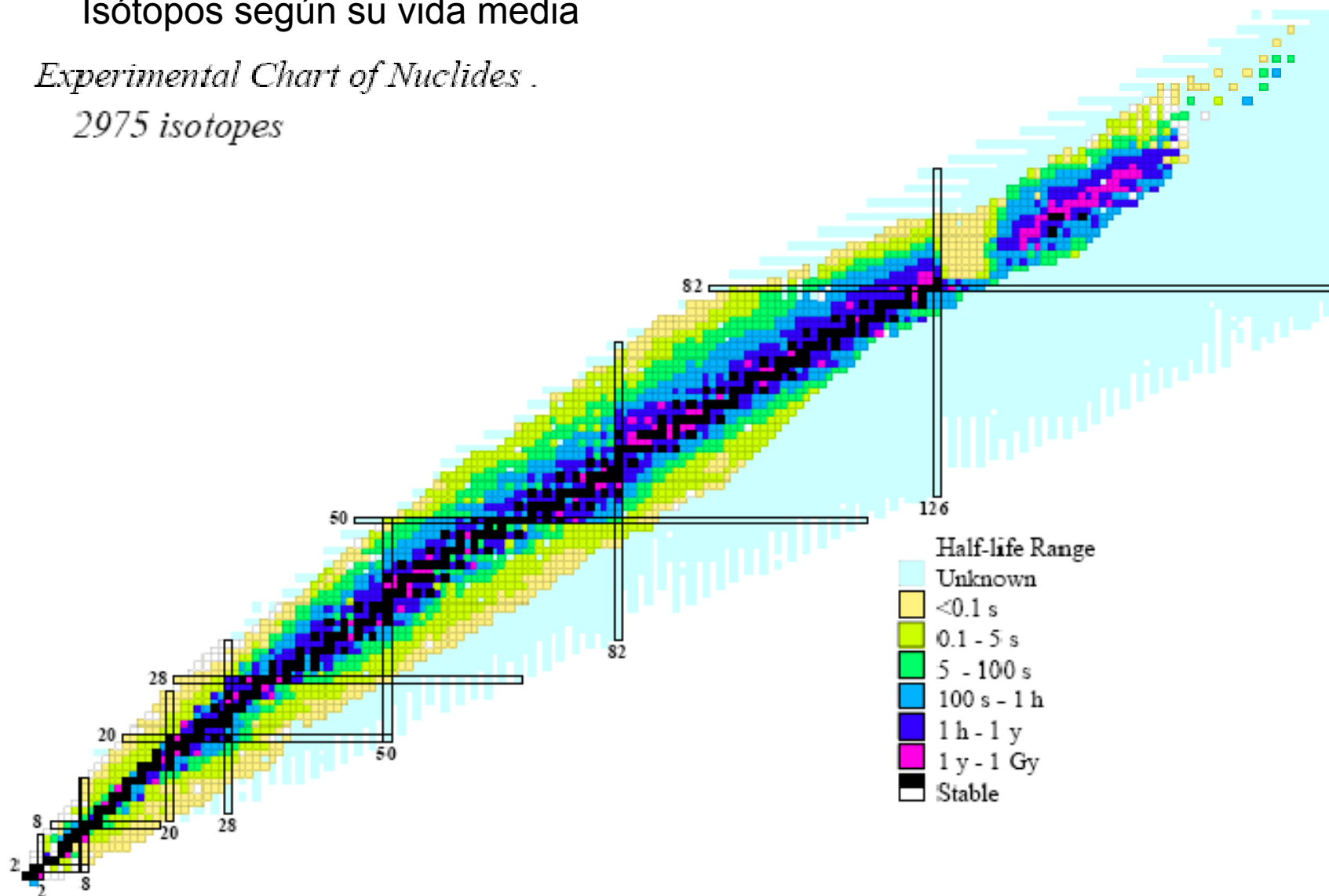
Isótopos según su tipo de desintegración



Isótopos según su vida media

Experimental Chart of Nuclides .

2975 isotopes



- Radioactividad:

Una de las primeras fuentes de radioactividad investigadas es la actividad radioactiva de los radioisótopos.

La actividad de un radioisótopo es el número de núcleos que se desintegran por unidad de tiempo

$$A = \left. \frac{dN}{dt} \right|_{\text{decay}} = -\lambda N$$

Donde λ representa la constante de desintegración. La unidad histórica de actividad es el curie (Ci) definido como $3.7 \cdot 10^{10}$ desintegraciones por segundo (de 1g de ^{226}Ra puro). La unidad del SI es el becquerel (Bq) que corresponde a una desintegración por segundo

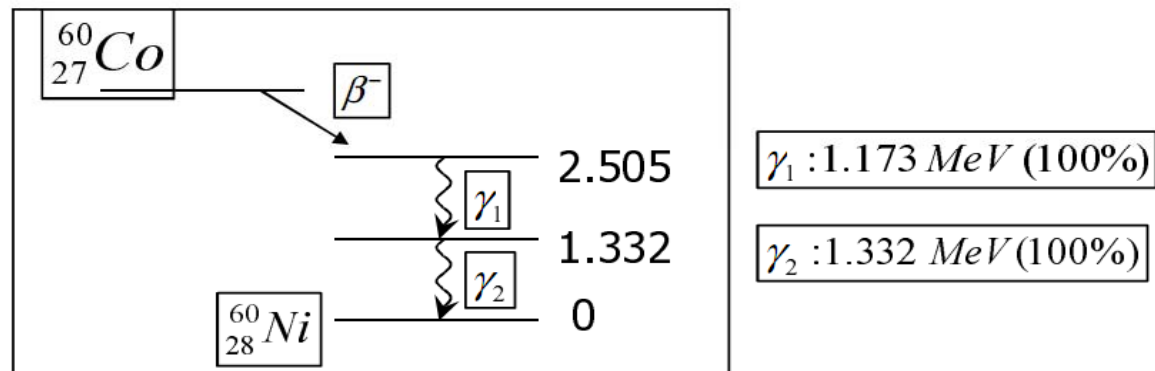
$$1 \text{ Bq} = \text{s}^{-1} = 2.703 \cdot 10^{-11} \text{ Ci}$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

La actividad así definida se refiere al número de núcleos que se desintegran de una muestra. Si existen otras especies que producen estos núcleos como hijos, la ecuación anterior ya no representa la evolución temporal de N

Radioactividad

La actividad de un radioisótopo no es equivalente a la tasa de emisión de radiación de una muestra de éste. Pueden producirse subsecuentes emisiones de radiación (de diferente naturaleza) después de la desintegración, o a su vez la desintegración de un núcleo hijo. Es necesario conocer la tabla completa de los modos de desintegración asociados.



En nuestro caso cada desintegración de un núcleo de Co viene seguida de la emisión de un e^- y de dos fotones. Podría haber fotones extra, si por ejemplo se hubiera emitido un e^+ (511 keV). Ver LL

<http://www.nndc.bnl.gov/nudat2>

<http://ie.lbl.gov/toi/nucSearch.asp>

Radioactividad

La actividad específica de un radioisótopo se define como la actividad por unidad de masa de una muestra de radioisótopo:

$$A_{\text{específica}} = \frac{\text{actividad}}{\text{masa}} = \frac{\lambda N}{m}$$

La actividad específica de una muestra es una medida del grado de pureza con la que se obtuvo. Lo normal es que en una muestra haya una importante fracción de isótopos estables del mismo elemento. Si la muestra es pura (carrier free) entonces

$$A_{\text{específica}} = \frac{\text{actividad}}{\text{masa}} = \frac{\lambda N}{m} = \frac{\lambda N}{N \text{ Pat} / N_{\text{Av}}} = \frac{\lambda N_{\text{Av}}}{\text{Pat}}$$

Pat es el peso de un mol de átomos

N_{Av} es el número de Avogadro ($6.023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

Radioactividad

La actividad de un radioisótopo nos lleva una evolución temporal exponencial de la población de núcleos

$$\boxed{-\frac{dN}{dt} = \lambda N} \quad \longrightarrow \quad \boxed{N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)}$$

Esta fórmula supone que no existe ningún mecanismo de repoblación del núcleo padre.

Definimos vida media (τ) como el valor promedio de tiempo necesario para que una población de N_0 núcleos radiactivos decaigan a un valor $1/e$ del número inicial.

$$\boxed{\frac{N(\tau)}{N_0} = \frac{1}{e} = 0.3679 = \exp(-\lambda \tau)}$$

Por lo tanto obtenemos

$$\boxed{\lambda \tau = 1; \quad \tau = \frac{1}{\lambda}}$$

La vida media representa el valor esperado del tiempo de desintegración de un núcleo.

Radioactividad

La actividad de un radioisótopo nos lleva una evolución temporal exponencial de su actividad asociada

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$



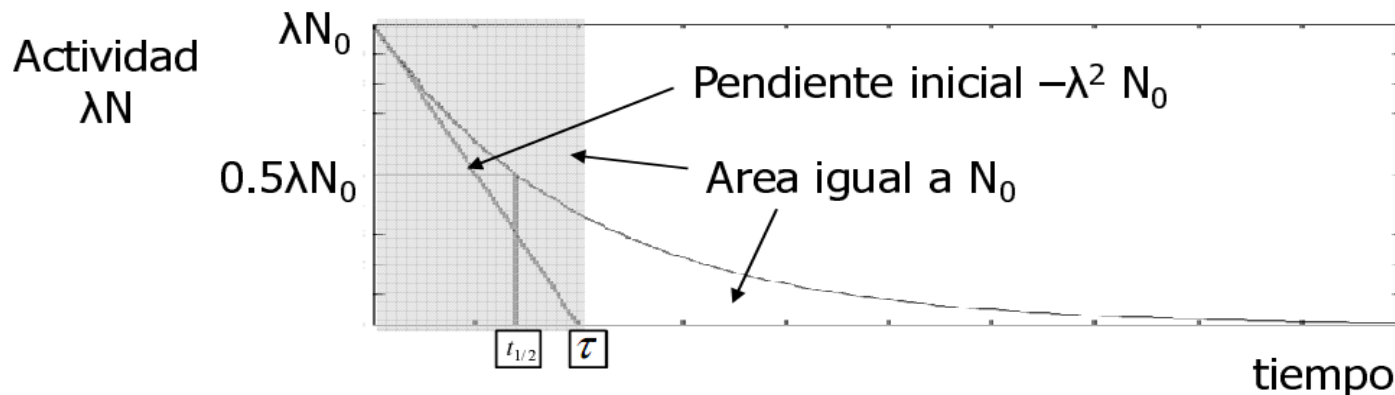
$$\frac{d(\lambda N)}{dt} = \frac{d[\lambda N_0 \exp(-\lambda t)]}{dt} = -\lambda^2 N$$

$$A = \lambda N; \quad \frac{dA}{dt} = -\lambda A$$

El período de semidesintegración $t_{1/2}$ se define como el tiempo necesario para que una población inicial de N_0 radioisótopos se reduzca a la mitad

$$\frac{N(t_{1/2})}{N_0} = \frac{1}{2} = 0.5 = \exp(-\lambda t_{1/2})$$

$$\lambda t_{1/2} = \ln(2) = 0.6931; \quad t_{1/2} = \frac{0.6931}{\lambda} = 0.6931 \tau$$



Radioactividad

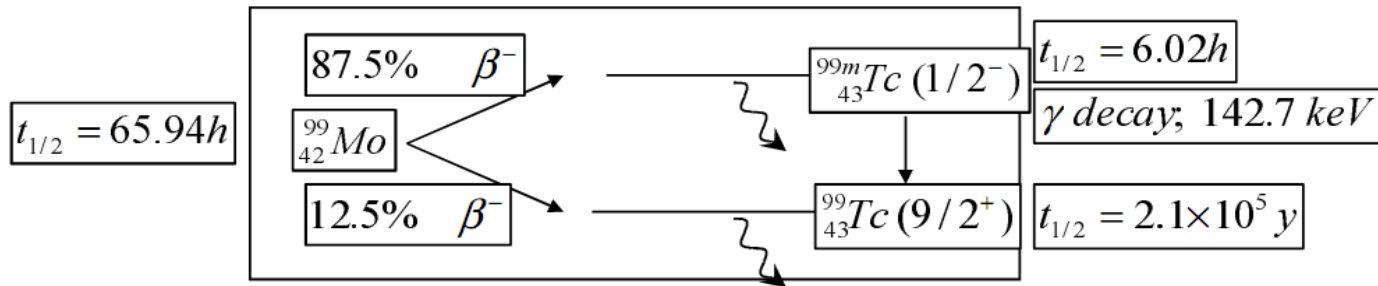
Constantes de desintegración parciales.

Un radioisótopo puede tener diferentes modos de desintegración a varios núcleos hijo. Entonces la constante de desintegración se puede escribir como suma de constantes de desintegración

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad \longrightarrow \quad \lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \dots$$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_3} + \frac{1}{\tau_4} + \dots$$

A las ctes se λ_i denomina ctes de desintegración parciales.

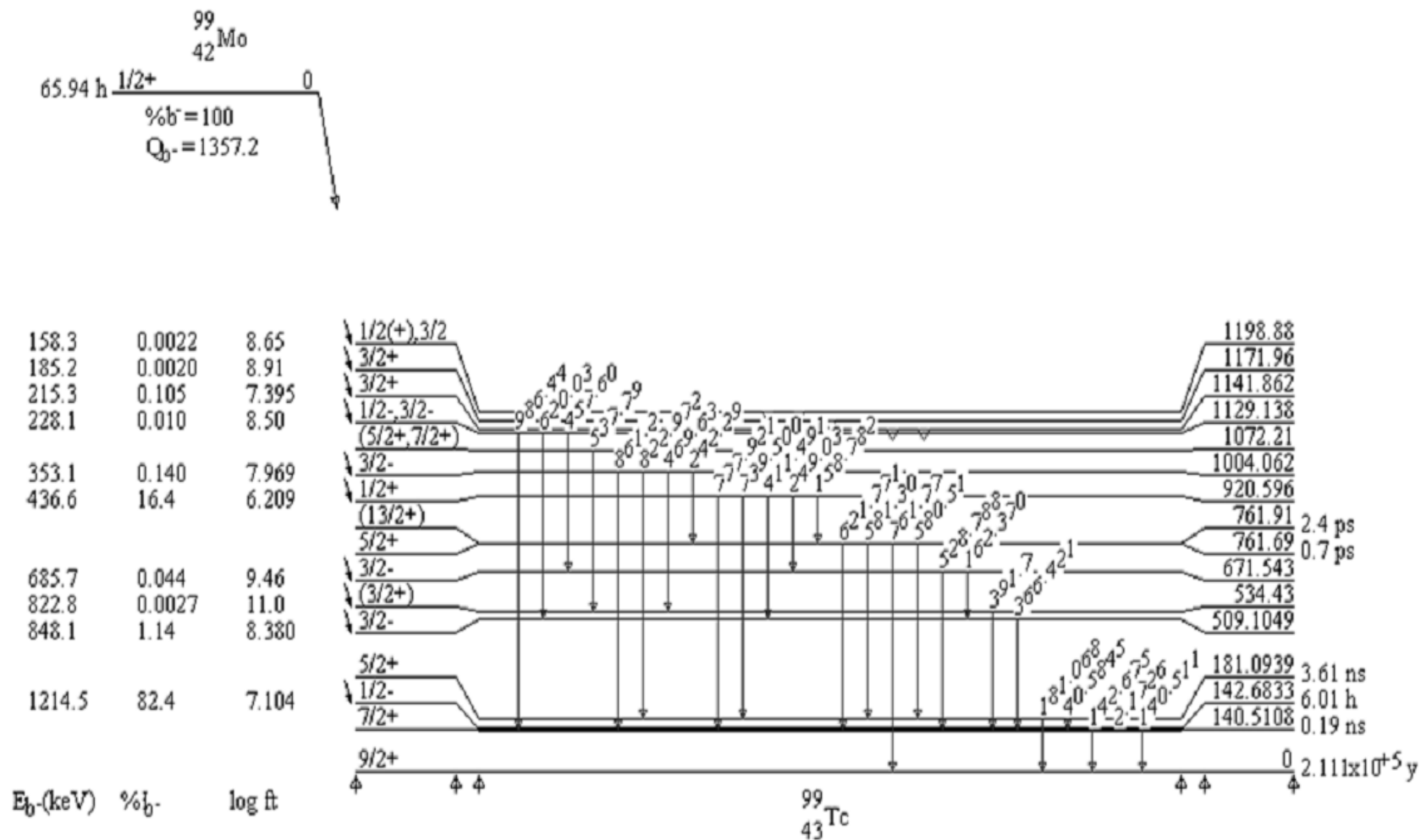


A los porcentajes de ramificación (86%, 14%) (branching ratios) se puede asociar el cálculo de las constantes de desintegración y período de semidesintegración

$$\lambda_1(^{99m}_{43}\text{Tc}) = \frac{0.693}{65.94h} \times 0.875$$

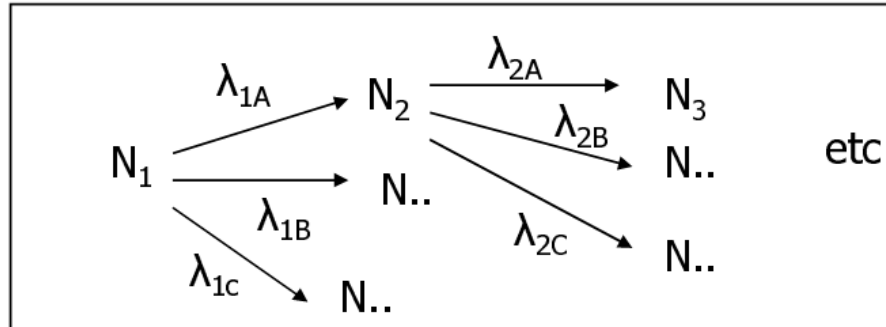
$$\lambda_2(^{99}_{43}\text{Tc}) = \frac{0.693}{65.94h} \times 0.125$$

Ejemplo de desintegración radiactiva del $^{99}_{42}\text{Mo}$



Radioactividad

Producción de radioisótopos. Núcleos hijo. Equilibrios padre-hijo



$$\lambda_1 = \lambda_{1A} + \lambda_{1B} + \lambda_{1C} + \dots$$

$$\lambda_2 = \lambda_{2A} + \lambda_{2B} + \lambda_{2C} + \dots$$

$$(1) \quad \frac{dN_2}{dt} = \lambda_{1A}N_1 - \lambda_2N_2$$

$$N_1 = (N_1)_0 e^{-\lambda_1 t}$$

Si consideramos que

$$N_2 = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t}$$

Sustituyendo en la ecuación (1) con la condición $(N_2)_0 = 0$ se obtiene

$$N_2 = (N_1)_0 \frac{\lambda_{1A}}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

El cociente de actividades del padre frente al hijo será

$$\frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = \frac{\lambda_{1A}}{\lambda_1} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t})$$

Si N_2 es el único modo de decaer

$$\frac{\lambda_{1A}}{\lambda_1} = 1$$

Radioactividad

Producción de radioisótopos. Núcleos hijo. Equilibrios padre-hijo

En la relación de producción de un radioisótopo hijo la actividad alcanza un máximo cuando

$$\frac{d(\lambda_2 N_2)}{dt} = 0 = -\lambda_1 e^{-\lambda_1 t_m} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t_m}$$

De donde se obtiene el tiempo de máximo (obsérvese que es válido aunque $\lambda_2 < \lambda_1$)

En el caso $\lambda_{1A} = \lambda_1$ entonces t_m coincide con el momento de igual actividad padre-hijo $\lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1$

$$t_m = \frac{\ln(\lambda_2 / \lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

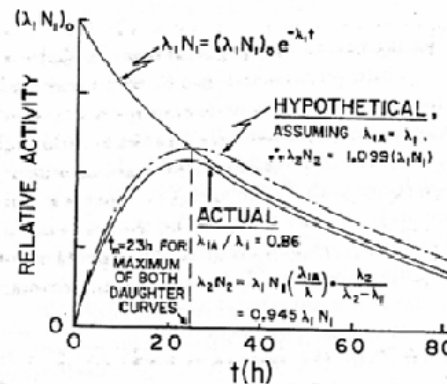


FIGURE 6.3. Example of transient equilibrium: Activity vs. time for ^{99m}Tc as parent and ^{99}Tc as daughter. $\lambda_1 = 0.0104 \text{ h}^{-1}$, $\lambda_2 = 0.115 \text{ h}^{-1}$, hence $\lambda_2 > \lambda_1$. The activity of ^{99}Tc is equal to $(\lambda_1 N_1)_0$ at $t = 0$, and $(\lambda_2 N_2)_0 = 0$ also. Both actual ($\lambda_1 / \lambda_2 = 0.86$) and hypothetical (assuming $\lambda_1 / \lambda_2 = 1$) curves of daughter activity are shown, the latter dashed.

Radioactividad

$$1) \lambda_2 < \lambda_1 \quad \frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = \frac{\lambda_{1A}}{\lambda_1} \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t} - 1)$$

El cociente de actividades crece indefinidamente con t (se cruzan!)

$$2) \lambda_1 < \lambda_2 \quad \frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = \frac{\lambda_{1A}}{\lambda_1} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t})$$

El cociente de actividades tiende a un valor límite para $t \gg t_m$

$$\frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} \approx \frac{\lambda_{1A}}{\lambda_1} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

La situación se conoce como equilibrio transitorio, ya que la actividad del hijo disminuye en una proporción fija con la actividad del padre. Cuando la actividad de padre e hijo son iguales esto se conoce como equilibrio secular. En nuestro caso se da si

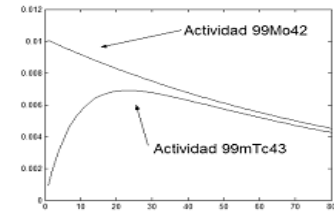
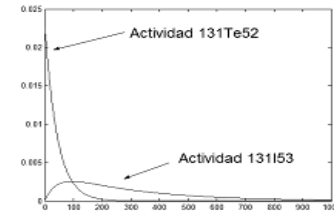
$$\frac{\lambda_1}{\lambda_{1A}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

$$3) \lambda_1 = \lambda_{1A} \text{ y } \lambda_1 \ll \lambda_2$$

Entonces para tiempos grandes $t \gg 1/\lambda_2$ el cociente de actividades

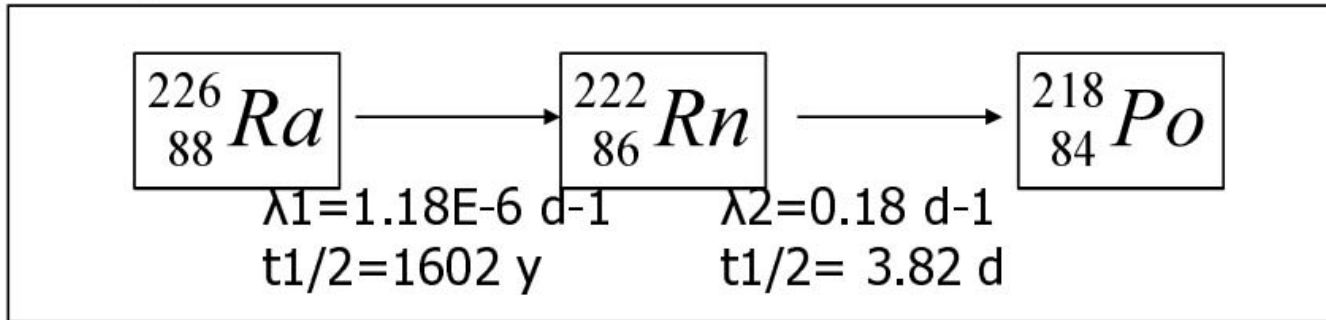
$$\frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} \approx \frac{\lambda_{1A}}{\lambda_1} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \approx 1$$

Equilibrio secular



Radioactividad

Ejemplo de equilibrio secular



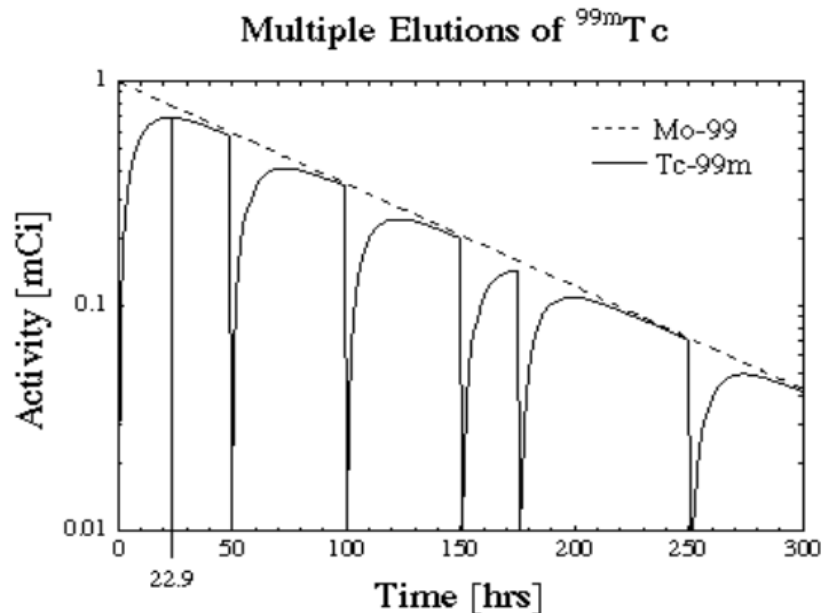
La actividad tiende a una constante de modo que

$$\frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_1} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = 1.000007$$

La actividad debida a la desintegración de radón estará asociada a la actividad debida al radio en proporción de igualdad.

Radioactividad

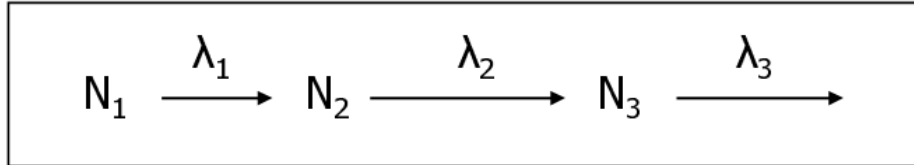
En la práctica en un generador las extracciones producen la supresión de la actividad del radioisótopo hijo. En el caso del $\text{Tc}^{99\text{m}}$ podemos observar cómo la actividad del hijo tiende a recuperar el equilibrio transitorio con la actividad del Mo^{99}



$$\frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = \frac{\lambda_{1A}}{\lambda_1} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)(t - t_{ex})})$$

Radioactividad

Si consideramos una reacción en cadena de desintegración (single daughter)



Las ecuaciones diferenciales para cada población N_i serán

$$\frac{dN_i}{dt} = \lambda_{i-1}N_{i-1} - \lambda_i N_i \quad i=1,2,3,\dots$$

Si consideramos que en el instante inicial sólo existe el radioisótopo N_1 , una solución general está dada por las ecuaciones de Bateman, donde la actividad del isótopo i -ésimo está caracterizada por las constantes de desintegración de sus predecesores

$$\lambda_i N_i = N_1(t=0) \times \sum_{m=1}^i C_m e^{-\lambda_m t}$$

$$C_m = \frac{\prod_{k=1}^i \lambda_k}{\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^i (\lambda_k - \lambda_m)} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_i}{(\lambda_1 - \lambda_m)(\lambda_2 - \lambda_m) \dots (\lambda_i - \lambda_m)}$$

Donde es posible el equilibrio secular cuando

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_i N_i$$

Resumen de unidades (I)

- **Activity (A)** is the transformation (disintegration) rate of a radioactive substance
 - Curie (Ci) ; $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
 - **Becquerel (Bq)** - S.I. Unit ; $1 \text{ Bq} = 1 \text{ disintegration per second (dps)} = 27 \text{ pCi}$
- **Fluence (Φ)** : $1/\text{m}^2$ The fluence is the quotient of dN by da , where dN is the number of particles incident upon a small sphere of cross-sectional area da . $\Phi = dN/da$. In dosimetric calculations, fluence is frequently expressed in terms of the lengths of the particle trajectories. It can be shown that the fluence, Φ , is given by $\Phi = dl/dV$, where dl is the sum of the particle trajectory lengths in the volume dV
- **Absorbed dose (D)** is a physical quantity which represents the energy imparted by ionizing radiation in a volume element of a specified material divided by the mass of this volume element. For a tissue T, we have D_T
 - Rad = 100 ergios / 1g
 - **Gray (Gy)** - SI Unit $1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule per kilogram}$ $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rads}$
- **Kerma, K** (unit: gray): Kerma “Kinetic Energy Released for Mass unit”), is the sum of the initial kinetic energies of all charged particles liberated by indirectly ionizing radiation in a volume element of the specified material divided by the mass of this volume element.
- **Linear energy transfer, L or LET** (unit: J/m, often given in keV/ μm): The linear energy transfer is the mean energy, dE , lost by a charged particle owing to collisions with electrons in traversing a distance dl in matter. **Low-LET radiation**: x rays and gamma rays (accompanied by charged particles due to interactions with the surrounding medium) or light charged particles such as electrons that produce sparse ionizing events far apart at a molecular scale ($L < 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$). **High-LET radiation**: neutrons and heavy charged particles that produce ionizing events densely spaced at a molecular scale ($L > 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$).

Resumen de unidades (II)

- **Dose Equivalent (H)** may be regarded as an expression of dose in terms of its biological effect. DE takes account of the fact that, for a given absorbed dose, such as 1 Gray, a radiation of one type and/or energy may give rise to a greater biological effect than a radiation of another type and/or energy.

$H_T = \text{Absorbed Dose} \times \text{Quality Factor } (W_R)$, W_R depends on the type of radiation (radiation weighting factors):

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

- W_R is used to compare the biological damage producing potential of various types of radiation, given equal absorbed doses. The effectiveness of radiation in producing damage is related to the energy loss of the radiation per unit path length. The term used to express this is Linear Energy transfer (LET). Generally, the greater the LET in tissue, the more effective the radiation is in producing damage.

- rem (Roentgen Equivalent Man)
- **SIEVERT (Sv)** - S.I. Unit 1 Sv = 100 rems

$$1\text{Sv (J/Kg)} = w_R \cdot 1\text{Gy (J/Kg)}$$

Radiation type	w_R
Photons, electrons and muons	1
Neutrons, $E_n < 1 \text{ MeV}$	$2.5 + 18.2 \times \exp[-(\ln E_n)^2/6]$
$1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV}$	$5.0 + 17.0 \times \exp[-(\ln(2E_n))^2/6]$
$E_n > 50 \text{ MeV}$	$2.5 + 3.25 \times \exp[-(\ln(0.04E_n))^2/6]$
Protons and charged pions	2
Alpha particles, fission fragments, heavy ions	20

Resumen de unidades (III)

- **Effective dose (E). Unit: Sievert (Sv).** The sum of the equivalent doses, weighted by the tissue weighting factors w_T of several organs and tissues T of the body that are considered to be most sensitive:

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T = \sum_T W_T \sum_R W_R \cdot D_{T,R}$$

Tissue type	W_T (each)	W_T (group)
Bone marrow, colon, lung, stomach, breast, remaining tissues	0.12	0.72
Gonads	0.08	0.08
Bladder, oesophagus, liver, thyroid	0.04	0.16
Bone surface, brain, salivary glands, skin	0.01	0.04
total		1.00

Organism	relative weight
Viruses, bacteria, protozoans	0.03 – 0.0003
Insects	0.1 – 0.002
Molluscs	0.06 – 0.006
Plants	2 – 0.02
Fish	0.75 – 0.03
Amphibians	0.4 – 0.14
Reptiles	1 – 0.075
Birds	0.6 – 0.15

- **Exposure** is a quantity that expresses the ability of radiation to ionize air and thereby create electric charges which can be collected and measured
 - Roentgen (R) 1 R = 2.58×10^{-4} C/kg of air
 - 1 R = 0.01 Sv

NB: Exposure is only defined for X-ray and gamma in air

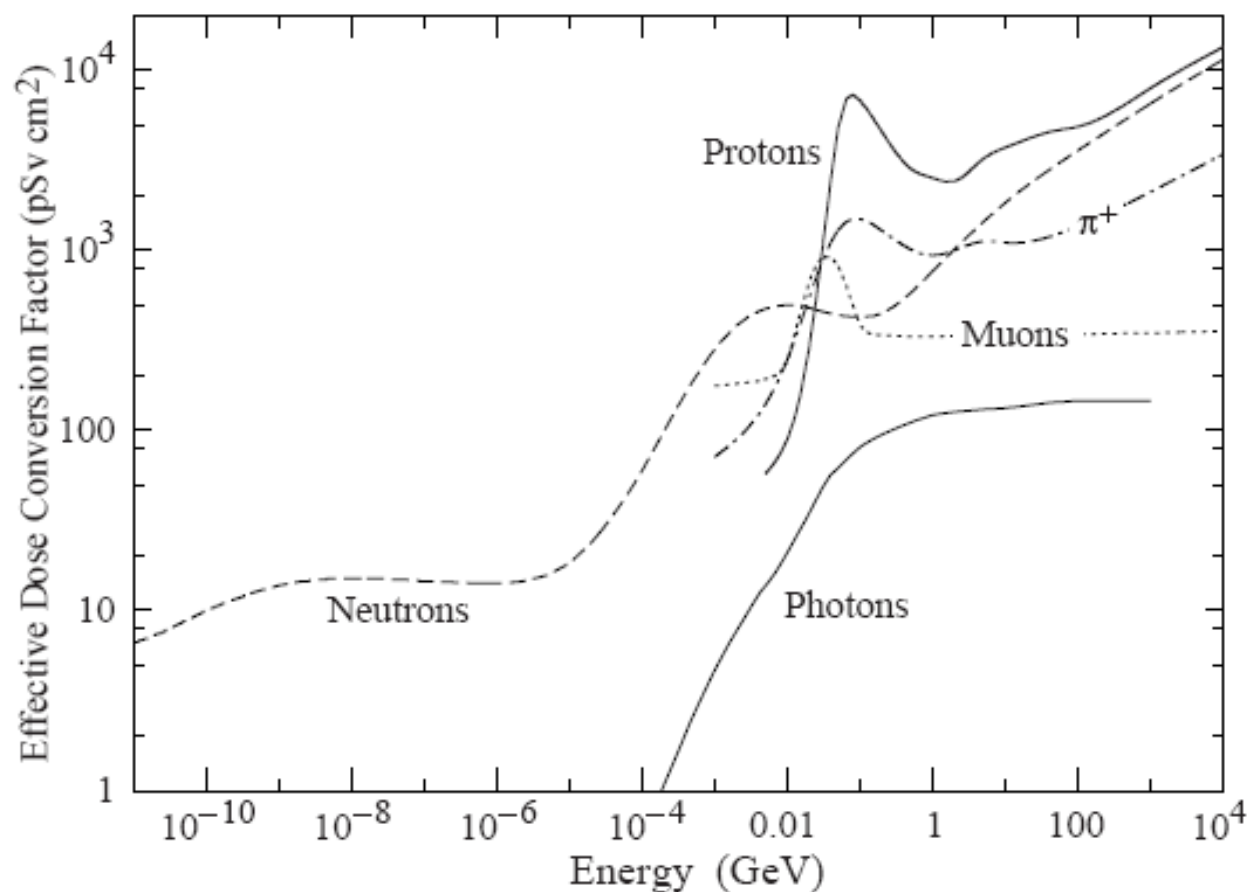


Figure 33.1: Fluence to effective dose conversion coefficients for anterior-posterior irradiation and various particles [3].

Symptoms frameworks

- **Symptoms of acute radiation** (dose received within one day):
 - 0 – 0.25 Sv (0 – 250 mSv): None
 - 0.25 – 1 Sv (250 – 1000 mSv): Some people feel nausea and loss of appetite; bone marrow, lymph nodes, spleen damaged.
 - 1 – 3 Sv (1000 – 3000 mSv): Mild to severe nausea, loss of appetite, infection; more severe bone marrow, lymph node, spleen damage; recovery probable, not assured.
 - 3 – 6 Sv (3000 – 6000 mSv): Severe nausea, loss of appetite; hemorrhaging, infection, diarrhea, peeling of skin, sterility; death if untreated.
 - 6 – 10 Sv (6000 – 10000 mSv): Above symptoms plus central nervous system impairment; death expected.
 - Above 10 Sv (10000 mSv): Incapacitation and death.
- **Dose examples**
 - Dental radiography: 0.005 mSv
 - Mammogram — Single Exposure, Equipment Mean: 2 mSv
 - Mammogram — Procedural Mean, Equipment Variation: 4 mSv - 5 mSv
 - Brain CT scan: 0.8–5 mSv
 - Chest CT scan: 6–18 mSv
 - Gastrointestinal series X-ray investigation: 14 mSv
 - International Commission on Radiological Protection recommended limit for volunteers averting major nuclear escalation: 500 mSv
 - International Commission on Radiological Protection recommended limit for volunteers rescuing lives or preventing serious injuries: 1000 mSv[10]
- **Hourly dose examples**
 - Average individual background radiation dose: $0.23\mu\text{Sv/h}$ (0.00023mSv/h); $0.17\mu\text{Sv/h}$ for Australians, $0.34\mu\text{Sv/h}$ for Americans
 - Highest reported level during Fukushima accident: 1000 mSv/h reported as the level at a pool of water in the turbine room of reactor two.

- **Yearly dose examples**

- Maximum acceptable dose for the public from any man made facility: 1 mSv/year
- Dose from living near a nuclear power station: 0.0001–0.01 mSv/year
- Dose from living near a coal-fired power station: 0.0003 mSv/year
- Dose from sleeping next to a human for 8 hours every night: 0.02 mSv/yr
- Dose from cosmic radiation (from sky) at sea level: 0.24 mSv/year
- Dose from terrestrial radiation (from ground): 0.28 mSv/year
- Dose from natural radiation in the human body: 0.40 mSv/year
- Dose from standing in front of the granite of the United States Capitol building: 0.85 mSv/year
- Average individual background radiation dose: 2 mSv/year; 1.5 mSv/year for Australians, 3.0 mSv/year for Americans
- Dose from atmospheric sources (mostly radon): 2 mSv/year
- Total average radiation dose for Americans: 6.2 mSv/year
- New York-Tokyo flights for airline crew: 9 mSv/year
- Dose from smoking 30 cigarettes a day: 13-60 mSv/year
- Current average dose limit for nuclear workers: 20 mSv/year
- Dose from background radiation in parts of Iran, India and Europe: 50 mSv/year
- Dose limit applied to workers during Fukushima emergency: 250 mSv/year

- **Dose limit examples**

- Criterion for relocation after Chernobyl disaster: 350 mSv/lifetime
- In most countries the current maximum permissible dose to radiation workers is 20 mSv per year averaged over five years, with a maximum of 50 mSv in any one year.
- This is over and above background exposure, and excludes medical exposure. The value originates from the International Commission on Radiological Protection (ICRP), and is coupled with the requirement to keep exposure as low as reasonably achievable (ALARA) – taking into account social and economic factors.
- Public dose limits for exposure from uranium mining or nuclear plants are usually set at 1 mSv/yr above background.

Tabla 6. Límites de dosis recomendados en situaciones de exposición planificadas^a

Tipo de límite	Ocupacional	Público
Dosis efectiva	20 mSv por año promediada en periodos definidos de 5 años ^e	1 mSv en un año ^f
Dosis equivalente anual en:		
Cristalino ^b	150 mSv	15 mSv
Piel ^{c,d}	500 mSv	50 mSv
Manos y pies	500 mSv	---

^a Los límites de dosis efectivas son para la suma de las dosis efectivas de relevancia procedentes de exposiciones externas en el periodo de tiempo especificado y la dosis efectiva comprometida de la incorporación de radionucleidos en el mismo periodo. Para adultos, la dosis efectiva comprometida se calcula para un periodo de 50 años tras la incorporación, mientras que para niños se calcula para el periodo de hasta 70 años de edad.

^b Este límite está actualmente siendo revisado por un Grupo de Trabajo de la ICRP.

^c La limitación de dosis efectiva proporciona una protección suficiente para la piel frente a efectos estocásticos.

^d Promediado en un área de 1 cm² de piel, independientemente del área expuesta.

^e Con la condición adicional de que la dosis efectiva no debe exceder los 50 mSv en ninguno de los años individuales. En el caso de la exposición ocupacional de mujeres embarazadas se aplican restricciones adicionales.

^f En circunstancias especiales, se puede permitir un nivel superior de dosis efectiva en un único año, a condición de que la media durante 5 años no exceda 1 mSv por año.

$$1 \text{ año} = 365 * 24\text{h} = 8760\text{h}$$

$$20\text{mSv/año} * 1\text{año}/8760\text{h} = 2.3\mu\text{Sv/h}$$

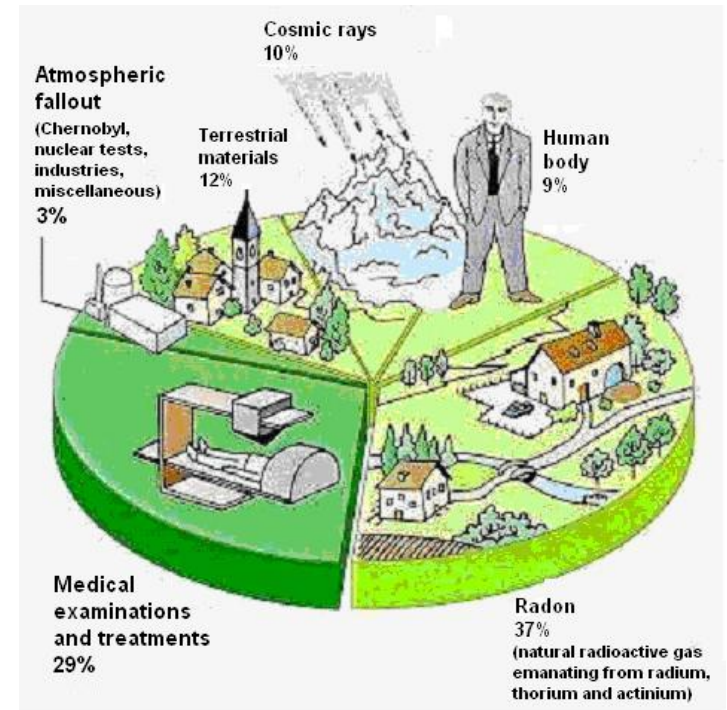
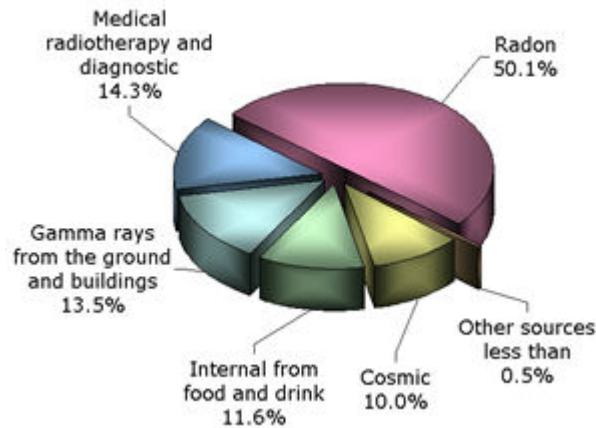
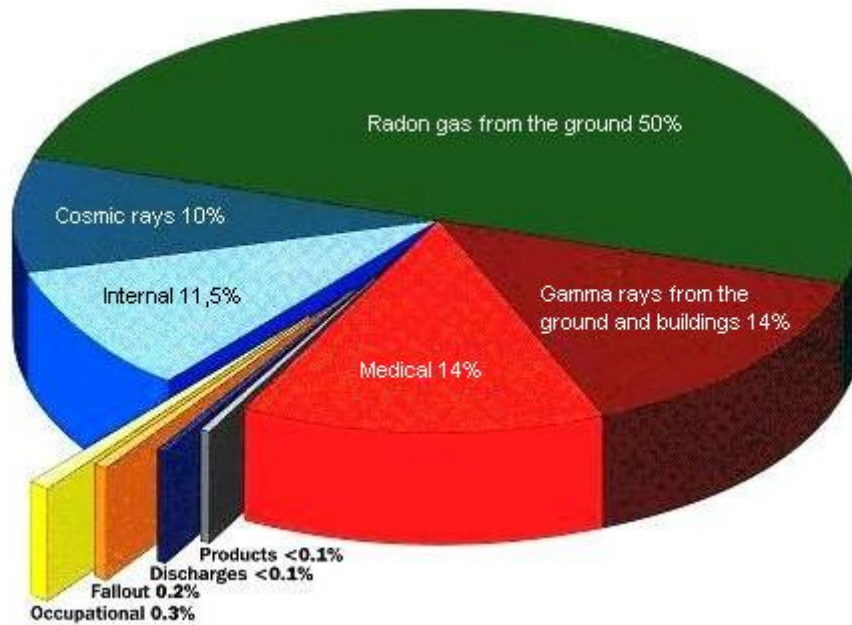
$$1\text{mSv/año} * 1\text{año}/8760\text{h} = 0.115\mu\text{Sv/h}$$

Fuente:

<http://www.icrp.org>

<http://www.icru.org>

Origen de la radiación (I)



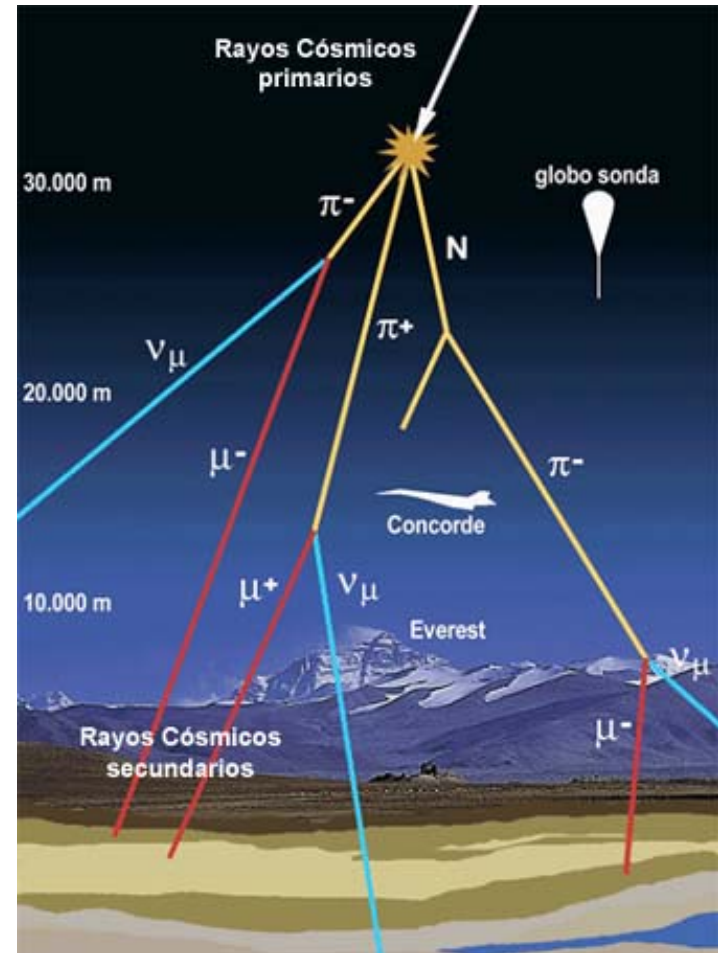
Origen de la radiación (II)

- **Natural terrestrial background radiation:**

- On a worldwide average, the annual whole-body dose equivalent due to all sources of natural background radiation ranges from 1.0 to 13 mSv with an **annual average of 2.4 mSv (0.2 μ Sv/h)**.
- In certain areas values **up to 50 mSv** have been measured (^{40}K , U and Th decay series)
- A large fraction (typically more than 50%) originate from inhaled natural radioactivity, mostly radon and radon daughters.
- The latter can vary by more than one order of magnitude: it is 0.1–0.2 mSv in open areas, 2 mSv on average in a house and more than 20 mSv in poorly ventilated mines.

- **Cosmic ray background radiation:**

- At sea level, the whole-body dose equivalent due to cosmic ray background radiation is dominated by muons; at higher altitudes also nucleons contribute.
- Dose equivalent rates range from **less than 0.1 μ Sv/h at sea level** to a few μ Sv/h at aircraft altitudes.



Media Terrestre Natural: 0.2 μ Sv/h ; Rn > 0.1 μ Sv/h

Cosmic rays:

Primary cosmic rays are about 90% protons, 9% alpha particles, and the rest heavier nuclei. They are totally attenuated within the first few hg/cm^2 of atmospheric thickness. At sea level secondary particles ($\pi^\pm$: p : $e^\pm$: n : $\pm$) are observed with relative intensities (1:13:340:480:1420) for $E < 1 \text{ GeV}$. All but the muon and the neutron components are readily absorbed by overburden such as building ceilings and passive shielding. Only if there is very little overburden (less than a few $\times 10 \text{ g}/\text{cm}^2$ in rock) do pions and protons need to be considered when estimating the production rate of cosmogenic radioactivity.

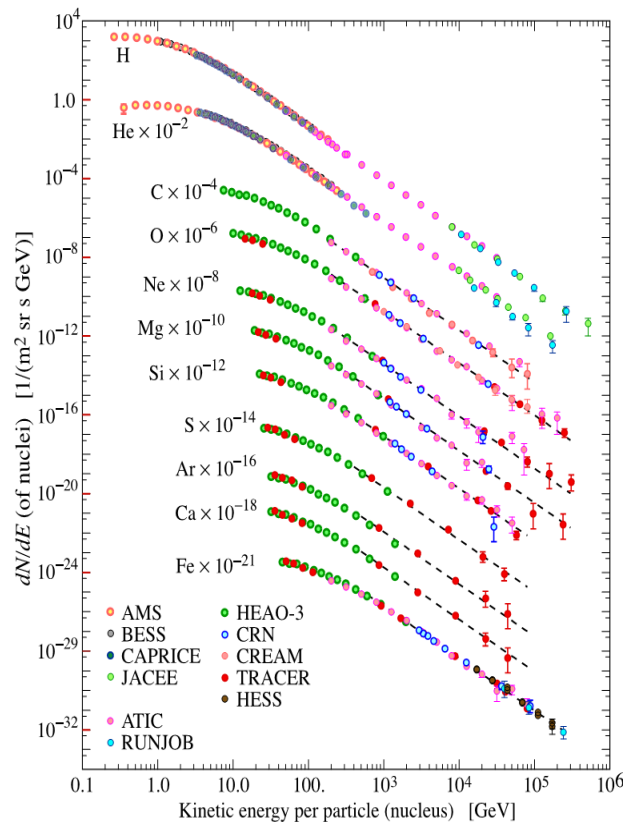


Figure 26.1: Fluxes of nuclei of the primary cosmic radiation in particles per energy-per-nucleus are plotted vs energy-per-nucleus using data from Refs. [1–12]. The figure was created by P. Boyle and D. Muller.

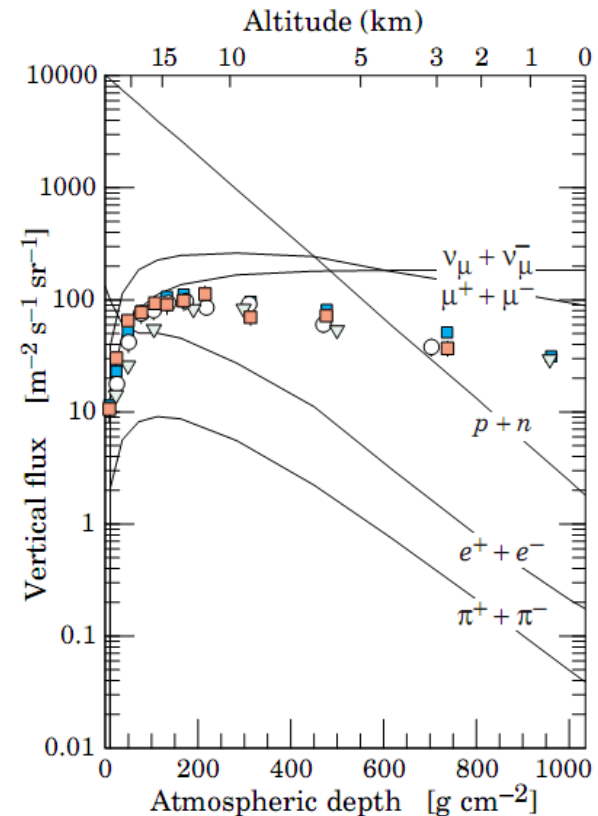


Figure 26.3: Vertical fluxes of cosmic rays in the atmosphere with $E > 1 \text{ GeV}$ estimated from the nucleon flux of Eq. (26.2). The points show measurements of negative muons with $E_\mu > 1 \text{ GeV}$ [32–36].

¿Qué es el Proyecto MARN?

Se trata de un Proyecto de I+D que evalúa los niveles de radiación gamma natural en España, desarrollado según un acuerdo de colaboración entre el CSN y ENUSA. Satisface las directrices del Organismo Internacional de Energía Atómica y de la Unión Europea sobre la conveniencia de disponer de mapas de radiación natural para poder evaluar niveles de radiación y sus posibles incrementos respecto del fondo natural. El Proyecto MARN se inició en 1991 y hasta el momento se han obtenido los siguientes resultados:

- Mapa de tasa de exposición a la radiación gamma ($\mu\text{R/h}$) de la España peninsular a escala 1/1.000.000.
- Mapas de tasa de exposición ($\mu\text{R/h}$) a escala 1/200.000 de toda la superficie peninsular.
- Mapa de tasa de exposición a la radiación gamma de Galicia (En colaboración con la Xunta de Galicia).
- Mapa de estimación potencial de emisión de radón en Galicia (En colaboración con la Xunta de Galicia).

Está previsto continuar la obtención de los mapas de tasa de exposición de escala 1/200.000 del resto de las Comunidades extra peninsulares hasta cubrir todo el territorio nacional.

Origen de la radiación natural

Es la fuente de irradiación más importante de los seres vivos y procede de dos orígenes diferentes: la radiación cósmica que alcanza la Tierra y la propia radiación terrestre.

La radiación cósmica, que procede del espacio exterior, genera en su interacción con la atmósfera radionúcleidos cosmogénicos como carbono-14, tritio, sodio-22 y berilio-7. Varía con la latitud terrestre, siendo mayor en los polos que en el ecuador, y con la altura, ya que es mínima a nivel del mar y duplica su intensidad aproximadamente cada 1.500 metros de altura. En España la radiación cósmica puede evaluarse entre 2,5 y 7 $\mu\text{R/h}$.

La radiación terrestre es debida a la existencia desde hace más de 4.500 millones de años de elementos radiactivos naturales en la superficie de la Tierra y que se encuentran siempre presentes en nuestro entorno. De ellos los más significativos son: potasio-40, bario y sus descendientes, y uranio y sus descendientes.

¿Qué datos utiliza el Proyecto MARN?

Se parte inicialmente de medidas de radiación gamma procedente del suelo efectuadas a lo largo de las numerosas campañas de exploración de uranio que realizaron la antigua Junta de Energía Nuclear y ENUSA durante más de 30 años que han supuesto unos 250.000 datos. Además esos datos se completan con medidas de tasa de exposición obtenidas en el propio desarrollo del Proyecto MARN, que hasta el momento suponen aproximadamente 1.250.000 nuevas medidas.

El mapa de radiación natural a escala 1/1.000.000

El nivel que alcanza la radiación natural está relacionado muy estrechamente con el contenido en potasio, uranio y torio que presentan las diferentes formaciones geológicas. Así, los valores altos están ligados en general a formaciones geológicas que contienen mayores contenidos en los elementos antes citados tal y como sucede por ejemplo en determinado tipo de granitos y rocas sedimentarias derivadas, mientras que los más bajos se asocian a rocas básicas y a formaciones sedimentarias de origen marino.

Las unidades geológicas que presentan valores medios de tasa de exposición mas altos se localizan en formaciones graníticas de diversa naturaleza situadas en las provincias de Cáceres, Madrid, Toledo y Ávila (Sistema Central), en el arco hercínico gallego y en el oeste de las provincias de Salamanca y Zamora. También presentan valores similares los granitos de Cataluña y batolitos de Badajoz, Córdoba y Sevilla. Los niveles de radiación que se alcanzan son similares a los niveles de los granitos franceses o ingleses. Los valores más bajos se localizan en las formaciones sedimentarias de origen marino de Levante y Andalucía.

El mapa radiométrico a escala 1/1.000.000 está obtenido a partir de 1.500.000 medidas aproximadamente. La tasa de exposición media es de 8,7 $\mu\text{R/h}$.

Aplicaciones del Proyecto MARN

- Estudios epidemiológicos para investigar los efectos de bajas dosis de radiación recibidas durante un largo tiempo, en sí mismos o en relación con otros factores.
- Evaluación y control de cualquier incremento de la radiación de fondo debido a causas naturales o no naturales.
- Estimación del potencial de emisión de radón del suelo.
- Asociado con hábitos de vida de la población, pueden estimarse las tasas de dosis absorbida y dosis equivalente que recibe la población (para radiación electromagnética 1 $\mu\text{R/h}$ = 0,01 $\mu\text{Sv/h}$).
- Se dispone de un equipo móvil de actuación rápida capaz de registrar pequeños incrementos de radiación gamma natural o artificial.



Marna

Con la colaboración de:

- Universidad de Salamanca
- Universidad de Extremadura
- Universidad Politécnica de Extremadura
- Universidad de Vigo
- Universidad Politécnica de Catalunya



Mapa de radiación gamma natural de España

Desarrollado por:

- Consejo de Seguridad Nuclear (CSN)
- Xunta de Galicia
- Enusa Industrias Avanzadas (Enusa)

¿Qué es el Proyecto MARNA?

Se trata de un Proyecto de I+D que evalúa los niveles de radiación gamma natural en España, desarrollado según un acuerdo de colaboración entre el CSN y ENUSA. Satisface las directrices del Organismo Internacional de Energía Atómica y de la Unión Europea sobre la conveniencia de disponer de mapas de radiación natural para poder evaluar niveles de radiación y sus posibles incrementos respecto del fondo natural. El Proyecto MARNA se inició en 1991 y hasta el momento se han obtenido los siguientes resultados:

- Mapa de tasa de exposición a la radiación gamma ($\mu\text{R/h}$) de la España peninsular a escala 1/1.000.000.
- Mapas de tasa de exposición ($\mu\text{R/h}$) a escala 1/200.000 de toda la superficie peninsular.
- Mapa de tasa de exposición a la radiación gamma de Galicia (En colaboración con la Xunta de Galicia).
- Mapa de estimación potencial de emisión de radón en Galicia (En colaboración con la Xunta de Galicia).

Está previsto continuar la obtención de los mapas de tasa de exposición de escala 1/200.000 del resto de las Comunidades extra peninsulares hasta cubrir todo el territorio nacional.

Origen de la radiación natural

Es la fuente de irradiación más importante de los seres vivos y procede de dos orígenes diferentes: la radiación cósmica que alcanza la Tierra y la propia radiación terrestre.

La radiación cósmica, que procede del espacio exterior, genera en su interacción con la atmósfera radionúcleidos cosmogénicos como carbono-14, tritio, sodio-22 y berilio-7. Varía con la latitud terrestre, siendo mayor en los polos que en el ecuador, y con la altura, ya que es mínima a nivel del mar y duplica su intensidad aproximadamente cada 1.500 metros de altura. En España la radiación cósmica puede evaluarse entre 2,5 y 7 $\mu\text{R/h}$.

La radiación terrestre es debida a la existencia desde hace más de 4.500 millones de años de elementos radiactivos naturales en la superficie de la Tierra y que se encuentran siempre presentes en nuestro entorno. De ellos los más significativos son: potasio-40, tritio y sus descendientes, y uranio y sus descendientes.

¿Qué datos utiliza el Proyecto MARNA?

Se parte inicialmente de medidas de radiación gamma procedente del suelo efectuadas a lo largo de las numerosas campañas de exploración de uranio que realizaron la antigua Junta de Energía Nuclear y ENUSA durante más de 30 años que han supuesto unos 250.000 datos. Además esos datos se completan con medidas de tasa de exposición obtenidas en el propio desarrollo del Proyecto MARNA, que hasta el momento suponen aproximadamente 1.250.000 nuevas medidas.

El mapa de radiación natural a escala 1/1.000.000

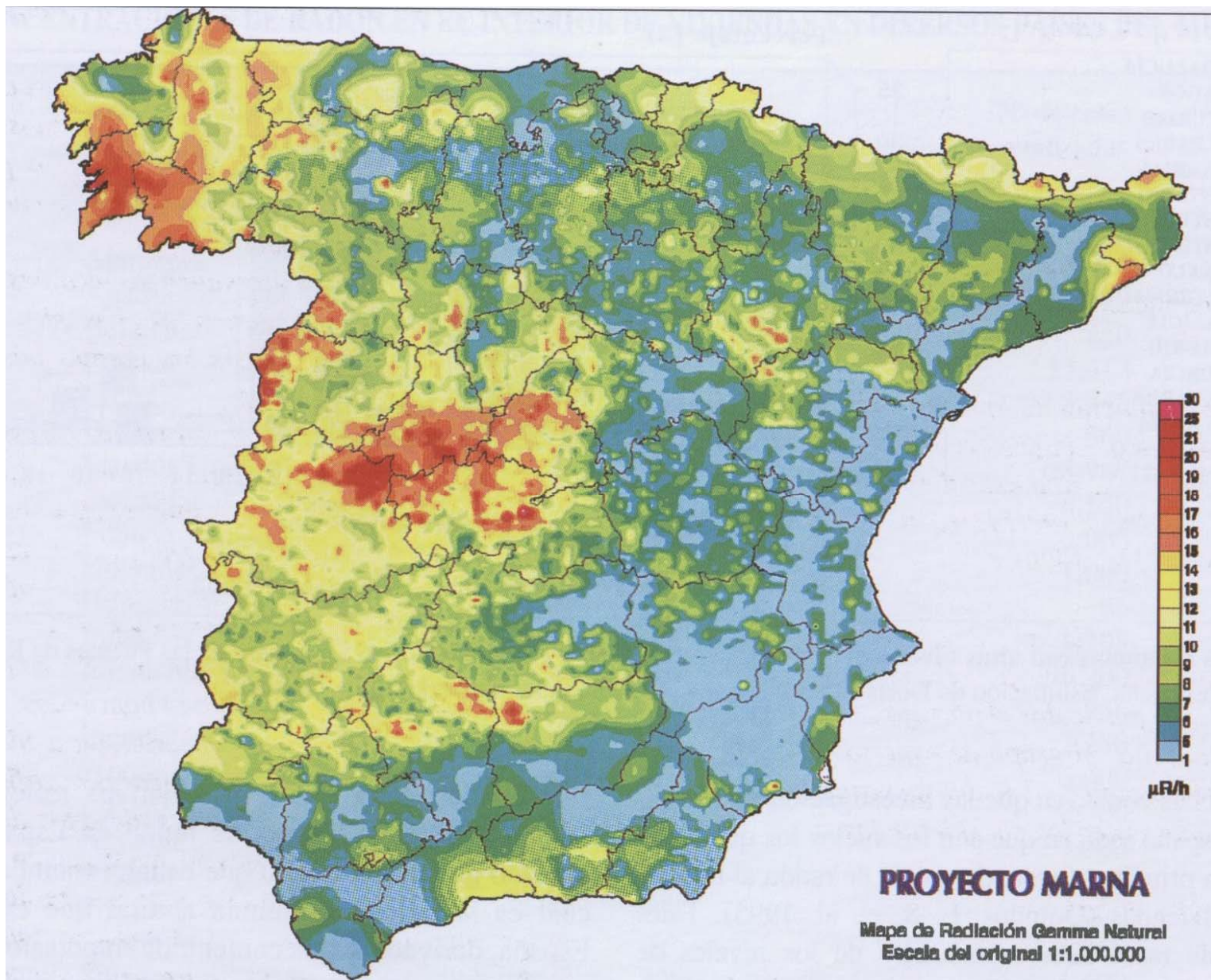
El nivel que alcanza la radiación natural está relacionado muy estrechamente con el contenido en potasio, uranio y torio que presentan las diferentes formaciones geológicas. Así, los valores altos están ligados en general a formaciones geológicas que contienen mayores contenidos en los elementos antes citados tal y como sucede por ejemplo en determinado tipo de granitos y rocas sedimentarias derivadas, mientras que los más bajos se asocian a rocas básicas y a formaciones sedimentarias de origen marino.

Las unidades geológicas que presentan valores medios de tasa de exposición mas altos se localizan en formaciones graníticas de diversa naturaleza situadas en las provincias de Cáceres, Madrid, Toledo y Ávila (Sistema Central), en el arco hercínico gallego y en el oeste de las provincias de Salamanca y Zamora. También presentan valores similares los granitos de Cataluña y batolitos de Badajoz, Córdoba y Sevilla. Los niveles de radiación que se alcanzan son similares a los niveles de los granitos franceses o ingleses. Los valores más bajos se localizan en las formaciones sedimentarias de origen marino de Levante y Andalucía.

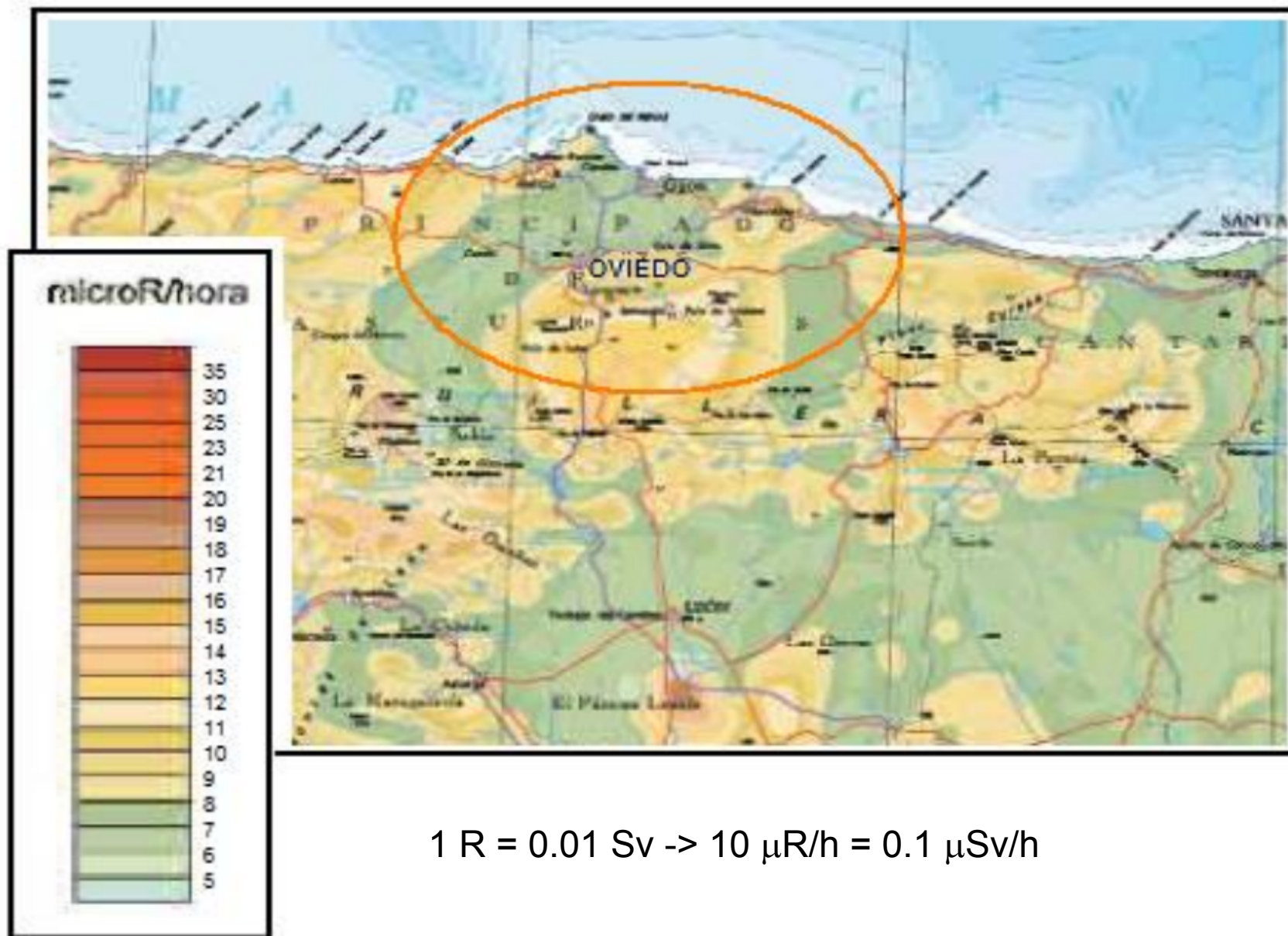
El mapa radiométrico a escala 1/1.000.000 está obtenido a partir de 1.500.000 medidas aproximadamente. La tasa de exposición media es de 8,7 $\mu\text{R/h}$.

Aplicaciones del Proyecto MARNA

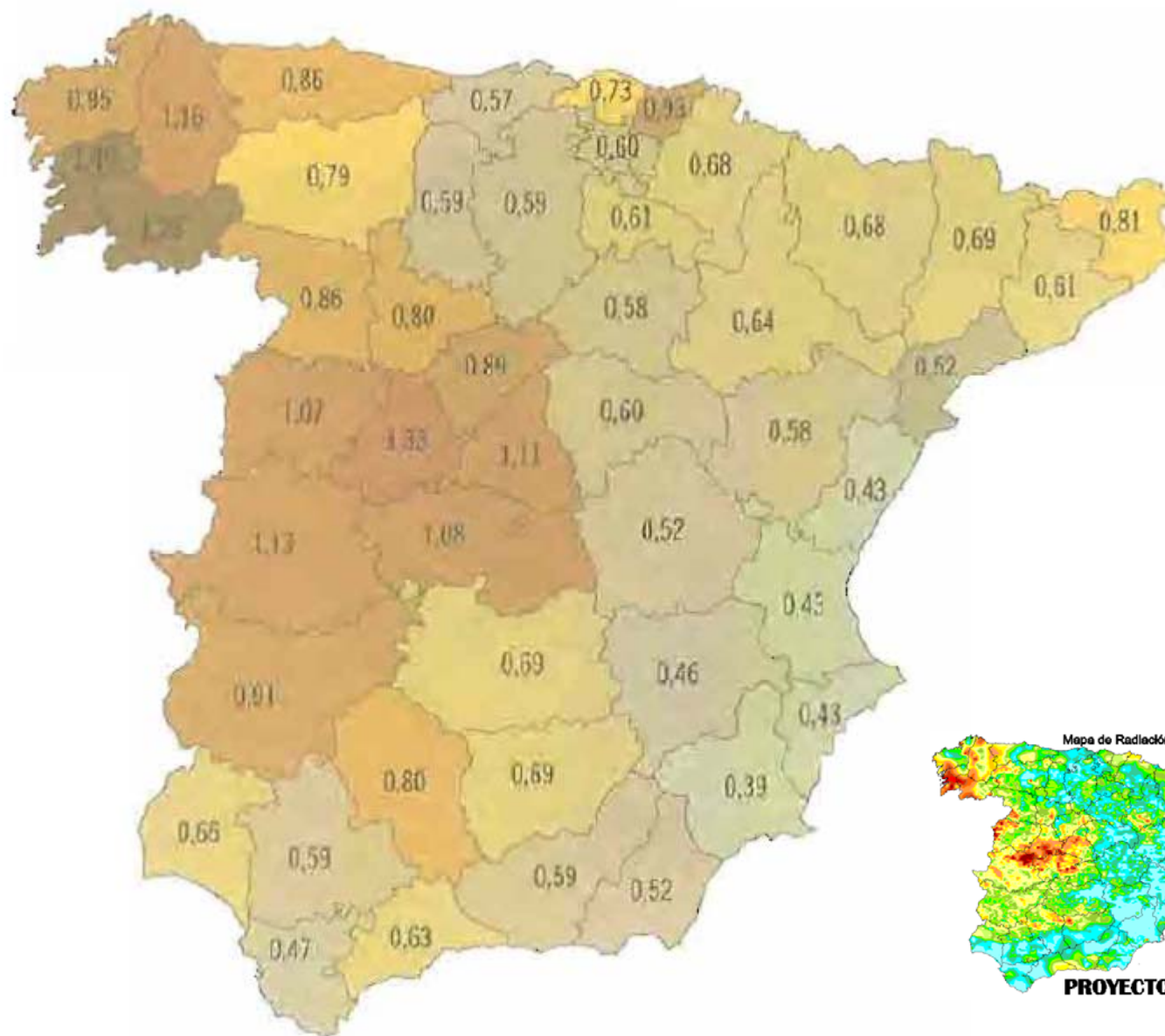
- Estudios epidemiológicos para investigar los efectos de bajas dosis de radiación recibidas durante un largo tiempo, en sí mismos o en relación con otros factores.
- Evaluación y control de cualquier incremento de la radiación de fondo debido a causas naturales o no naturales.
- Estimación del potencial de emisión de radón del suelo.
- Asociado con hábitos de vida de la población, pueden estimarse las tasas de dosis absorbida y dosis equivalente que recibe la población (para radiación electromagnética 1 $\mu\text{R/h} = 0,01 \mu\text{Sv/h}$).
- Se dispone de un equipo móvil de actuación rápida capaz de registrar pequeños incrementos de radiación gamma natural o artificial.



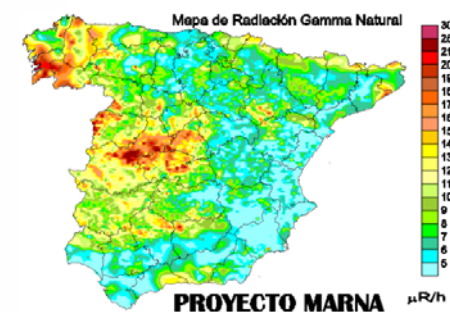
Cósmica: 0.025-0.07 $\mu\text{Sv/h}$ **Total:** 0.01-0.3 $\mu\text{Sv/h}$



Mapa 4.5. Tasa de exposición a la radiación gamma natural. Valores medios por provincia (milisievert por año)



1año =
8760h



RADIOACTIVIDAD NATURAL

Radiactividad Natural en la Comida

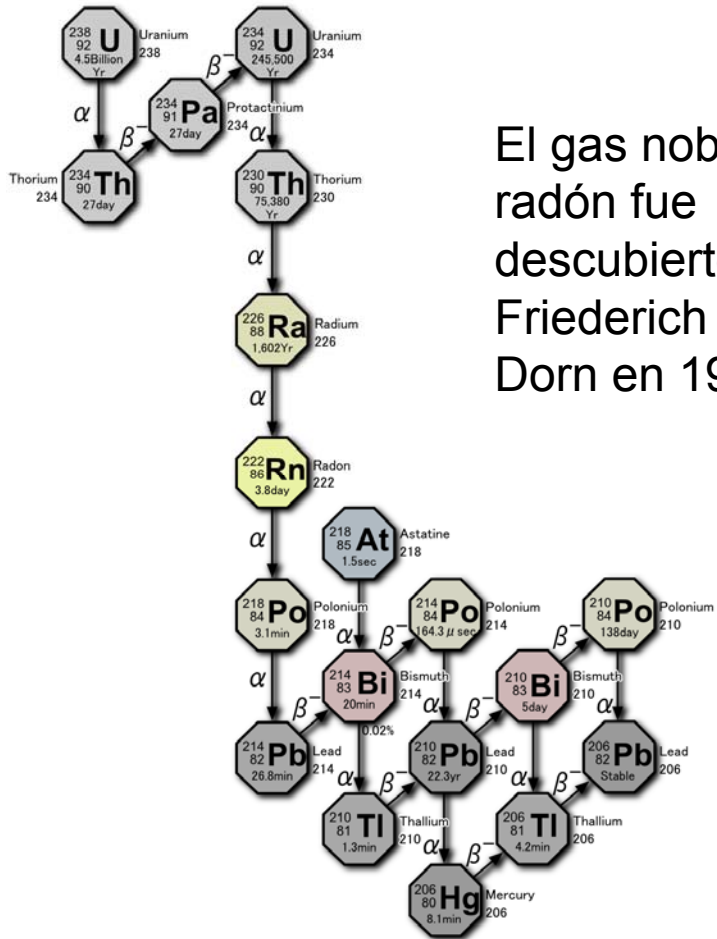
La radiación interna proviene de las sustancias radiactivas presentes en los alimentos, en el agua y en el aire, las cuales, al ser ingeridas o inhaladas, se absorben en los tejidos vivos. Los principales isótopos radiactivos que contiene el cuerpo humano son el potasio-40, el carbono-14 y el tritio

$$1\text{pCi} = 0.037\text{Bq}$$

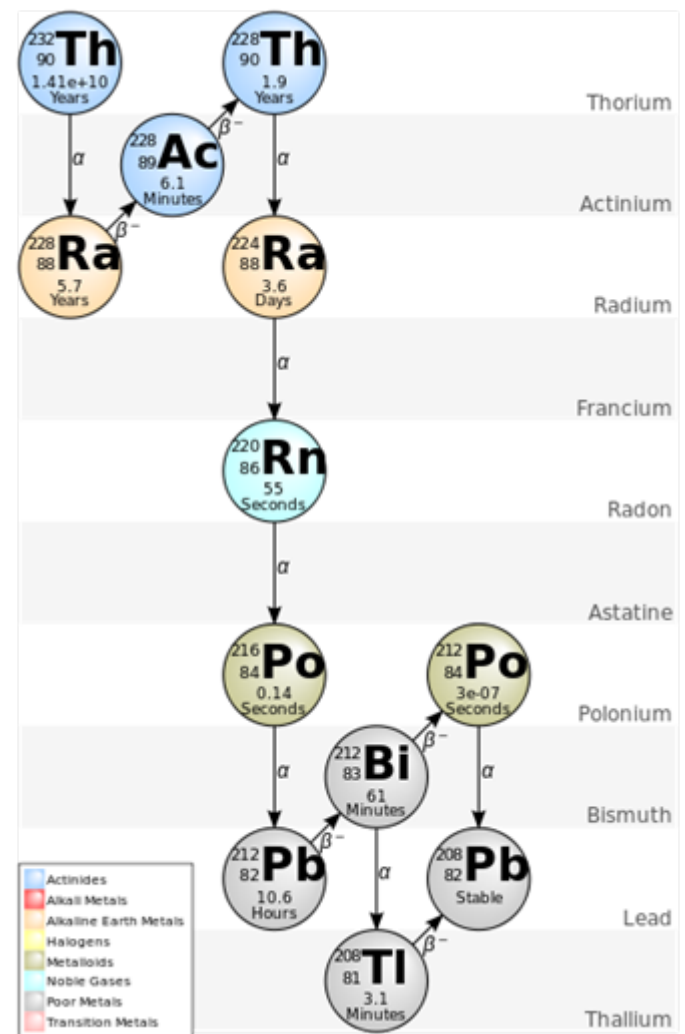
Comida	^{40}K pCi/kg	^{226}Ra pCi/kg
Plátano	3520	1
Nueces	5600	1000-7000
Zanahorias	3400	0.6-2
Patatas	3400	1-2.5
Cerveza	390	---
Carne Roja	3000	0.5
Limón	4640	2-5
Agua del Grifo	---	0-0.17

El radón (Rn)

El Radón y su prole:



El gas noble
radón fue
descubierto por
Friederich Ernst
Dorn en 1900



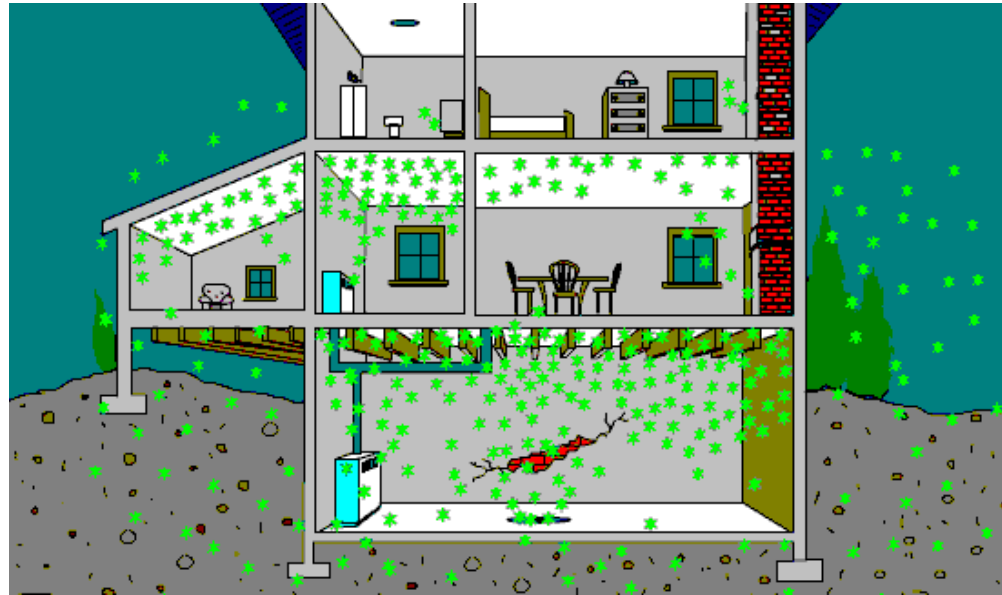
- El ^{222}Rn , emisor α -puro, fruto de la cadena de desintegración del ^{238}U
- Debido a su vida media de 3.8d (el más estable) es liberado por la superficie del suelo y se encuentra en la atmósfera por todas partes (hay 39 isótopos diferentes)
- El ^{220}Rn y el ^{219}Rn (productos del ^{232}Th y ^{231}Ac) no son tan importantes debido a su corta vida media a pesar de existir en mayor cantidad

Historia del Radón

- **1556** G. Agricola reconoce que un gas en las minas de plata en la Europa central es el responsable de la muerte de mineros por enfermedad pulmonar
- **1879** Un estudio de los mineros en las montañas Ore (Alemania) demuestra que la enfermedad pulmonar que mata a los mineros es el cáncer, y que en algunas minas mata al 75% de los mineros
- **1900** Dorn descubre la “radium emanation”, más tarde llamado radón (222)
- **1908** Ramsay y Gray aislan el elemento y estudian sus propiedades físicas
- **1951** Bale descubre que son los productos de desintegración del radón, no el gas radón, los que producen altas dosis de radiación en los pulmones
- **1956** En algunos hogares suecos se encuentran altos niveles de radón, pero se atribuye a un problema local producido por los materiales de construcción locales
- **1987** La OMS recomienda que se adopten medidas para reducir las concentraciones de radón en los hogares (100-400 Bq/m³)
- **1993** La ICRP adoptó niveles de acción:
 - entre 200 y 600 Bq/m³ para edificios existentes.
 - entre 500 y 1500 Bq/m³ para puestos de trabajo con poca ocupación

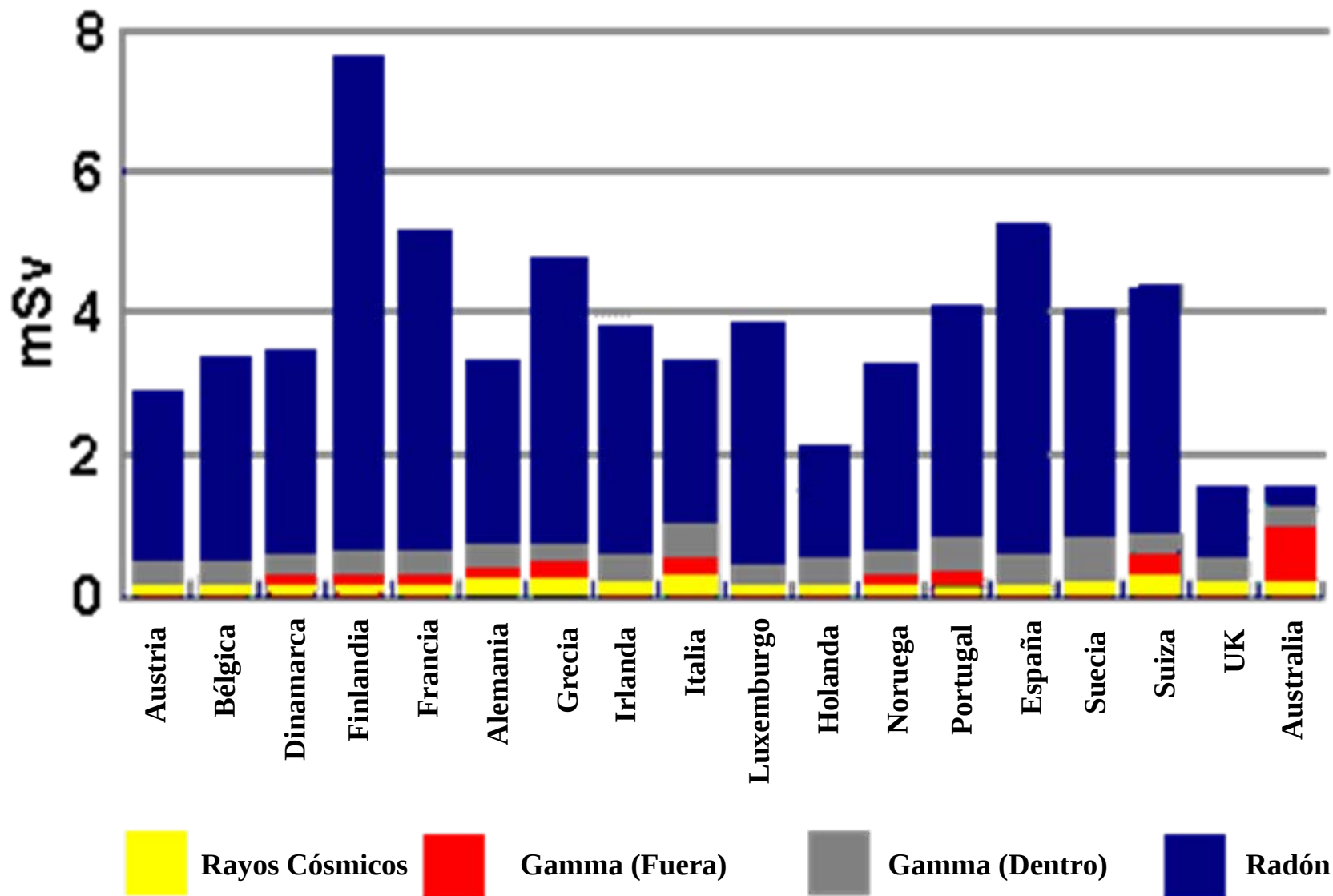
¿Por qué es tan peligroso?

- **Es incoloro, inodoro, insípido, invisible, bastante soluble en agua y más aun en solventes orgánicos**
- Las fuentes del radón atmosférico están en la superficie terrestre, en los materiales de construcción, en las aguas subterráneas, en el gas natural, los océanos, el carbón y las minas de uranio y fosfato.
- Se filtra hasta el interior de las casas desde el subsuelo. La porosidad, permeabilidad, presencia de grietas y fallas, la presión atmosférica, la lluvia y la nieve, la velocidad del viento y la temperatura influyen en la concentración y difusión del radón.
- El radón domiciliario se acumula en las viviendas a partir del subsuelo sobre el que se ha construido la casa; mucho más si las rocas son ricas en uranio (granito y pizarra).
- Las vías de penetración de radón al interior de los edificios se producen a través de las cámaras de aire de muros exteriores, a través de la solera, de los muros del sótano y entresuelos, por los conductos de saneamiento y a través del forjado sanitario.

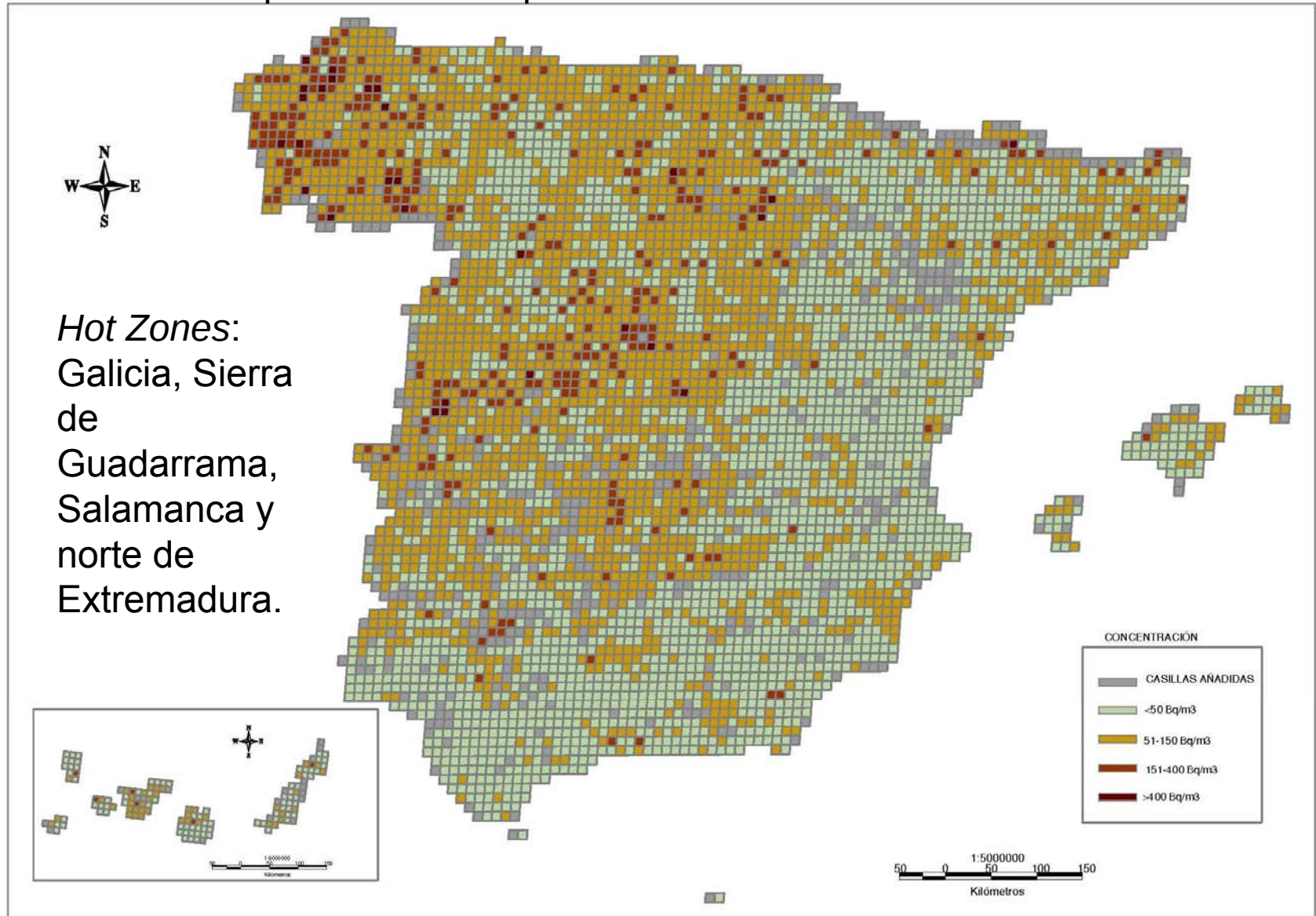


- La forma más fácil de disminuir los niveles de radón en los domicilios es la ventilación de la casa, el cierre de fisuras y grietas y la abertura de ventilación en sótanos; aunque a veces y dependiendo del radón acumulado eso no parece suficiente.
- Es curioso observar cómo ésta dosis es mayor en países fríos, donde ventilar la casa puede costar algún catarro

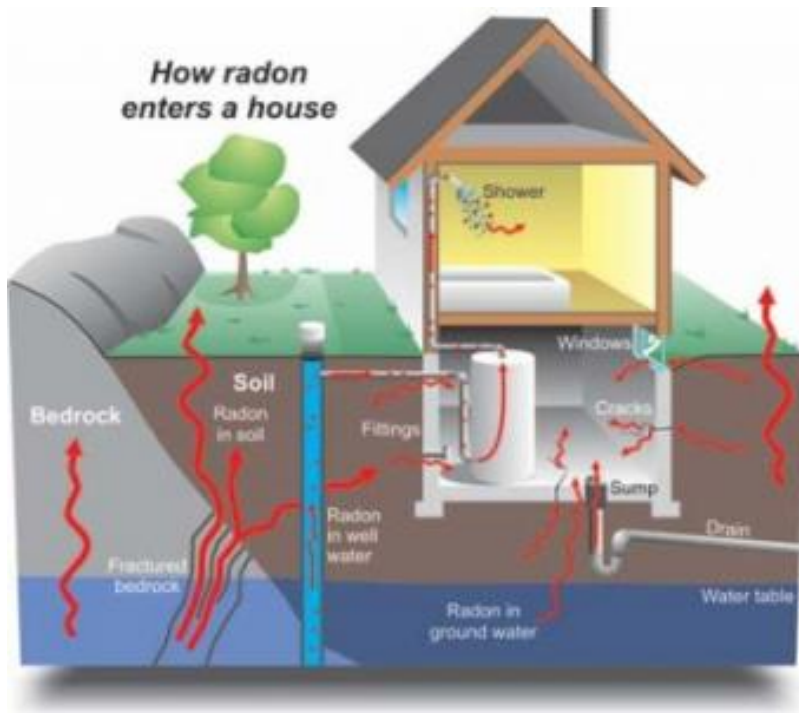
DOSIS MEDIA ANUAL PROVENIENTE DE RADIACIÓN NATURAL



Mapa de Rn en España: 15000 datos de Rn de interiores



- La actividad del ^{222}Rn en el aire va de 10 a 100 mBq/L al aire libre y 100 a miles de mBq/L en interiores.
- La concentración natural de Rn depende del clima y muestra variaciones diarias y estacionales.
- Los niveles de Rn son mínimos por encima de los océanos.



$$1\text{pCi/L} = 37 \text{ Bq/m}^3$$

$$1\text{Bq/m}^3 = 1\text{mBq/L}$$

$$300 \text{ Bq/m}^3 \text{ ----- } 10 \text{ mSv/año}$$

$$600 \text{ Bq/m}^3 \text{ ----- } 20 \text{ mSv/año}$$

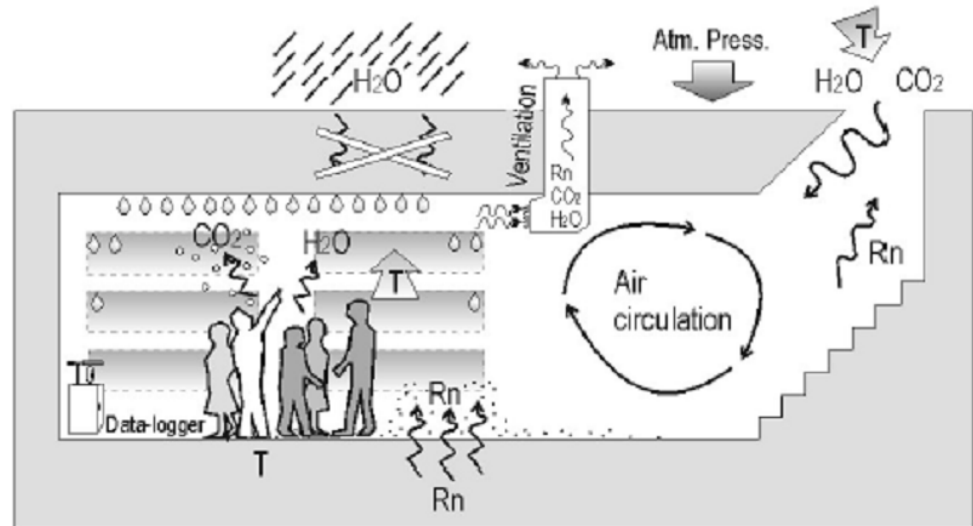
$$10000 \text{ Bq/m}^3 \text{ ----- } 0.09 \text{ mSv/h ----- } 25 \text{ h ----- } 2 \text{ mSv}$$

- A partir de estudios sobre mineros, en **1985**, se pensó en la radiación del Radón como la responsable de cáncer de pulmón.

- **Media mundial en suelos (Ra):** 35 Bq /Kg (UNSCEAR 2000)

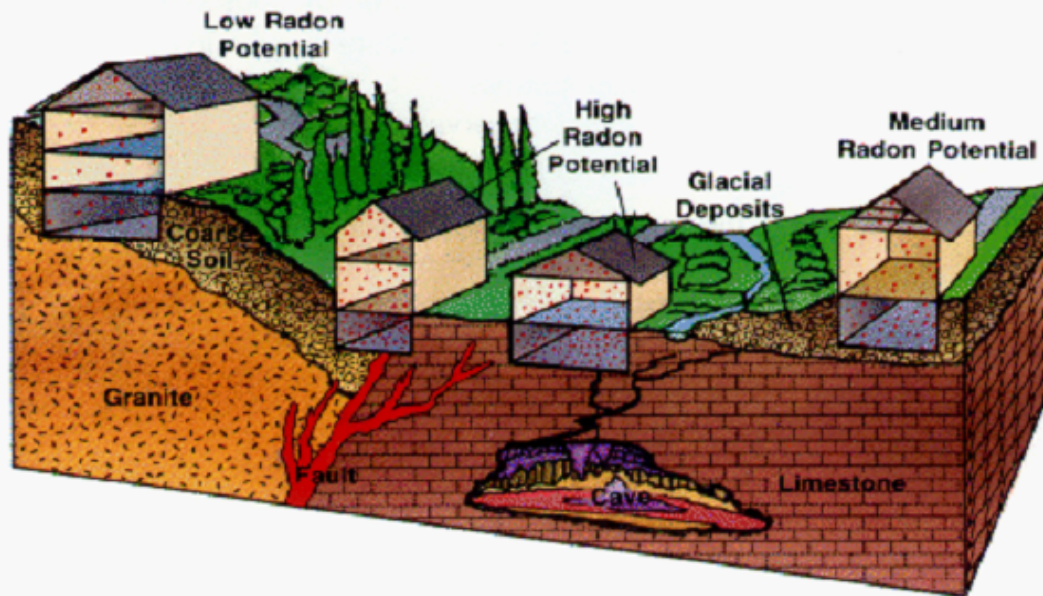
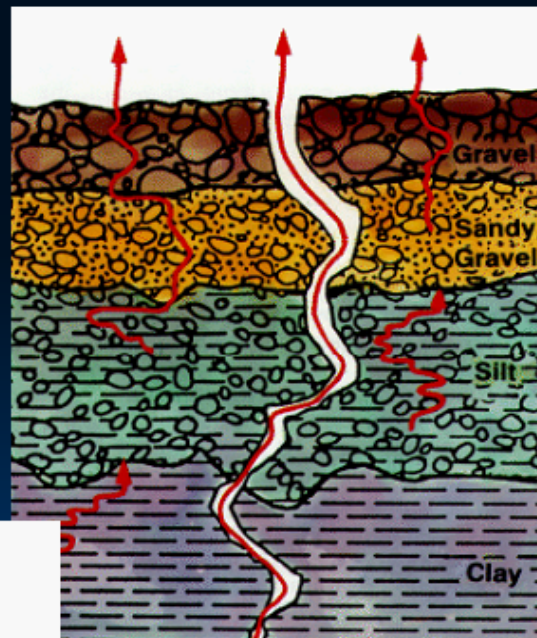
- Según la Agencia de Protección Ambiental el nivel permitido en Europa es de 148 Bq/m³; pero en casas ya construidas se recomienda no superar los 400 Bq/m³ y en las nuevas no sobrepasar los 200 Bq/m³. En lugares de trabajo (20% ocupación) <10³Bq/m³

- **A partir de 100 Bq/m³** aumenta en un 16% el riesgo de cáncer pulmonar. Sólo a partir del agua y la comida nos exponemos al 12% de radiación ionizante.



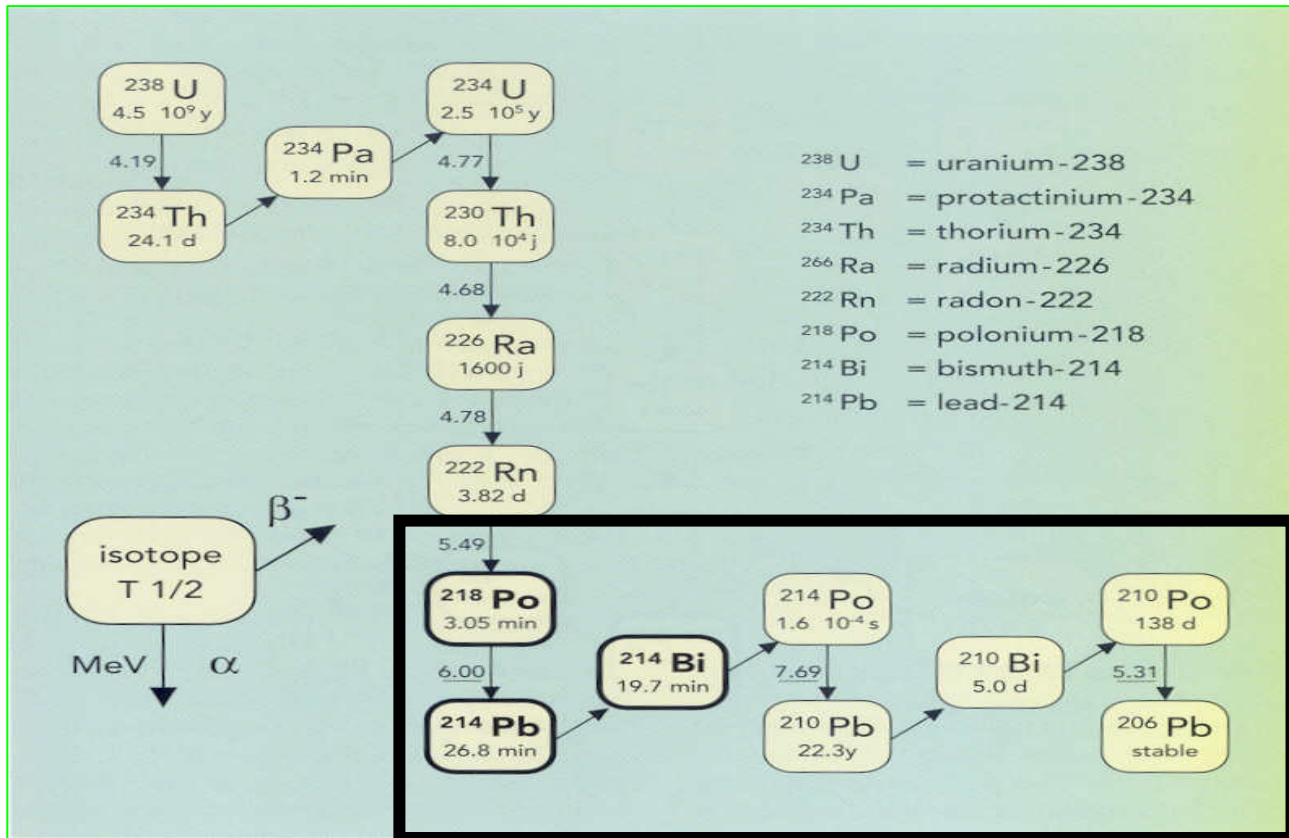
PRODUCTION MOVEMENT

Permeability
Humidity
Water & cracks



MEASUREMENT

Descendientes



Factores que influyen en concentración ^{222}Rn :

- Tasa de producción por diversas fuentes
- Tasa de ventilación
- Tasa de transformación /eliminación
- Fisicoquímica

Más factores para descendientes:
(concentración de partículas, presencia de superficies, etc...)

Sólidos

Activos químicamente

Periodos de semidesintegración < 30 min

Comportamiento complejo

Importancia radiológica

$\alpha + \beta$

Fuentes de radón y transporte



Difusión

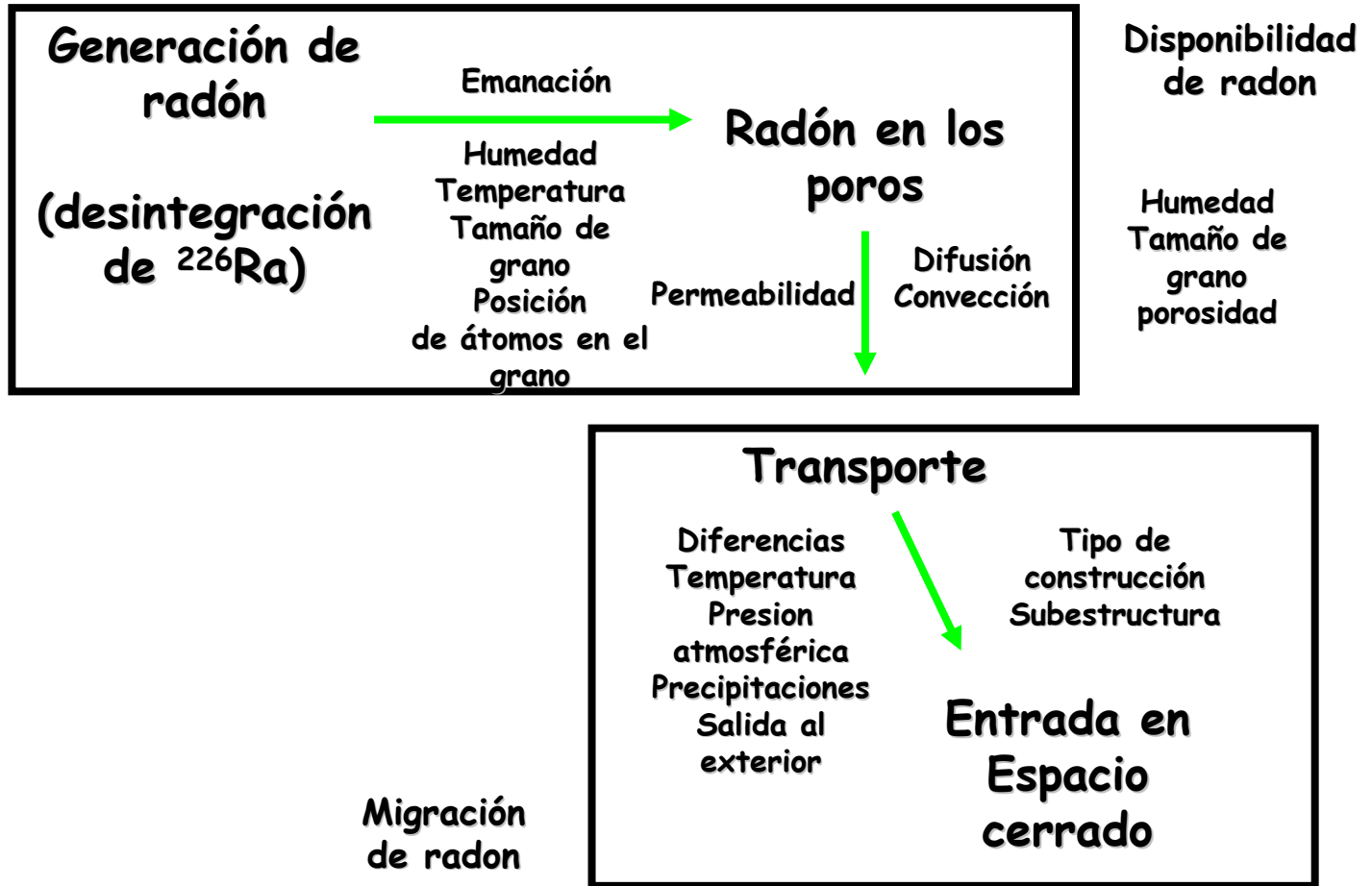
Por diferencias de concentración
Movimiento relativo del gas en el seno del material
que lo contiene

Transporte

Convección

Por diferencias de presión/temperatura
El fluido que contiene al gas actúa como vehículo
de transporte

Suelo



Suelo

Contenido en ^{226}Ra de suelos españoles

Comunidad Autónoma	Número de medidas	Valor medio (Bq/Kg)	Rango
ANDALUCÍA	126	29.0	8-82
ARAGÓN	44	35.8	48-72
ASTURIAS	17	43.7	20-167
BALEARES (MALLORCA)	11	34.5	23-70
CANARIAS (TENERIFE)	30	51.2	21-136
CANTABRIA	94	44.3	10-141
CASTILLA-LA MANCHA	119	29.4	9-65
CASTILLA Y LEÓN	144	38.8	9-300
CATALUÑA	45	39.5	13-138
EXTREMADURA	73	49.5	11-240
GALICIA	71	93.9	18-310
MADRID	37	48.6	12-158
MURCIA	16	31.5	18-63
NAVARRA	15	33.5	19-80
LA RIOJA	12	42.2	16-69
PAIS VASCO	45	45.1	9-93
COMUNIDAD VALENCIANA	32	28.1	8-61
ESPAÑA	952	38.9	8-310

Suelo

Ejemplo

$$C_{226\text{Ra}} = 25 \text{ Bq Kg}^{-1}$$

$$\rho_{\text{suelo}} = 1600 \text{ Kg m}^{-3}$$

$$C_{222\text{Rn}} = 40 \text{ KBq m}^{-3}$$

En equilibrio

Porosidad 20 %
Factor de emanación 0.2
Flujo de gas $0.25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Exhalación

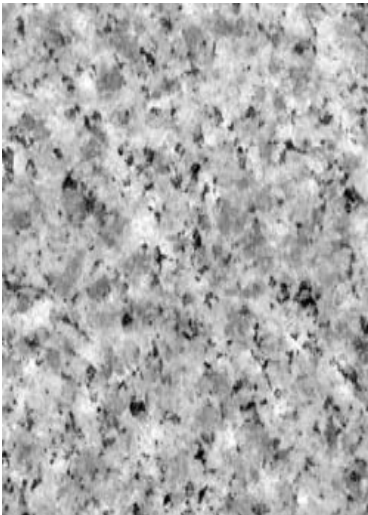
$$40 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$$

Meteorología
Ventilación
Tipo de cobertura
Etc...

Materiales de construcción

Pueden ser una fuente importante de radon en edificios elevados

Baja permeabilidad → Difusión principal mecanismo

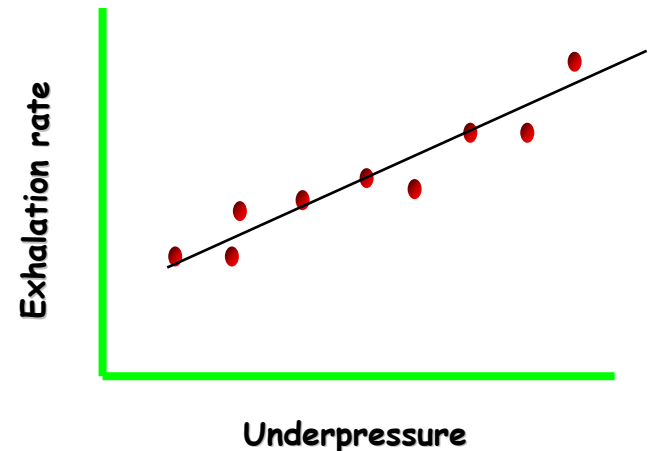


Ejemplo granito

Elevado contenido en ^{226}Ra

Exhalación dependiente de fisuras, grietas, etc...

Presión atmosférica
Humedad



Materiales de construcción

Contenido en ^{226}Ra de granitos españoles

Provincia	Número de muestras	Concentración Ra-226 (Bq/kg)
Ávila	2	86.1
Badajoz	23	66.3
Cáceres	10	78.2
La Coruña	3	92.0
Huelva	1	32.6
Huesca	1	282.1
Lugo	6	93.1
Madrid	13	90.9
Orense	5	78.4
Pontevedra	12	112.0
Salamanca	3	61.3
Segovia	3	126.7
Sevilla	1	30.3
Toledo	1	191.2
Zamora	3	73.9

Materiales de construcción

Contenido de ^{226}Ra de algunos materiales de construcción

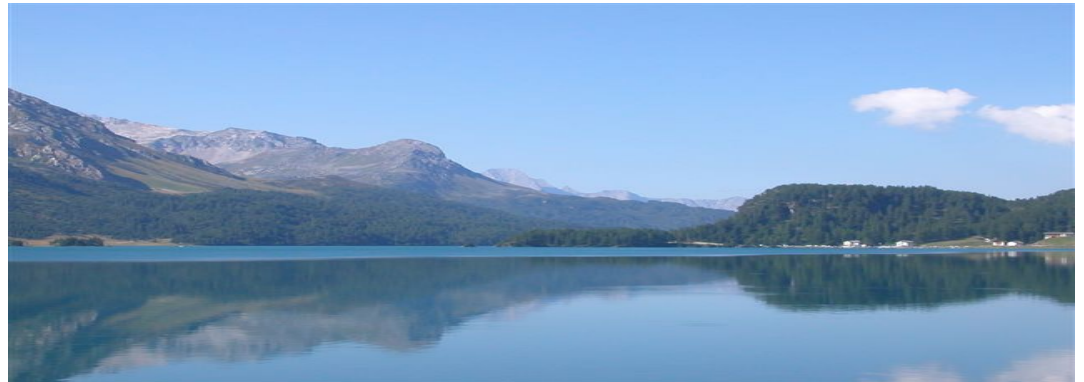
Tipo material	Nº muestras	Ra-226 (Bq/Kg)
Arenas de playa	6	5.9
Arena I	4	30.3
Arena II	7	7.0
Ladrillo I	3	55.1
Ladrillo II	8	73.2
Cemento I	3	25.1
Cemento II	7	421.8
Cemento III	5	94.7
Cemento IV	4	23.3
Cemento V	5	51.8
Cemento VI	6	35.5
Cemento VII	7	53.6
Yeso I	3	9.6
Yeso II	5	35.9
Yeso III	7	50.7
Yeso IV	5	11.1
Estuco	4	8.1
Hormigón	24	29.9
Suelo	12	14.8

Agua



El contenido de $^{226}\text{Ra}/^{222}\text{Rn}$ depende

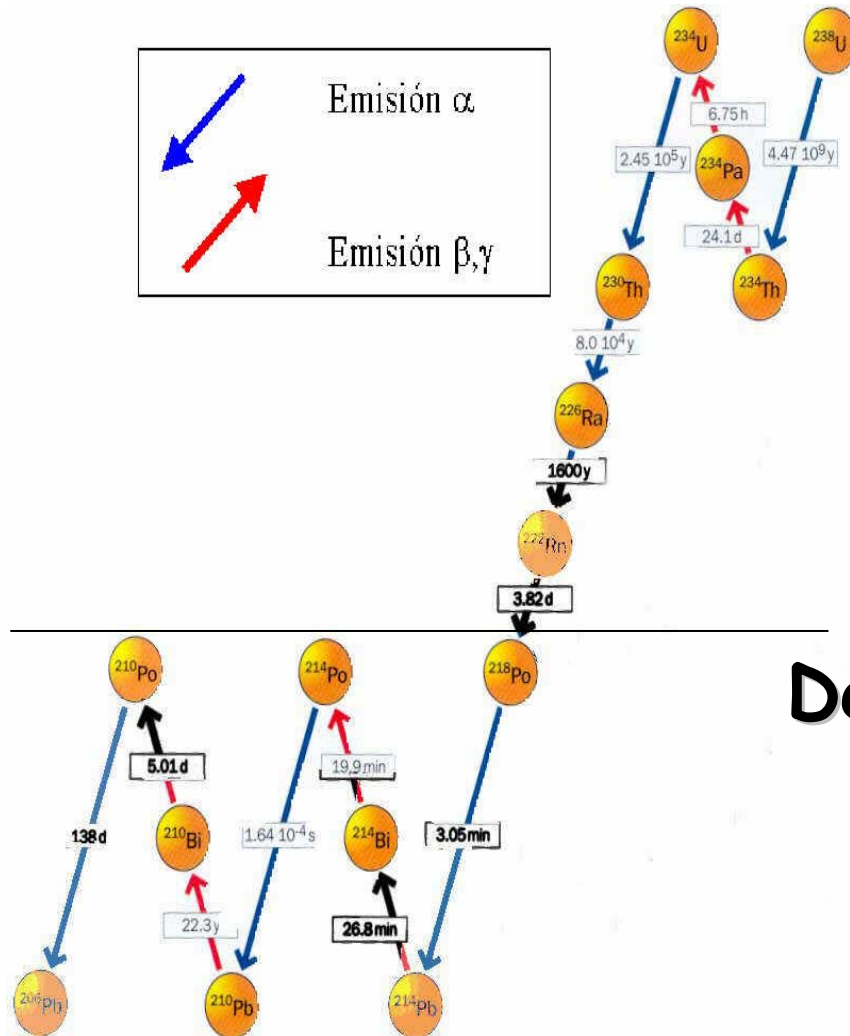
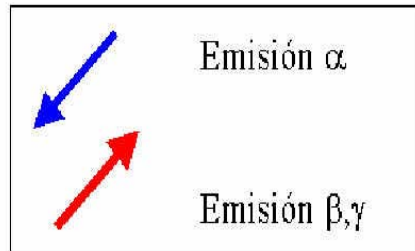
Aguas superficiales (lagos, rios...)
Aguas profundas (pozos, manantiales...)
Agitación
Temperatura



The diagram illustrates the process of radon entry into a water supply system. It shows a cross-section of the landscape with a forested area on the left, a well in the center, and an elevated reservoir on the right. Rain falls on the forest, creating a 'raw water source' and a 'raw water collecting gallery'. Radon is shown entering the water from 'radon in rock layers' and being 'transferred into ground water'. The water then flows through a 'well' and a 'water purification' facility before reaching an 'elevated reservoir'. Radon is depicted as red dots throughout the system, including in the reservoir and the water being pumped.

**10000 veces más
en el agua**

Descendientes del radón

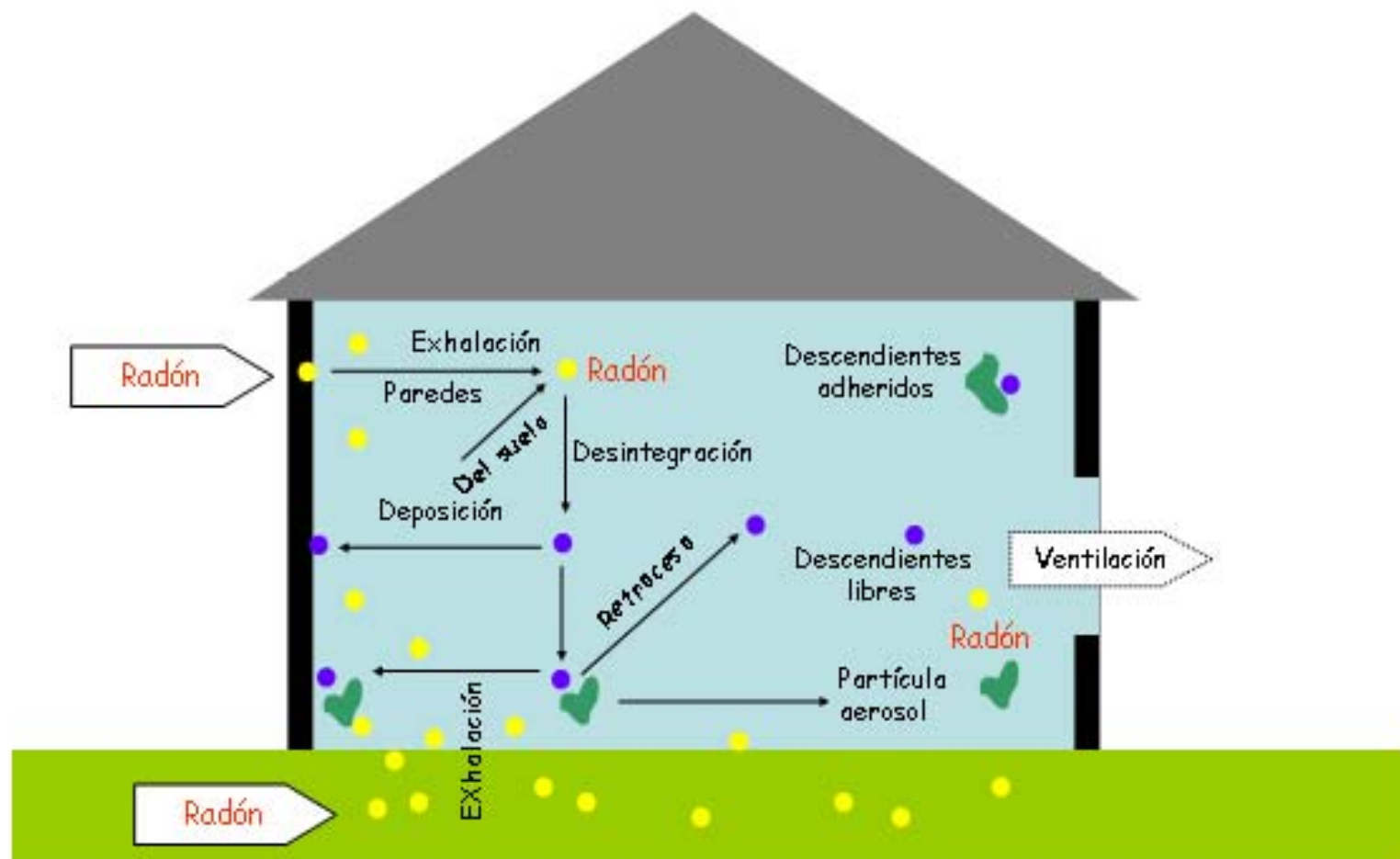


Radón químicamente inerte/vida media larga

Bajo nivel de retención

Descendientes químicamente activos/vida media corta

Mayor nivel de retención (hasta 24 h)



Comportamiento del radón y sus descendientes en el interior de una vivienda

Descendientes del radón

Tamaño (nm)

0.5 - 1

10 - 1000

Vargas 2004

Porstendorfer 1994



Descendientes del radón

Mecanismos de transformación/desaparición de descendientes

Desintegración $\lambda = 1.6 - 14 \text{ h}^{-1}$

Ventilación $\lambda = 0.5 \text{ h}^{-1}$

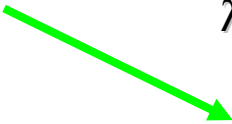
$$\lambda \cdot t = 1 \rightarrow 1 / e$$

$\lambda \rightarrow \infty$ Más eficaz!!

$\lambda = 0.1 \text{ h}^{-1}$ (aerosoles)

Deposición en superficies

$\lambda = 20 \text{ h}^{-1}$ (libres)



Mecanismo predominante

Velocidad de deposición inversa al tamaño

Causa desequilibrio radón/descendientes

Deposición tanto mayor cuanto mayor es Superficie/Volumen

Magnitudes y unidades

(ICRP 32)

Para caracterizar la presencia de descendientes no basta con conocer la concentración de gas radón

<http://www.wise-uranium.org/cunit.html>

<http://www.wise-uranium.org/rdcrnh.html>

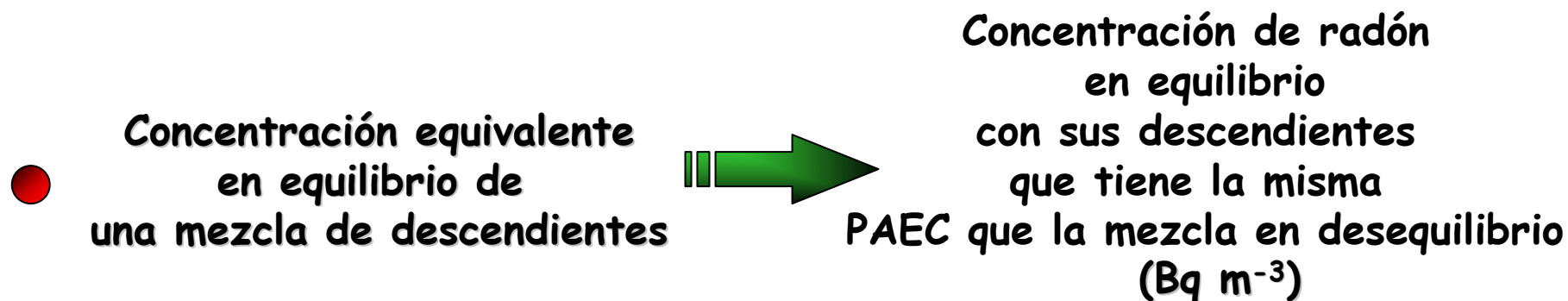
- **Energía potencial alfa**  **Energía alfa emitida por la desintegración de todos los átomos hasta alcanzar el ^{210}Pb**
- **Concentración en energía potencial alfa (PAEC)**  $\text{PAEC}(\text{J} \cdot \text{m}^{-3}) = \sum_j E_{aj} \cdot C_j$

Unidad tradicional (minas) WL (working level): Concentración en energía potencial alfa de una mezcla de descendientes que se encuentra en equilibrio con una concentración de radón de 3746 Bq m^{-3}

$$1 \text{ WL} = 2.083 \cdot 10^{-5} \text{ J m}^{-3}$$

Otra definición: 1 WL = concentración de energía de los descendientes de corta vida del ^{222}Rn (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , y ^{214}Po) en 1 L de aire que liberan $1.3 \times 10^5 \text{ MeV}$ de energía en partículas alfa

Magnitudes y unidades



$$C_{eq} (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}) = 0.105 \cdot C_{218\text{Po}} + 0.516 \cdot C_{214\text{Pb}} + 0.379 \cdot C_{214\text{Bi}} + 6 \cdot 10^{-8} \cdot C_{214\text{Po}}$$

Relación con la PAEC:

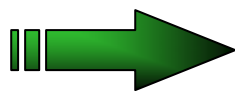
$$1 \text{ WL} \equiv 3746 \text{ Bq/m}^3 \text{ de } ^{222}\text{Rn en equilibrio}$$
$$\approx 3700 \text{ Bq/m}^3$$

$$PAEC(WL) = \frac{C_{eq} (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})}{3700}$$

Magnitudes y unidades



Factor de equilibrio



Relación entre concentración
equivalente en equilibrio (EEC)
y concentración real de gas radón

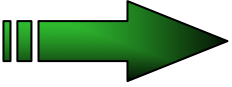
$$F = \frac{C_{eq}}{C}$$

En términos de PAEC

$$F = \frac{WL \cdot 3700}{C(Bq \cdot m^{-3})}$$

Valor típico $F \sim 0.4$

Magnitudes y unidades

● Exposición  Producto de la concentración de descendientes de radón por el tiempo de inhalación de dicha mezcla

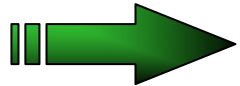
En actividad ($\text{Bq m}^{-3} \text{ h}$)

Unidad tradicional WLM (working level month):
Exposición de 1 WL
durante un periodo de trabajo
de un mes (170 h)

En PAEC ($\text{J m}^{-3} \text{ h}$) 

$$1 \text{ WLM} = 3.54 \text{ mJ m}^{-3} \text{ h} = 6.37 \cdot 10^5 \text{ Bq m}^{-3} \text{ h}$$

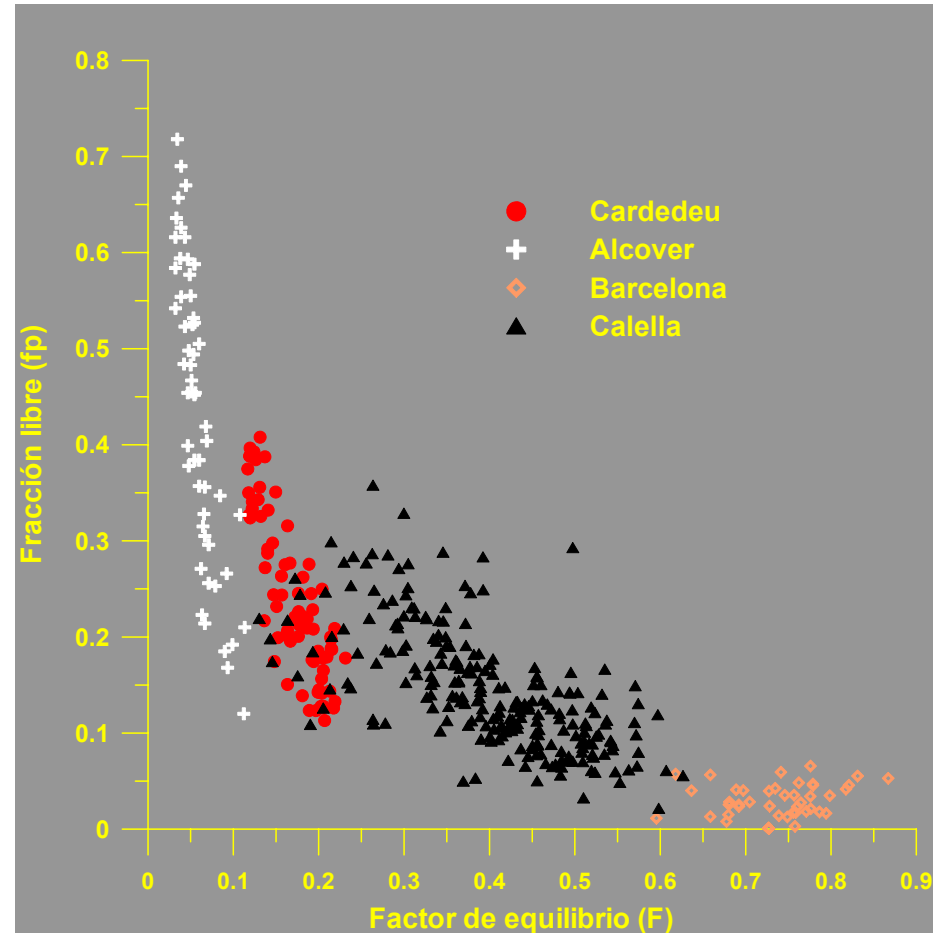
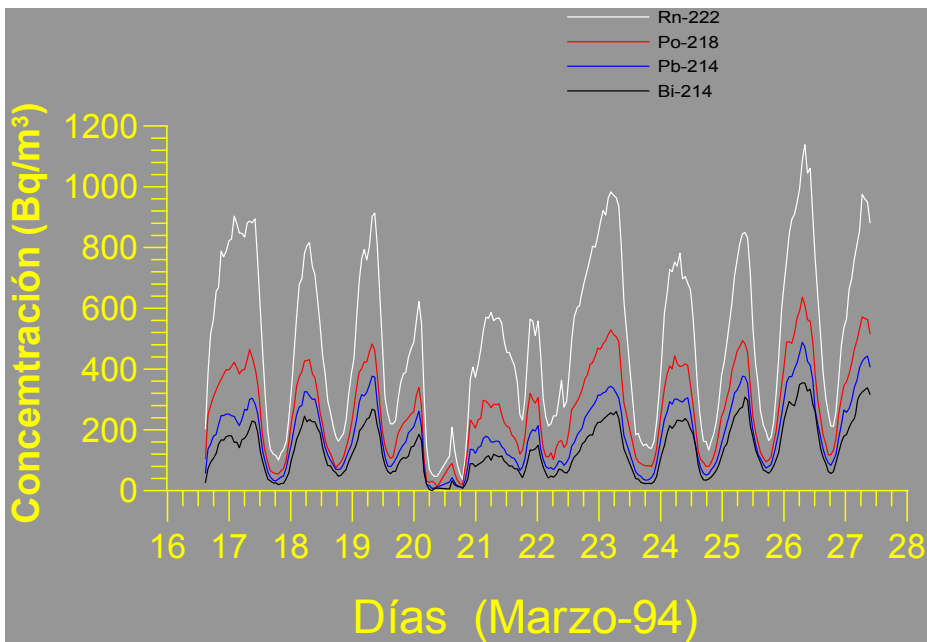
● Fracción libre



Proporción de descendientes de radón
no vinculados
a partículas de aerosol

$$f_p = \frac{C_{eq}^p}{C_{eq}}$$

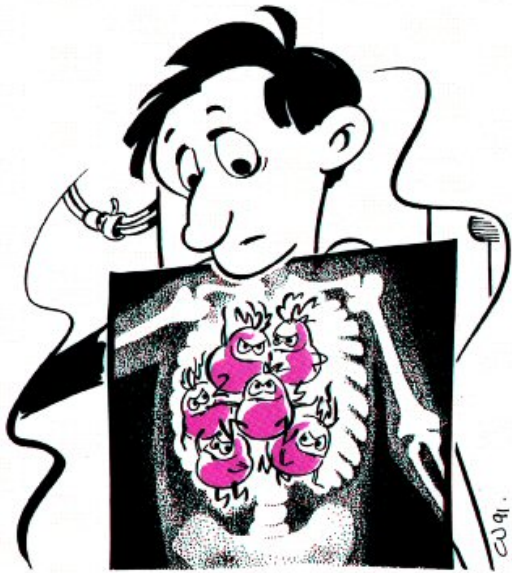
Fluctuaciones en una vivienda



Ejemplo práctico

- $WL = F * C \text{ (Bq/m}^3\text{)} / 3746$; $WLM = WL * t(h) / 170$
- 600 Bq/m^3 ----- 10.5 mSv/año
 $1 \text{ año} = 7000 \text{ h}$ $F=0.4$ 4 mSv/WLM
- 300 Bq/m^3 ----- 8 mSv/año
 $\text{Si } F= 0.5 \text{ y } 5 \text{ mSv/WLM}$
- 10.000 Bq/m^3 ----- 0.04 mSv/h ----- 25 h ----- 1 mSv
 $\text{Si } F=0.8 \text{ (exteriores) y } 4 \text{ mSv/WLM}$

Riesgos para la salud



La inhalación de radón (y descendientes)
provoca irradiación alfa en las células
del tracto respiratorio



Mutaciones, transformación maligna
Riesgo de cáncer de pulmón

Dos vías de estimación de riesgos

- Epidemiológica
- Dosimétrica



Il radon è inquadrato al secondo posto, dopo il fumo,
come causa per l'insorgenza di tumori polmonari.

(foto: Radon, Ufficio federale di sanità pubblica di Berna, CH).

Riesgos para la salud

Estudios epidemiológicos

Estudios en poblaciones de mineros

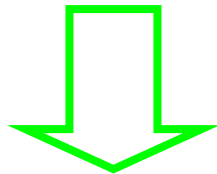
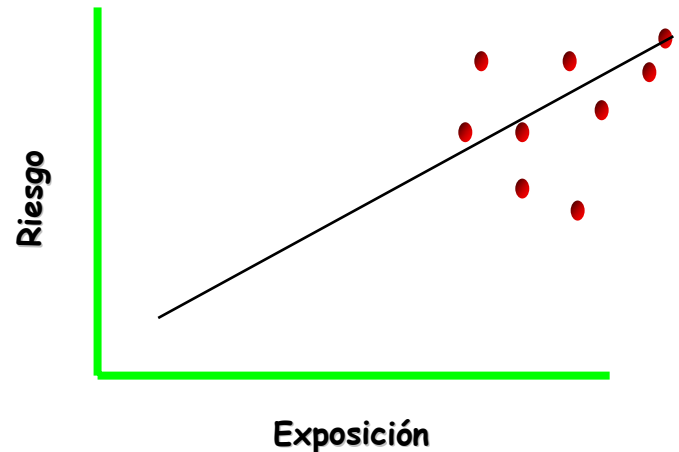
Tasas de exposición altas

Influencia del tabaco

Presencia de otros contaminantes

Condiciones de exposición específicas

(tasas de respiración, variedad concentración de partículas, etc)



Difícil extrapolación al riesgo
por exposición en viviendas



Desarrollo actual de estudios
tipo casos/control
en viviendas

Riesgos para la salud

Estimación de riesgos

Datos casos/controles
Sin resultados concluyentes



ICRP estimación de riesgos por
extrapolación de estudios
en población minera

ICRP 65 (1993) cálculo de coeficiente de conversión
de exposición a dosis efectiva

$$\text{mSv WLM}^{-1} = \frac{\text{Detrimento por exposición a radón (A)}}{\text{Detrimento por u. de dosis efectiva (B)}}$$

Riesgos para la salud

Detrimento por exposición a radón (A) → Datos población minera

$$3 \cdot 10^{-4} \text{ WLM}^{-1}$$

Detrimento por unidad de dosis efectiva (B) → Datos Hiroshima Nagasaki
Experimentos en animales

$$\text{Público } 7.3 \cdot 10^{-5} \text{ mSv}^{-1}$$

$$\text{Trabajadores } 5.6 \cdot 10^{-5} \text{ mSv}^{-1}$$

Coeficientes de conversión a dosis efectiva

$\text{Público } 3.88 \text{ mSv WLM}^{-1} = 6.09 \text{ nSv por Bq m}^{-3} \text{ h}$
$\text{Trabajadores } 5.06 \text{ mSv WLM}^{-1} = 7.95 \text{ nSv por Bq m}^{-3} \text{ h}$

Para convertir a exposición a gas radón hay que conocer F (medida/bibliografía)

$$\text{Ej. } F = 0.4 \quad 2.4 \text{ nSv por Bq m}^{-3} \text{ h (público)}$$

Riesgos para la salud

Modelo dosimétrico

Estimación de la dosis por unidad de exposición
a partir de modelo de las vías respiratorias

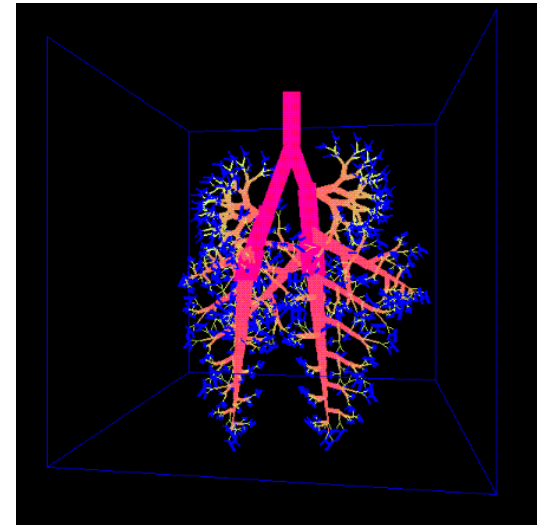
Periodo de retención de descendientes

Factor de ponderación de la radiación alfa

Sensibilidad tejido pulmonar

Factores de ponderación de cada región

Funciones de probabilidad



Aplicado a las condiciones de mineros (Birchall 1994) 15 mSv WLM⁻¹

Aplicado a las condiciones de viviendas (Marsh 2002) 12 mSv WLM⁻¹

Riesgos para la salud

Influencia de fracción libre y factor de equilibrio

A partir de medidas de aerosoles en viviendas
(Marsh y Birchall 1998)

$$\text{mSv WLM}^{-1} = 11.3 + 43 f_p \text{ o también}$$

$$\text{nSv por Bq m}^{-3} \text{ h} = F (17.82 + 67.51 f_p)$$

Para valores típicos $f_p = 0.08$ y $F = 0.4$



$$14 \text{ mSv WLM}^{-1} = 9 \text{ nSv por Bq m}^{-3} \text{ h}$$

El factor de equilibrio F es determinante
y se relaciona inversamente con la fracción libre f_p

ESTIMACIÓN DE LA DOSIS EFECTIVA POR UNIDAD DE EXPOSICIÓN

- Estimación mediante estudios dosimétricos (ICRP 66)

Para miembros del público

$$E = 11.3 + 43 f_p \approx 15 \text{ mSv por WLM}$$

- Estimación mediante estudios epidemiológicos (ICRP 65)

Para trabajadores

$$E = \frac{3 \cdot 10^{-4} \text{ por WLM}}{5.6 \cdot 10^{-5} \text{ por mSv}} = 5.06 \text{ mSv por WLM}$$

95% factor corrector

Para miembros del público

$$E = \frac{3 \cdot 10^{-4} \text{ por WLM}}{7.3 \cdot 10^{-5} \text{ por mSv}} = 3.88 \text{ mSv por WLM}$$

- Estimación por unidad de exposición a radón (miembros del público)

ICRP 66

$$1 \text{ Bq m}^{-3} \text{ h}_{\text{radón}} = F \cdot 1.57 \cdot 10^{-6} \text{ WLM}$$

ICRP 65

$$E = 1.57 F (11.3 + 43 f_p) \text{ nSv por Bq m}^{-3} \text{ h}$$

$$E = 6.09 F \text{ nSv por Bq m}^{-3} \text{ h}$$

Riesgos para la salud

Aproximación
dosimétrica



Aproximación
epidemiológica

~Factor 3

Modificar algunos factores de ponderación usados por ICRP

- Pulmón (0.12 a 0.04)
- Partículas alfa (20 a 7)
- Regiones pulmonares

Cambios significativos en la
dosimetría de otros radionucleidos

En la actualidad (ICRP 2012)

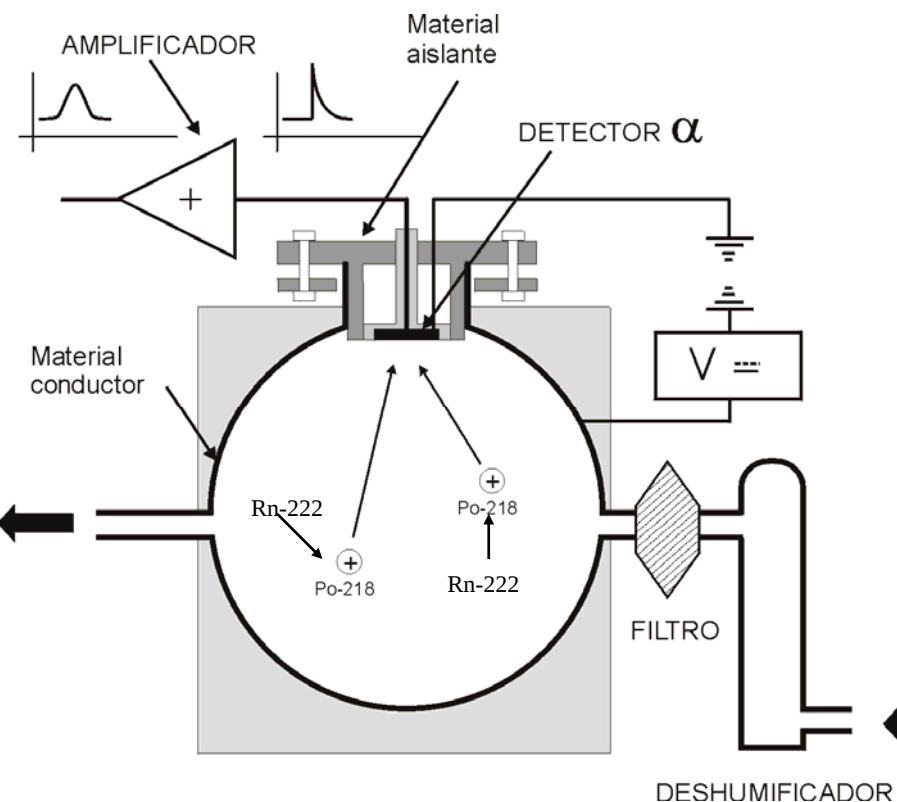
- Detrimento por exposición a Rn: $5 \cdot 10^{-4} \text{ WLM}^{-1}$
- **Publico:** 9 mSv / WLM
- **Trabajadores:** 12 mSv / WLM

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LA CÁMARA DE RADÓN DEL INTE-UPC

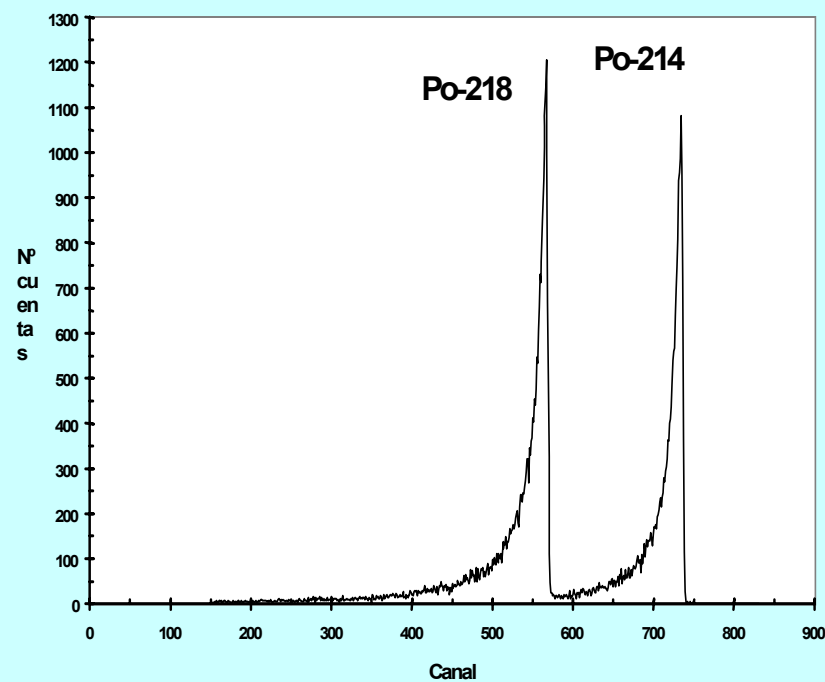
Tamaño	2.91×2.91×2.30 (20 m ³)
Material de construcción	Láminas de acero de 2mm de grosor
Exhalación de ²²²Rn	0-256 Bq·min ⁻¹ (2101 KBq ²²⁶ Ra)
Ventilación	0-6 m ³ ·h ⁻¹
Concentración de radón	0-80000 Bq·m ⁻³
Humedad relativa	15-95 %
Temperatura	5-50 °C

SISTEMA DE MEDIDA CONCENTRACIÓN RADÓN

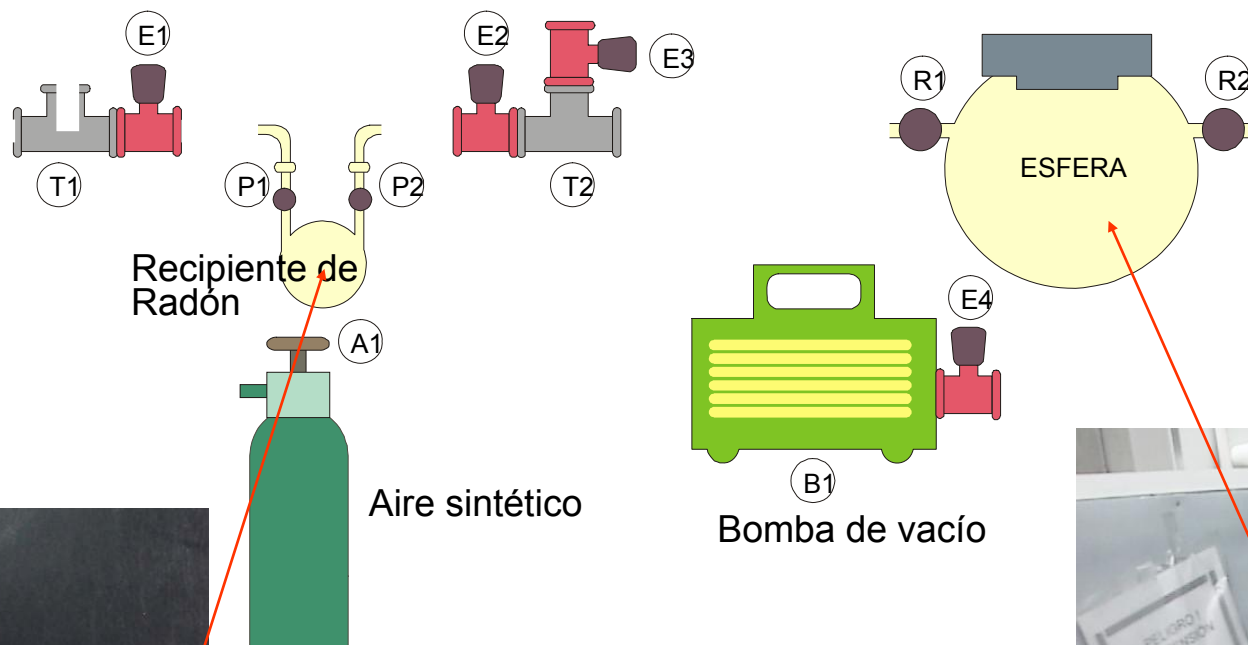
Esquema de funcionamiento



Espectro alfa característico



TRAZABILIDAD DEL SISTEMA DE MEDIDA DE RADÓN

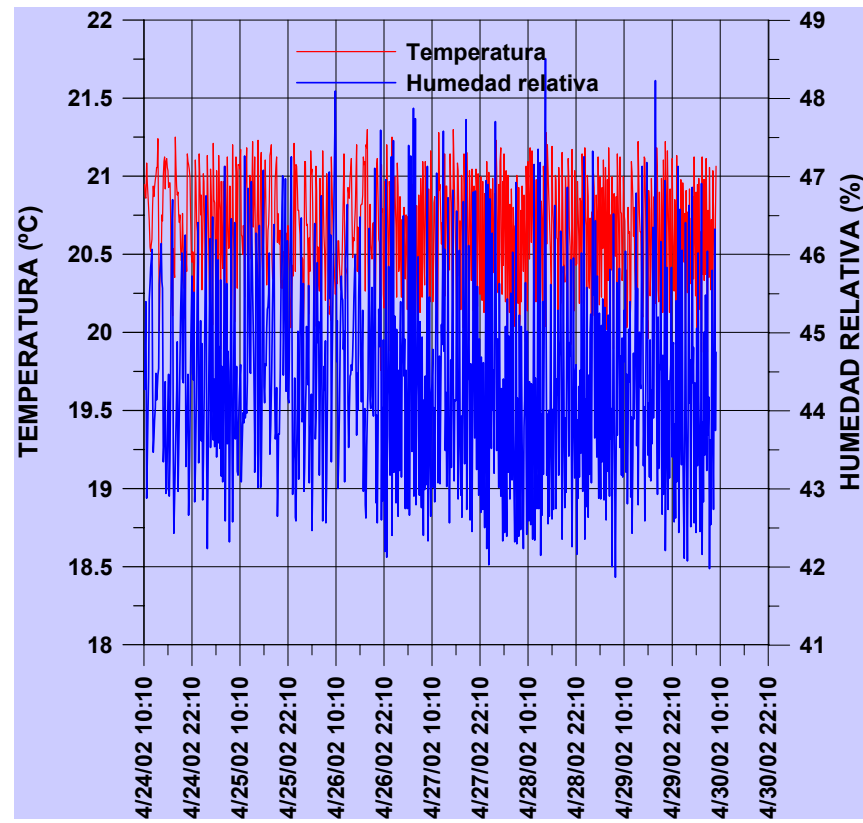
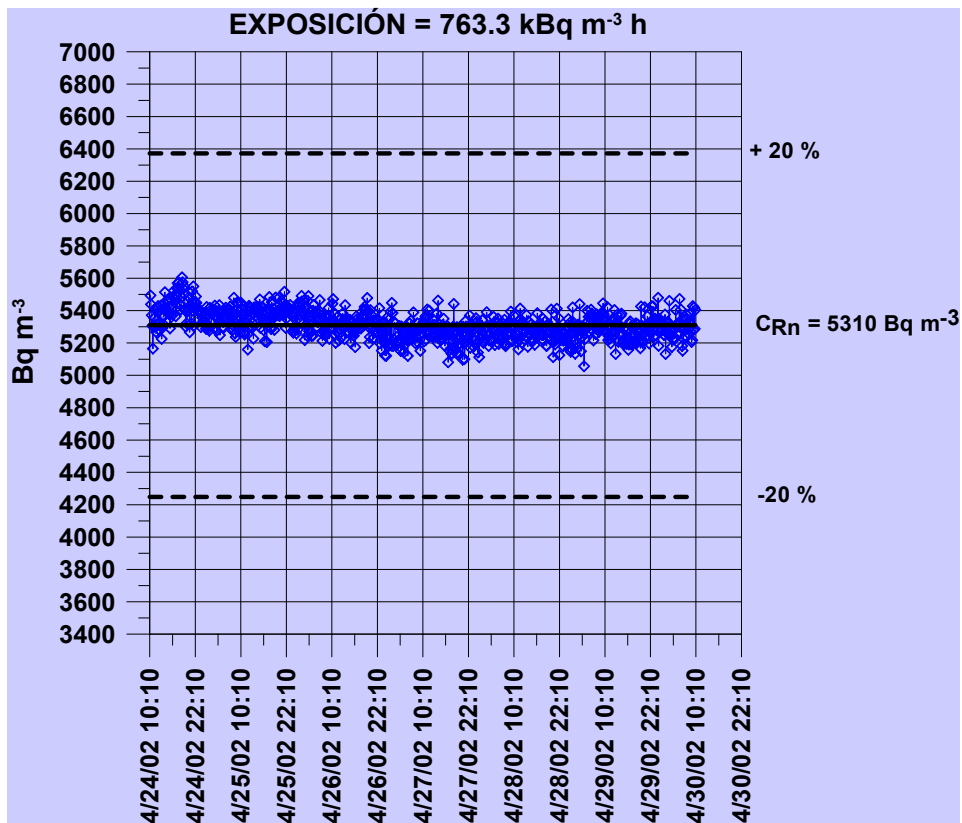


**Recipiente con
Actividad de referencia**

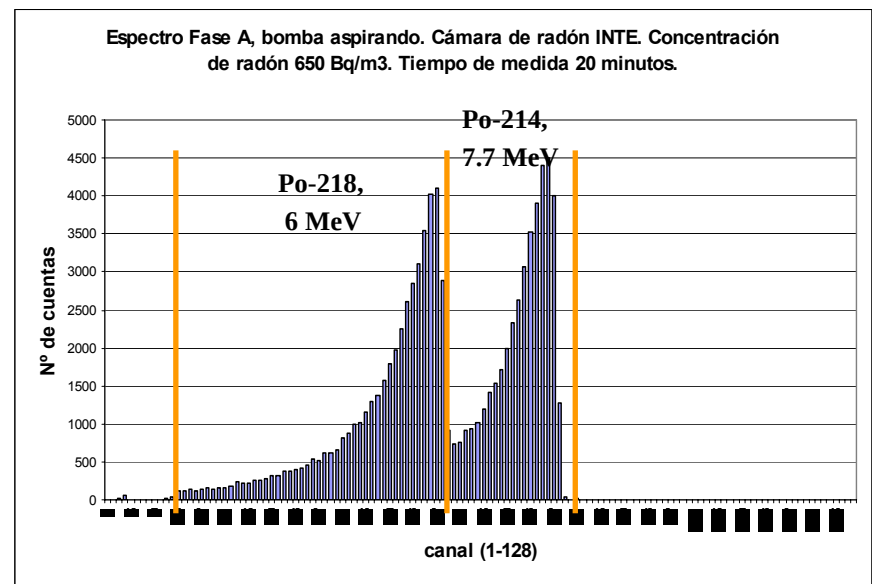
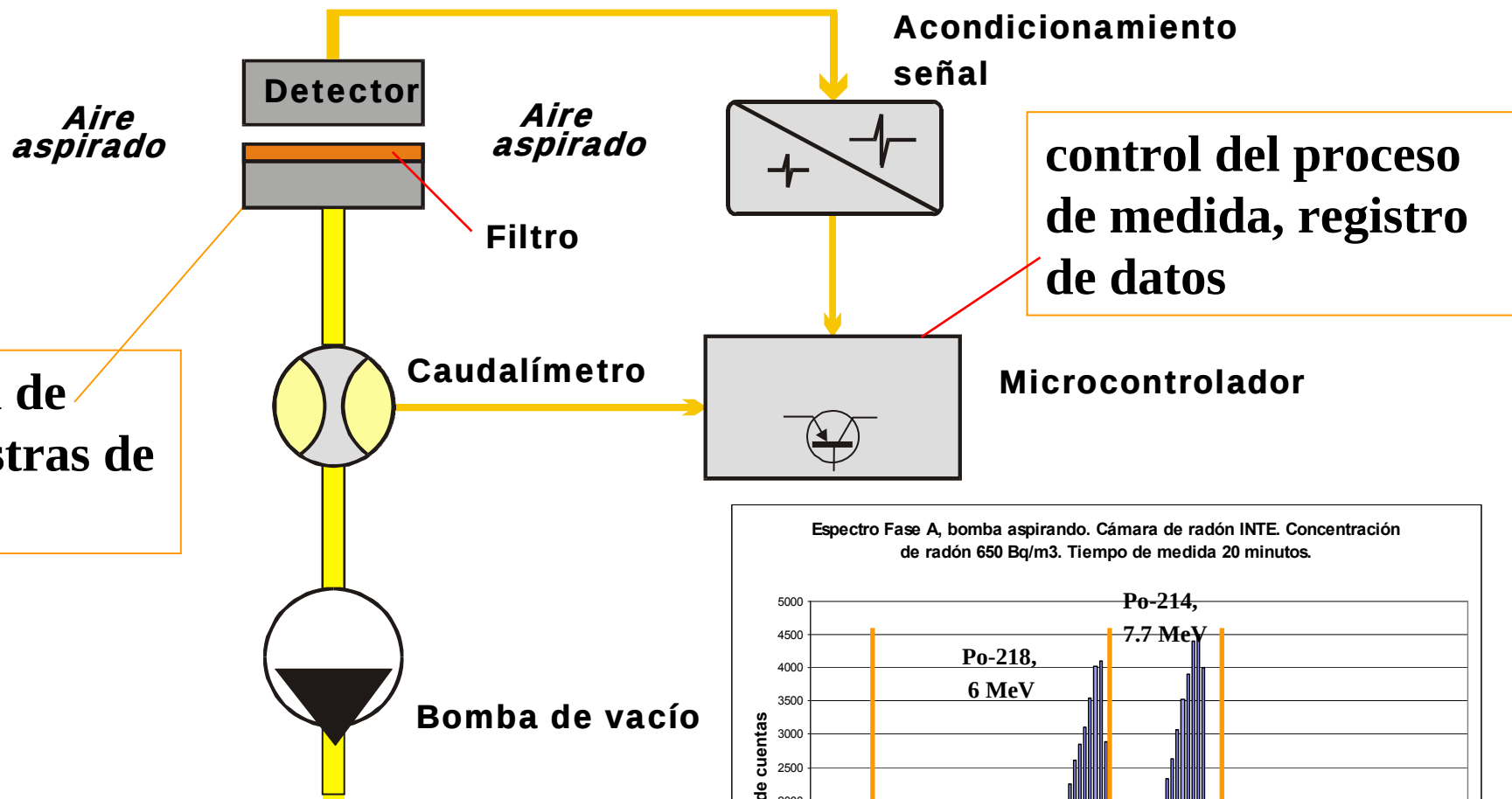
Sistema de medida patrón



MEDIDAS CÁMARA DE RADÓN DEL INTE-UPC



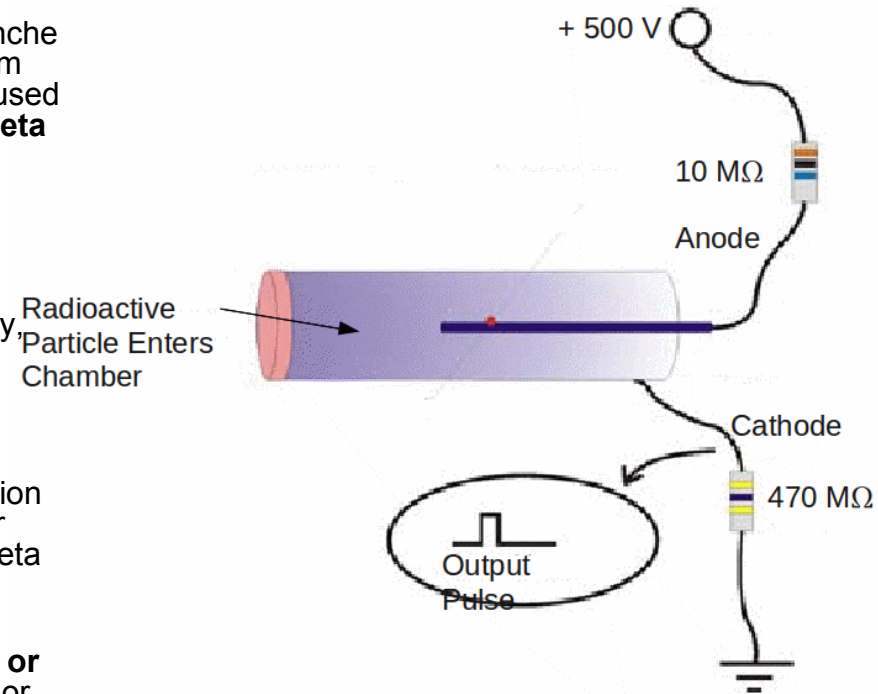
SISTEMA DE MEDIDA DESCENDIENTES



Detector
Geiger – Mueller
(recordatorio)

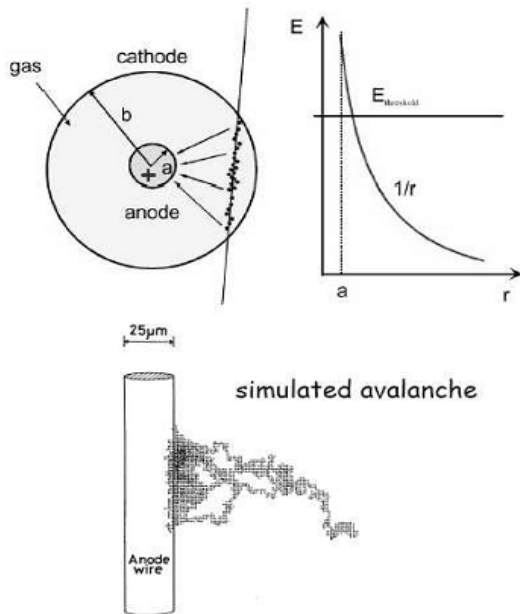
G-M

- The **Geiger–Müller tube** (or **G-M tube**) is the sensing element of the Geiger counter instrument used for the detection of ionizing radiation. It was named after Hans Geiger who invented the principle in 1908, and Walther Müller who collaborated with Geiger in developing the technique further in 1928 to produce a practical tube that could detect a number of different radiation types.
- It is a gaseous ionization detector and uses the Townsend avalanche phenomenon to produce an easily detectable electronic pulse from as little as a single ionising event due to a radiation particle. It is used for the detection of **gamma radiation, X-Rays, and alpha and beta particles**. It can also be adapted to detect neutrons. The tube operates in the "Geiger" region of ion pair generation.
- Whilst it is a **robust and inexpensive detector**, it is unable to measure high radiation rates efficiently, has a finite life in high radiation areas and is unable to measure incident radiation energy, so no spectral information can be generated and there is no discrimination between radiation types.
- Geiger detectors are still used as a **general purpose alpha/beta portable Radioactive contamination measurement** and detection instrument, owing to their relatively low cost, robustness and their relatively high detection efficiency; particularly with high energy beta particles.
- However **for discrimination between alpha and beta particles or provision of particle energy information**, scintillation counters or proportional counters must be used. These instrument types can also have much larger detector areas, which means that checking of surfaces for contamination is much quicker



Cámaras gaseosas de avalancha

En protección radiológica es habitual usar detectores en modo pulsado para poder medir fondos de radiación de baja tasa de dosis. Una de los primeros detectores que se desarrollaron para estas medidas fueron los contadores gaseosos usando el modo de avalancha proporcional o no (Geiger).



Supongamos una cámara de geometría cilíndrica donde hemos colocado un hilo metálico de radio b mientras que el volumen de gas se encierra en un cilindro de radio a . El campo eléctrico del detector será

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(b/a)}$$

Si aumentamos el voltaje V , en las cercanías del hilo el campo eléctrico es tan intenso que entre dos colisiones los electrones se aceleran lo suficiente para alcanzar energías superiores a la necesaria para la ionización del gas ($E_{threshold}$). El proceso es exponencial!!

$$dn = \alpha(E) n dx$$

El coeficiente alpha se conoce como primer coeficiente de Townsend

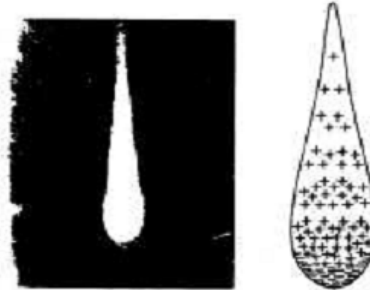
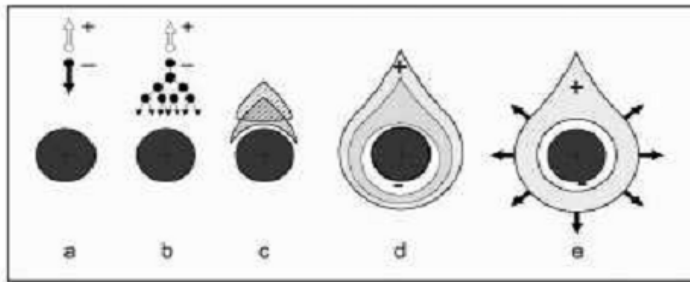
$$Q = e n_0 G; \quad G = \exp \left[\int_a^{r_c} \alpha(r) dr \right]$$

Ejemplo: Argon a 100 eV se obtiene que $\alpha \sim 1 \mu\text{m}^{-1}$

En general la ganancia crece exponencialmente con el voltaje hasta que se producen descargas en el detector y/o efecto de carga espacial (límite de Roether). Los valores límite de ganancia proporcional suelen ser inferiores a 10^5

Cámaras gaseosas de avalancha

Dependiendo del tipo de gas en la formación de la avalancha no sólo participan los procesos de ionización por colisión sino también la fotoionización por la emisión de luz de estados excitados de los átomos del medio. Si queremos mantener una resolución en energía razonable para todo tipo de interacciones, el volumen de avalancha debe ser muy pequeño comparado con el de deriva.



El modelo de gota para el desarrollo de una avalancha en un detector gaseoso alrededor de un hilo (obsérvese la imagen real de una cámara de niebla)

La avalancha en modo proporcional se produce muy cerca del ánodo, (orden $10\mu\text{m}$) por lo que los electrones son recogidos casi instantáneamente (orden 1ns). Pero recorren muy poca distancia!! La señal está dominada por los iones 1000 veces más lentos!! Normalmente no podemos usar pulsos tan largos. Sólo aprovechamos una fracción de la señal!!

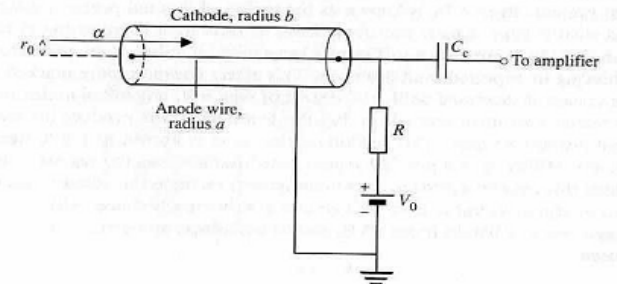
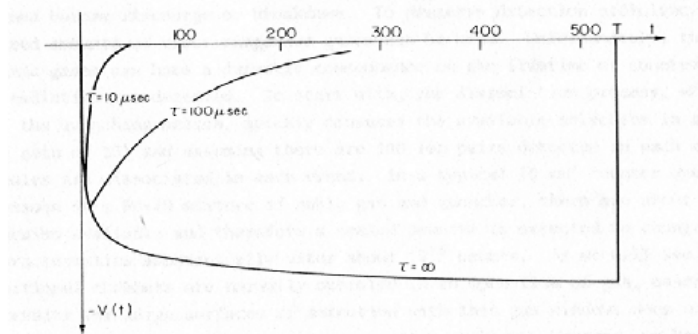
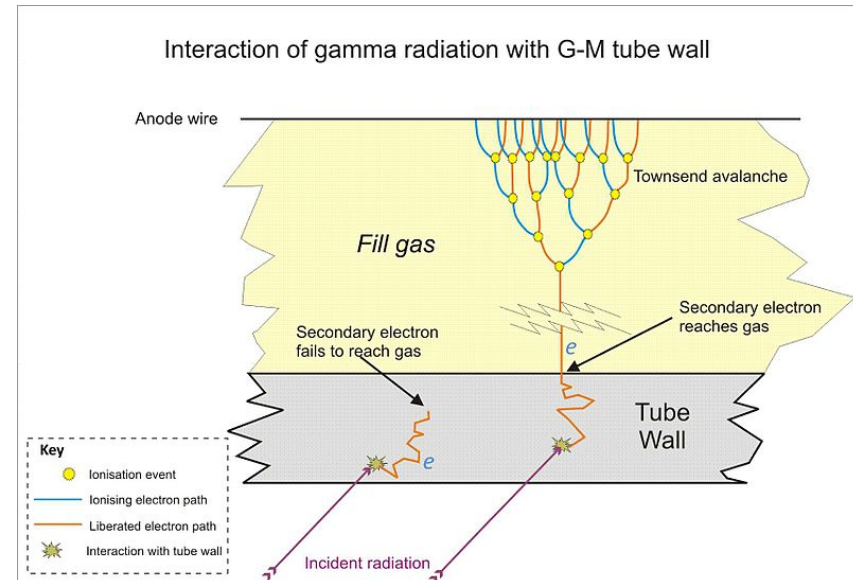
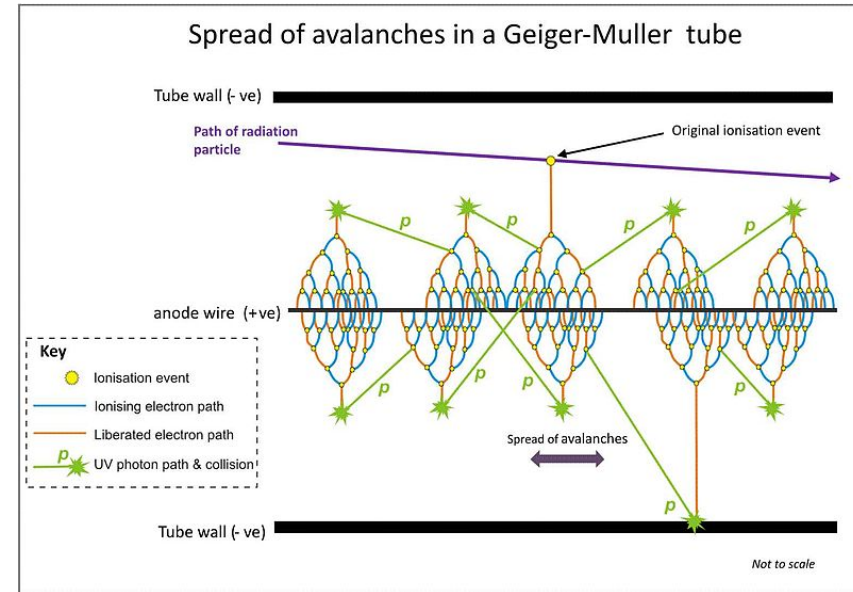


Figure 3.11 Proportional counter (schematic).

La gráfica de desarrollo temporal de señal corresponde a un contador proporcional con Ar donde $a=10\mu\text{m}$ y $b=8\text{mm}$, $V=3\text{kV}$. El tiempo total de deriva de iones es de $550\mu\text{s}$. Después de 700ns tendremos el 50% de la señal. (Sauli Cern 77-09)

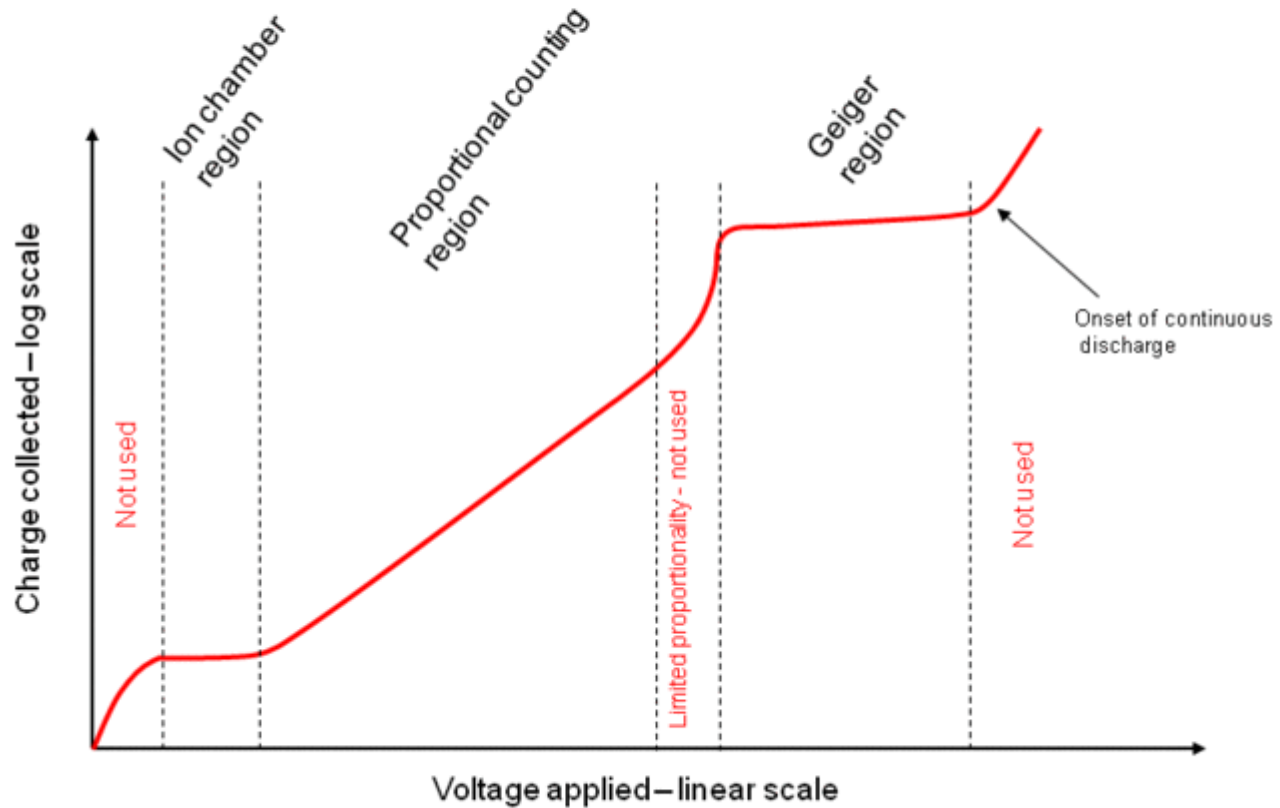
Principio de funcionamiento

- The tube consists of a **chamber filled with a low-pressure (~0.1 atm) inert gas**. This contains **two electrodes**, between which there is a **potential difference of several hundred volts**. The **walls** of the tube are either metal or have their inside surface coated with a conductor to form the **cathode**, while the **anode is a wire** in the centre of the chamber. When **ionizing radiation** strikes the tube, some molecules of the fill gas are ionized, either directly by the incident radiation or indirectly by means of secondary electrons produced in the walls of the tube. **This creates positively charged ions and electrons**, known as **ion pairs**, in the gas. The strong electric field created by the tube's electrodes accelerates the positive ions towards the cathode and the electrons towards the anode. Close to the anode in the "avalanche region" the electrons gain sufficient energy to ionize additional gas molecules and create a large number of electron **avalanches** which spread along the anode and effectively throughout the avalanche region. This is the **"gas multiplication" effect** which gives the tube its key characteristic of being able to produce a significant output pulse from a single ionising event.
- If there were to be only one avalanche per original ionising event, then the number of excited molecules would be in the order of 10^6 to 10^8 . However the production of **multiple avalanches** results in an increased multiplication factor which can produce **10^9 to 10^{10} ion pairs**. The creation of multiple avalanches is **due to the production of UV photons** in the original avalanche, which are not affected by the electric field and move laterally to the axis of the anode to instigate further ionising events by collision with gas molecules. These collisions produce further avalanches, which in turn produce more photons, and thereby more avalanches in a chain reaction which spreads laterally and radially through the fill gas and envelopes the anode wire. The accompanying diagram shows this graphically. The **speed of propagation of the avalanches is typically 2–4 cm per microsecond**, so that for common sizes of tubes the complete ionisation of the gas around the anode takes just a **few microseconds**. This short, intense pulse of current can be measured as a *count event* using the voltage developed across an external electrical resistor and can be in the order of volts, thus making further electronic processing simple.
- The **discharge is terminated by the collective effect of the positive ions** created by the avalanches. These ions have lower mobility than the free electrons due to their higher mass and remain in the area of the anode wire. This creates a "space charge" which counteracts the electric field which is necessary for continued avalanche generation. For a particular tube geometry and operating voltage this termination always occurs when a certain number of avalanches have been created, **therefore the pulses from the tube are always of the same magnitude regardless of the energy of the initiating particle**.
- Pressure of the fill gas is important** in the generation of avalanches. Too low a pressure and the efficiency of interaction with incident radiation is reduced. Too high a pressure, and the "mean free path" for collisions between accelerated electrons and the fill gas is too small, and the electrons cannot gather enough energy between each collision to cause ionisation of the gas. The energy gained by electrons is proportional to the ratio " e/p ", where " e " is the electric field strength at that point in the gas, and " p " is the gas pressure.



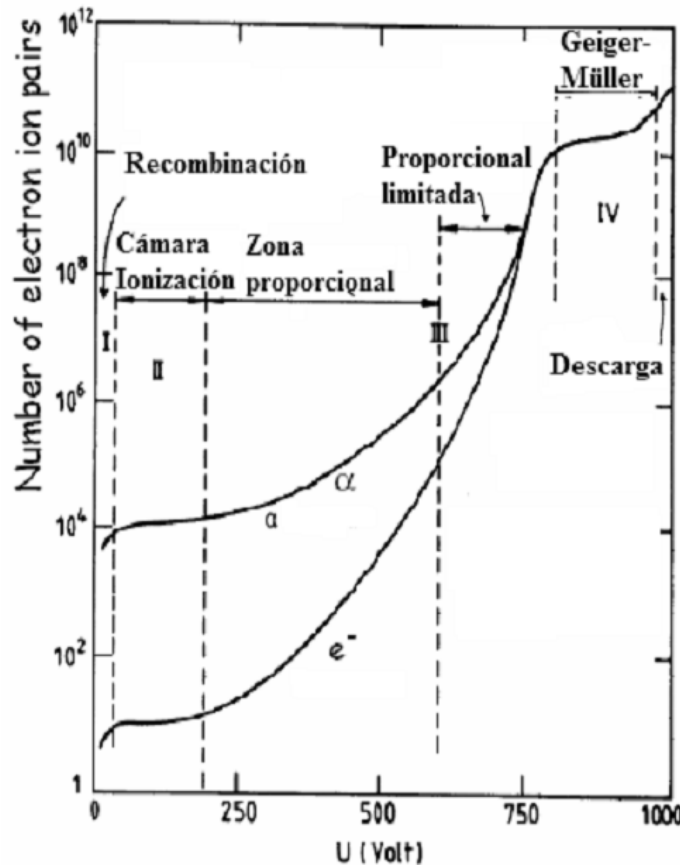
Practical Gaseous Ionisation Detector Regions

Variation of ion pair charge with applied voltage in a wire cylinder system with constant incident radiation.



Cámaras gaseosas de avalancha

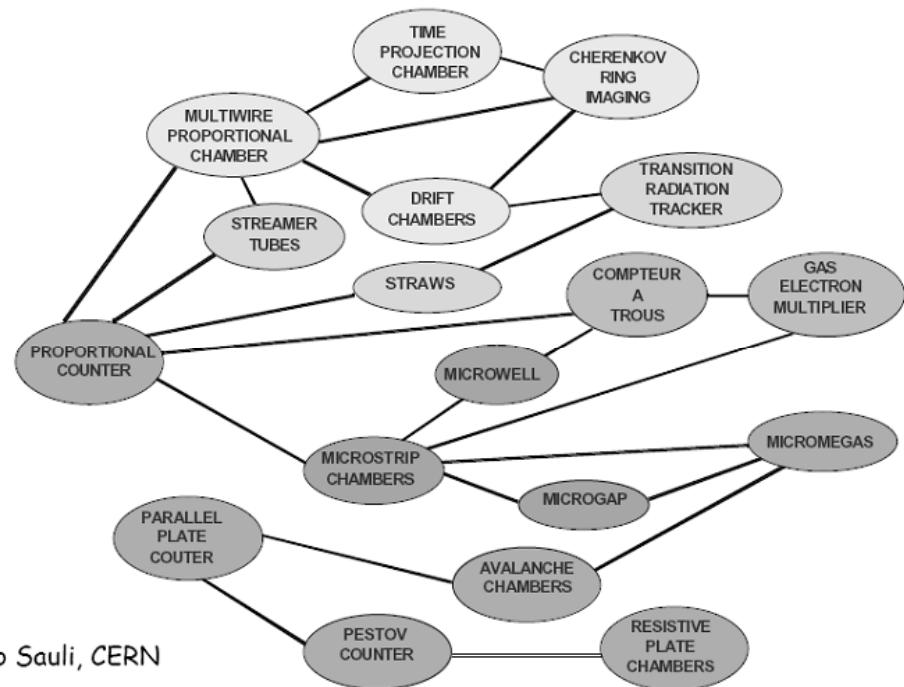
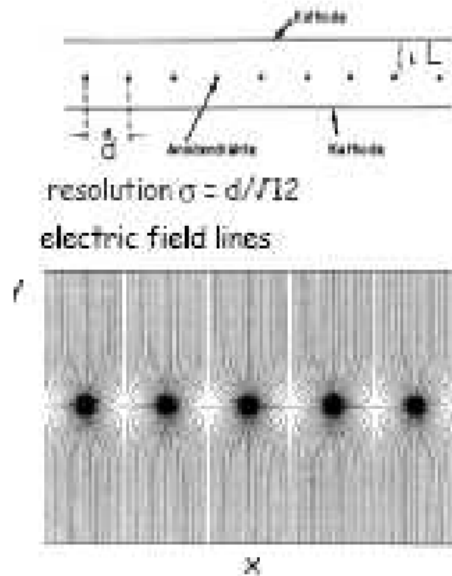
Cuando aumentamos el voltaje de operación en un detector gaseoso nos encontramos en diferentes regimenes de proporcionalidad:



1. Cámara de ionización: A bajo voltaje de operación tendremos una cámara de ionización que recoge la carga primaria producida en el volumen activo del detector. $G=1$
2. Contador proporcional: Una vez que alcanzamos el voltaje crítico se produce multiplicación. La señal detectada es proporcional a la energía depositada. Para mantener la proporcionalidad se necesita controlar el desarrollo por fotoionización de la avalancha. Se utiliza un gas orgánico que absorbe los fotones ultravioleta (el moderador o quencher). Las mezclas usuales son un gas noble con un gas orgánico (i.e. Ar+10% CH₄) $G=10^4$ - 10^5
3. Región de proporcionalidad limitada: se alcanza una gran fotoionización. Para evitar descargas se puede usar HV pulsado. $G=10^9$
4. Modo Geiger-Müller: la avalancha se extiende a todo el ánodo. Fotoionización masiva. La avalancha se detiene por la descarga de HV. Son necesarios moderadores muy eficientes.

Cámaras gaseosas de avalancha

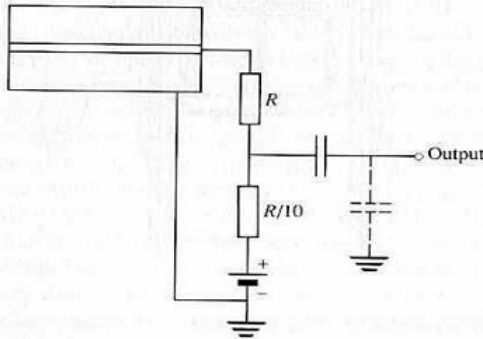
El número de detectores gaseosos ha proliferado durante los últimos 20 años desde las cámaras proporcionales multihilo hasta los detectores gaseosos de microestructura.



Fabio Sauli, CERN

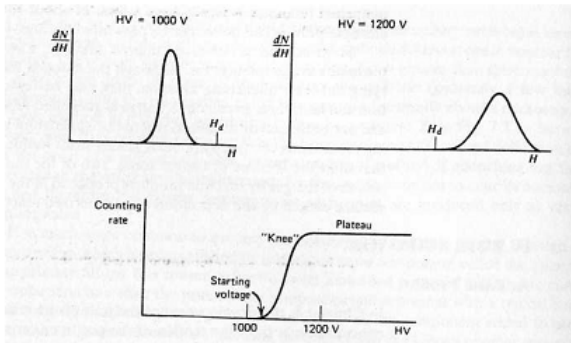
La apuesta de G. Charpak fue la segmentación de los detectores donde cada hilo actúa como un detector individual y el registro electrónico de la señal en tiempo real.

Modo geiger. Tiempo muerto

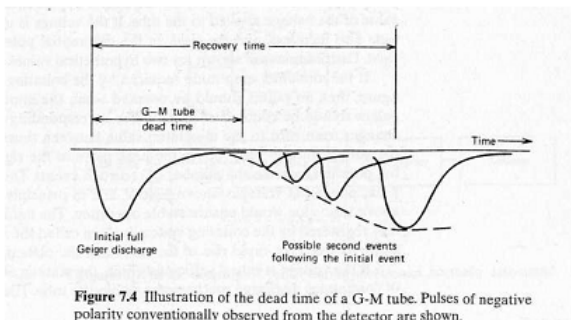


El contador Geiger funciona en base a la descarga en el gas inducida por la ionización primaria de la radiación. Debido al factor de multiplicación la señal directa del contador es tan elevada que no es necesaria electrónica sofisticada de lectura.

Podemos establecer la forma temporal del pulso eléctrico a través del RC del circuito de lectura, pero NO PODEMOS OLVIDAR que la deriva de los iones en el gas limita la respuesta temporal durante el tiempo que se necesita para drenar la carga iónica. Esto es debido al apantallamiento del campo eléctrico por los iones conocido como EFECTO DE CARGA ESPACIAL. Este tiempo es del orden de 50 a 100 μ s.

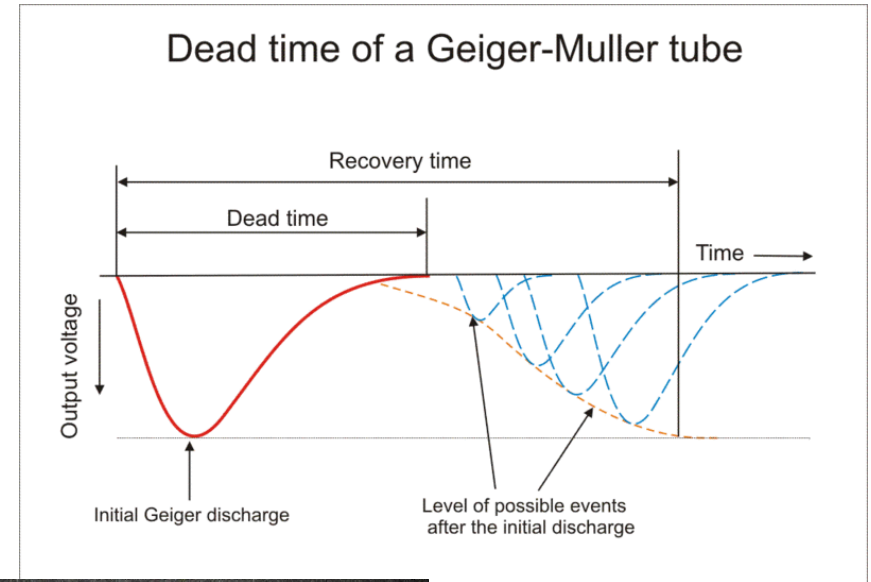


En el funcionamiento del sensor hemos de admitir un cierto tiempo muerto que provoca la ineficiencia de éste inmediatamente después de una señal. Consideremos un intervalo de tiempo unidad en el que se detectan m señales siendo τ el tiempo muerto y n el número real de interacciones



Limitaciones de un GM

- There are two main limitations of the Geiger counter:
 - Because the output pulse from a Geiger-Muller tube is always the same magnitude regardless of the energy of the incident radiation, **the tube cannot differentiate between radiation types**.
 - A further limitation is the **inability to measure high radiation rates due to the "dead time" of the tube**. This is an insensitive period after each ionization of the gas during which any further incident radiation will not result in a count. Typically the dead time will result in an upper count rate limit of 10^4 to 10^5 counts per second depending on the characteristic of the tube being used.
- For alpha particles and low energy beta particles the **"end window" type of GM tube** is used as these particles have a limited range even in free air and are easily stopped by a solid material. The end window is designed to be thin enough to allow these particles through with minimal attenuation, and normally has a density of about 1.5 - 2.0 mg/cm².
- For **efficient detection of alpha particles** the GM tube window should ideally be within 10mm of the radiation source due to the particle attenuation in free air. However, the G-M tube produces a pulse output which is the same magnitude for all detected radiation, so a Geiger counter with an end window tube cannot distinguish between alpha and beta particles. **The "pancake" Geiger-Muller detector** is a variant of the end window probe designed with a larger detection area, and is normally used as an alpha/beta contamination monitor.



Otras características

- **Fold-back**

- One consequence of the dead time effect is the possibility of a high count rate continually triggering the tube before the recovery time has elapsed. This may produce pulses too small for the counting electronics to detect and lead to the very undesirable situation whereby a G-M counter in a very high radiation field is falsely indicating a low level. This phenomenon is known as "fold-back". An industry rule of thumb is that the discriminator circuit receiving the output from the tube should detect down to 1/10 of the magnitude of a normal pulse to guard against this. Additionally the circuit should detect when "pulse pile-up" has occurred, where the apparent anode voltage has moved to a new dc level through the combination of high pulse count and noise. The electronic design of Geiger-Muller counters should be able to detect this situation and give an alarm.

- **Detection efficiency**

- The efficiency of detection of a G-M tube varies with the type of incident radiation. **Tubes with thin end windows have very high efficiencies (can be nearly 100%) for high energy beta**, though this drops off as the beta energy decreases due to attenuation by the window material. Alpha particles are also attenuated by the window. **As alpha particles have a maximum range of less than 50 mm in air, the detection window should be as close as possible to the source of radiation.** The attenuation of the window adds to the attenuation of air, so the window should have a density as low as 1.5 to 2.0 mg/cm² to give an acceptable level of detection efficiency.
- The counting efficiency of **photon radiation (gamma and X-rays above 25 keV) depends on the efficiency of radiation interaction in the tube wall**, which increases with the atomic number of the wall material. Chromium iron is a commonly used material, which gives an efficiency of about 1% over a wide range of energies