



7° Curso de Actualización en Protección Radiológica para Médicos Radioterapeutas



**“RADIACIONES IONIZANTES
PROPIEDADES”**

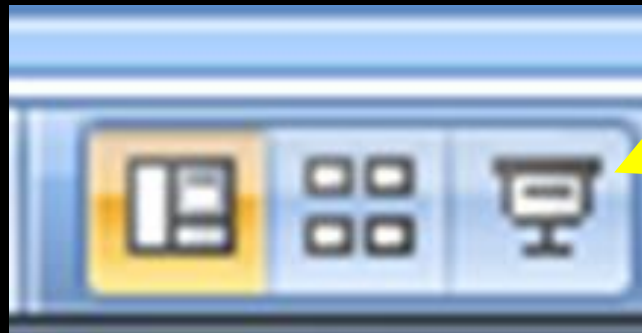
**“MAGNITUDES Y UNIDADES
EN PROTECCION RADIOLOGICA”**

Ing. César F. Arias, M.Sc.

**23, 24 y 25 de Octubre de 2019
AMA - Av. Santa Fe 1171 - Capital Federal**

Esta presentación
contiene efectos de animación.

Para poder apreciarlos
debe verse en la modalidad
"Presentación"
o "Pantalla Completa"



RADIACIONES IONIZANTES PROPIEDADES

MAGNITUDES Y UNIDADES EMPLEADAS EN PROTECCION RADIOLOGICA

César F. Arias
carias@fi.uba.ar

Principales Fuentes de Información

Publicaciones de:

- **Comisión Internacional de Protección Radiológica – ICRP**
- **Comisión Internacional de Unidades de Radiación – ICRU**
- **Comité de Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas - UNSCEAR**

El conocimiento de los efectos de las Radiaciones permite:

Evaluar riesgos de exposición y proteger a las personas.

Emplear radiaciones En Medicina

SE REQUIERE:

Cuantificar la energía de la radiación

Evaluar la absorción de energía

Estructurar conceptos y relaciones dosimétricos

DOSIMETRÍA

La utilidad de las aplicaciones de
de las radiaciones ionizantes proviene
de su **Interacción** con sustancias materiales



**INTERACCION
RADIACION - MATERIA**



**OBTENER
INFORMACIÓN**



**PROVOCAR
MODIFICACIONES**

APLICACIONES MEDICAS

**OBTENER
INFORMACIÓN**



DIAGNÓSTICO

APLICACIONES MEDICAS

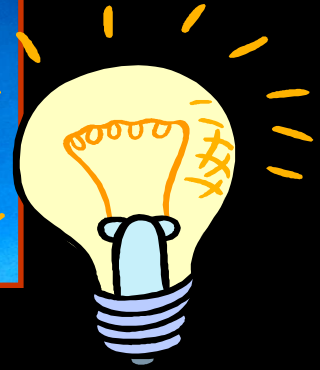
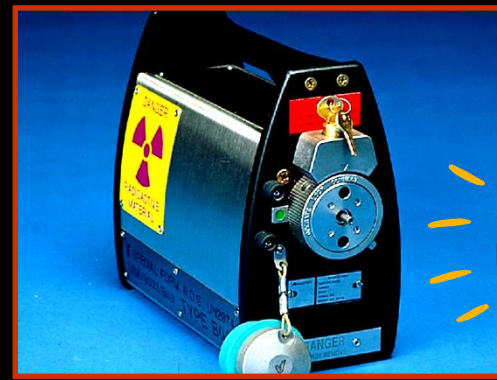
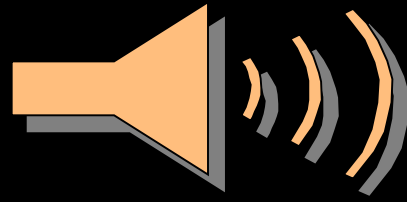


**PROVOCAR
MODIFICACIONES**

TRATAMIENTO

Los efectos de las Radiaciones dependen de:

- Sus características físicas.**
- Sus modalidades de interacción con la materia. Las células en particular.**
- La respuesta biológica de los tejidos.**

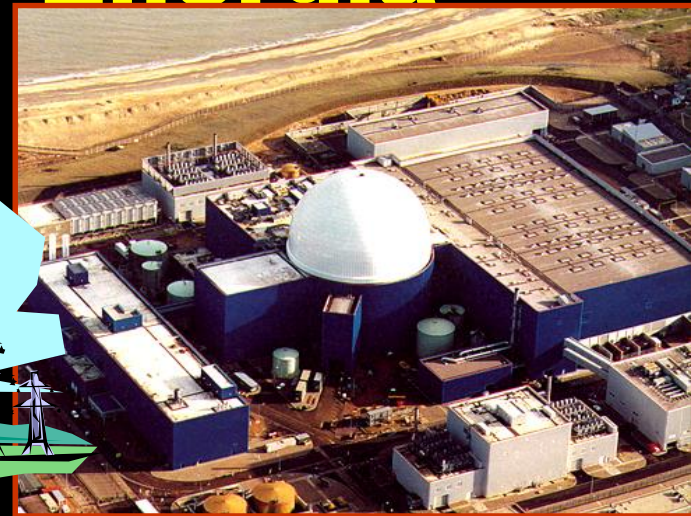
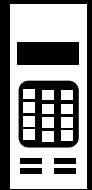


RADIACION:

Emisión

y Propagación

de Energía



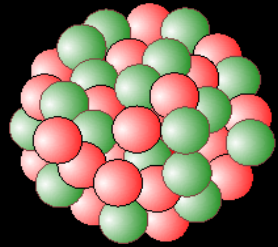
**Consideraremos
Radiaciones
constituidas por:**

PARTÍCULAS SUBATÓMICAS

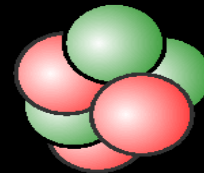
Alfa



Beta



Núcleos



**Fragmentos
de Núcleos**

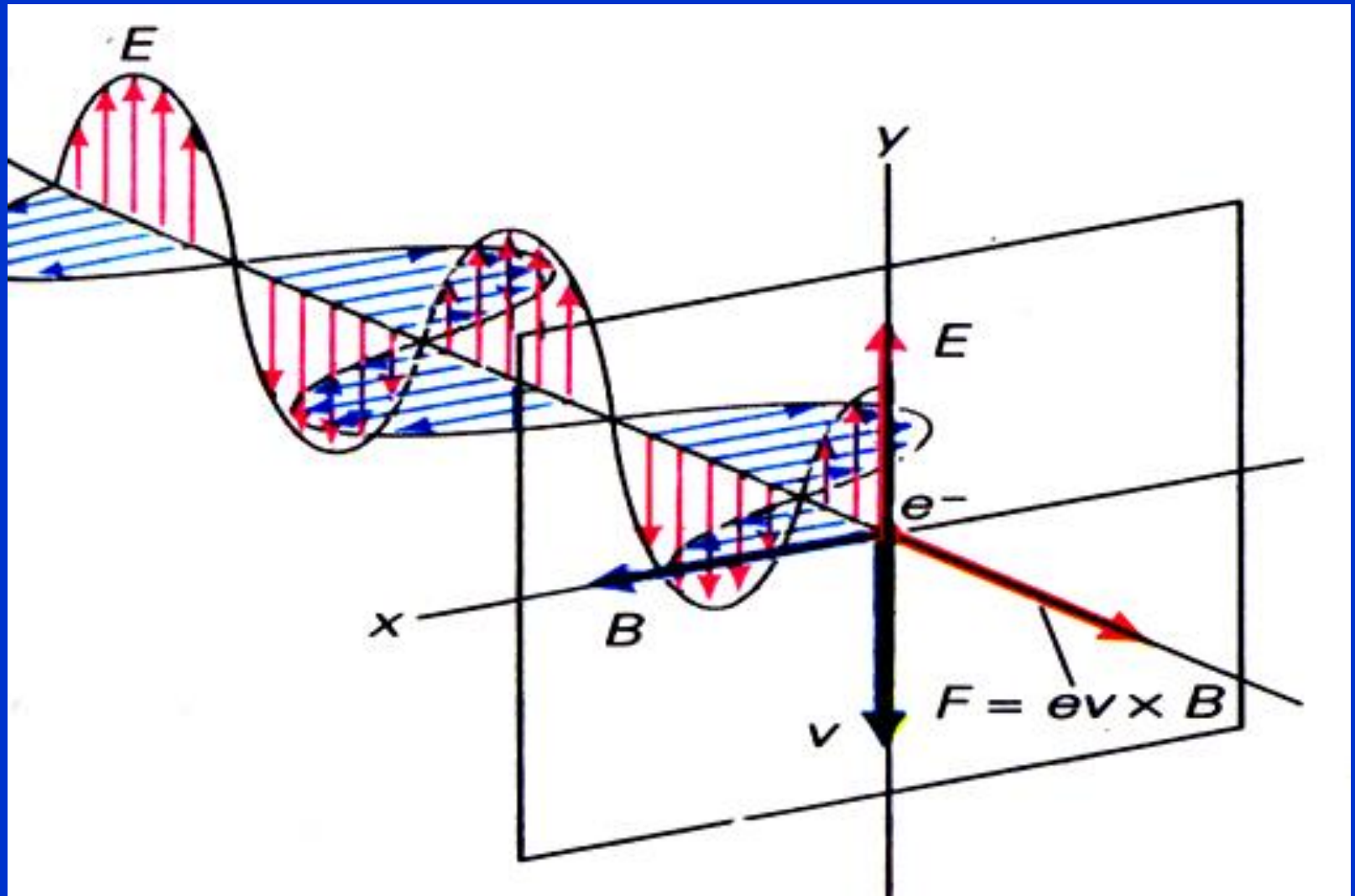


Protón



Neutrón

RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA



Cada partícula transporta **ENERGÍA**
según su masa y velocidad

ENERGÍA CINÉTICA NO RELATIVISTA

$$E = 1/2 m \cdot v^2$$

ENERGÍA CINÉTICA RELATIVISTA

$$E = m_0 c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right]$$

La **RADIACION ELECTROMAGNETICA**

tambien posee una
estructura discontinua.

La energía se transporta
mediante unidades energéticas
denominadas **FOTONES**

La Energía ϵ de cada FOTON

es proporcional a la frecuencia f
de la radiación

ó inversamente proporcional a su
LONGITUD DE ONDA λ

$$\epsilon = h \cdot f$$

$$\epsilon = h \cdot c \cdot / \lambda$$

h : Constante de Plank = $6,62 \cdot 10^{-34}$ Js

**La Energía de las partículas atómicas
se suele expresar
en Electrón Volt (eV)**

$$1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$$

$$1\text{MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Joule}$$

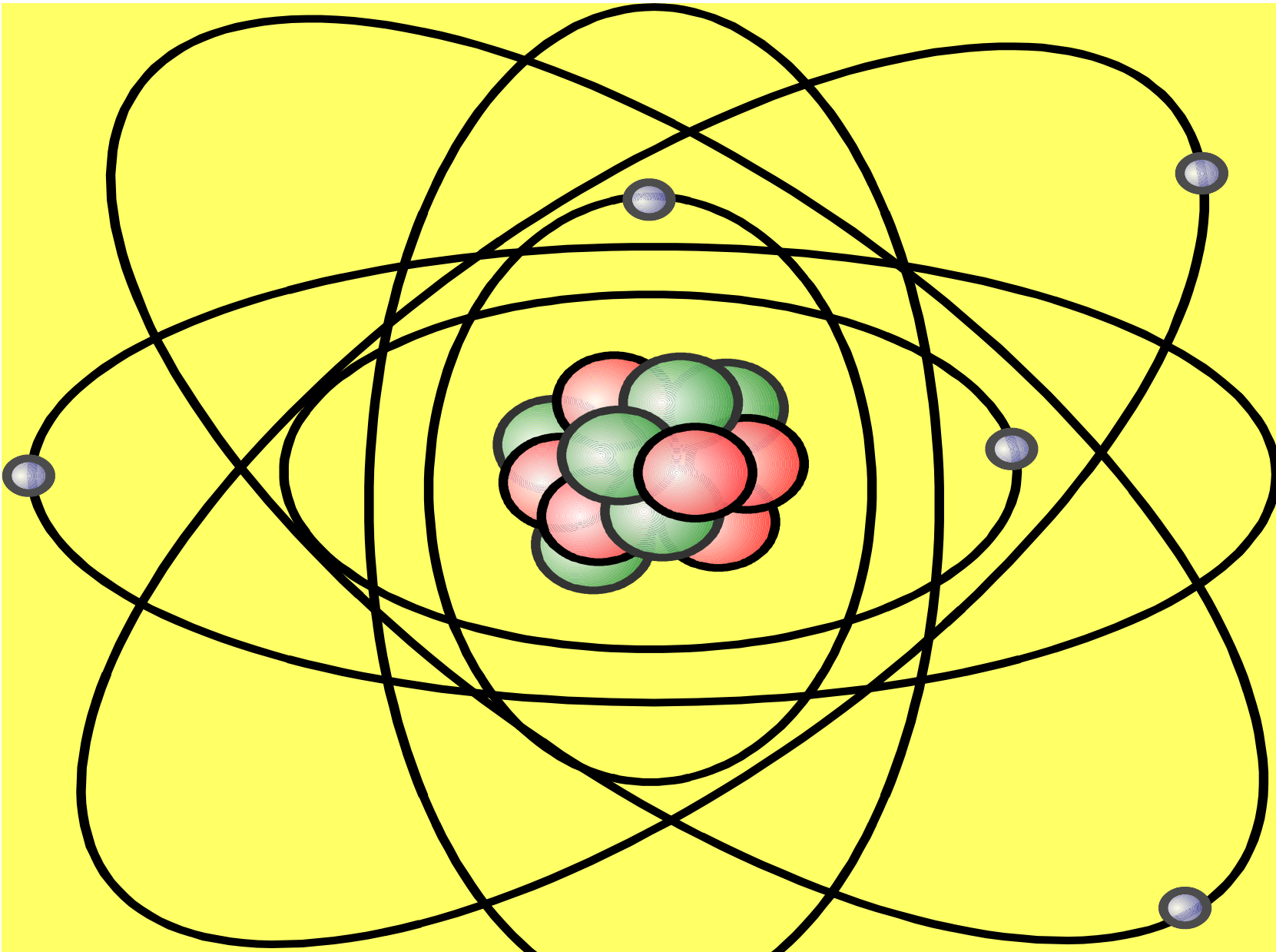
$$1 \text{ J} = 0,625 \times 10^{19} \text{ eV}$$

$$1 \text{ kWh} = 2,25 \times 10^{25} \text{ eV}$$

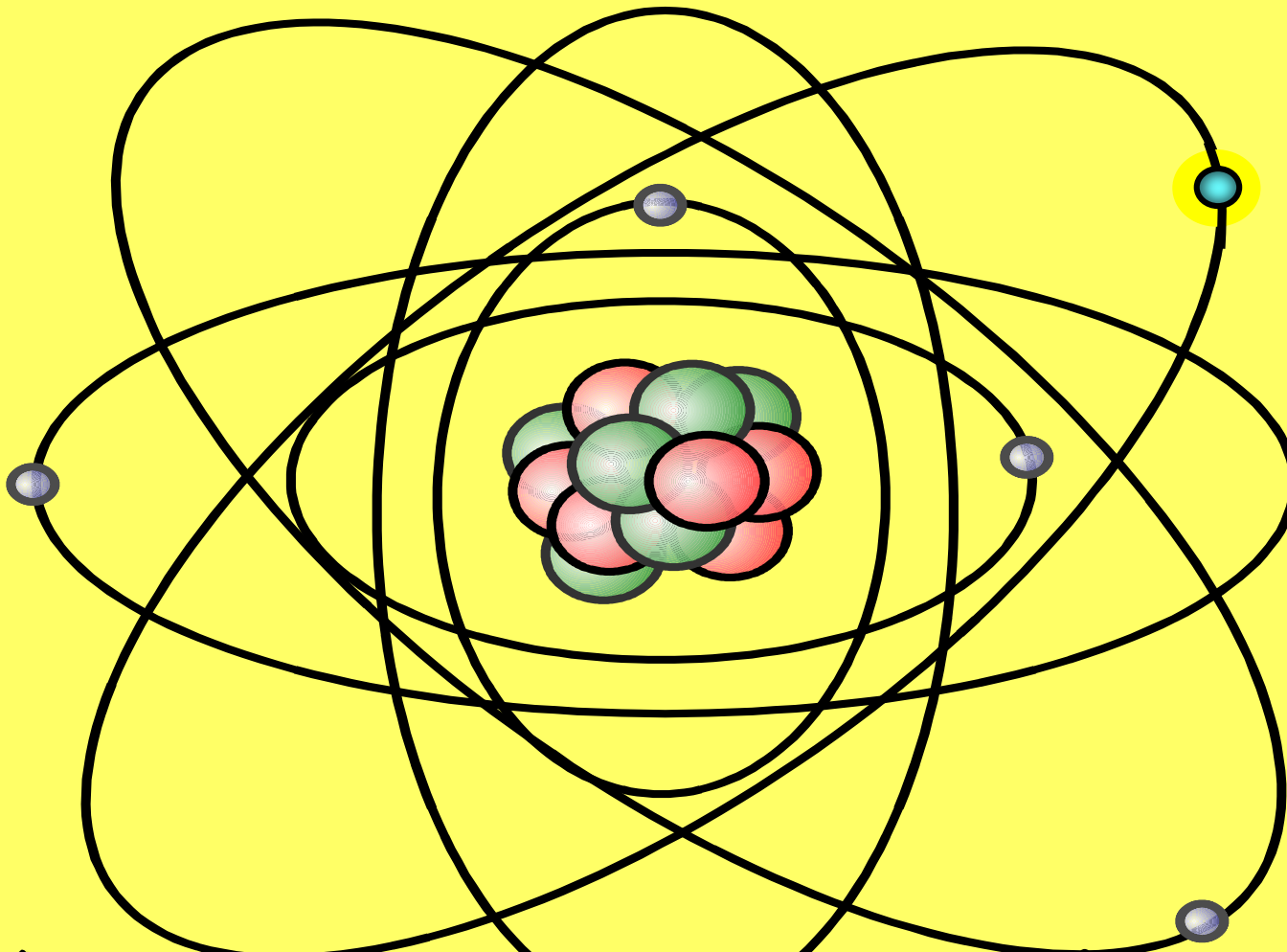
INTERACCION DE RADIACIONES

CON LA MATERIA:

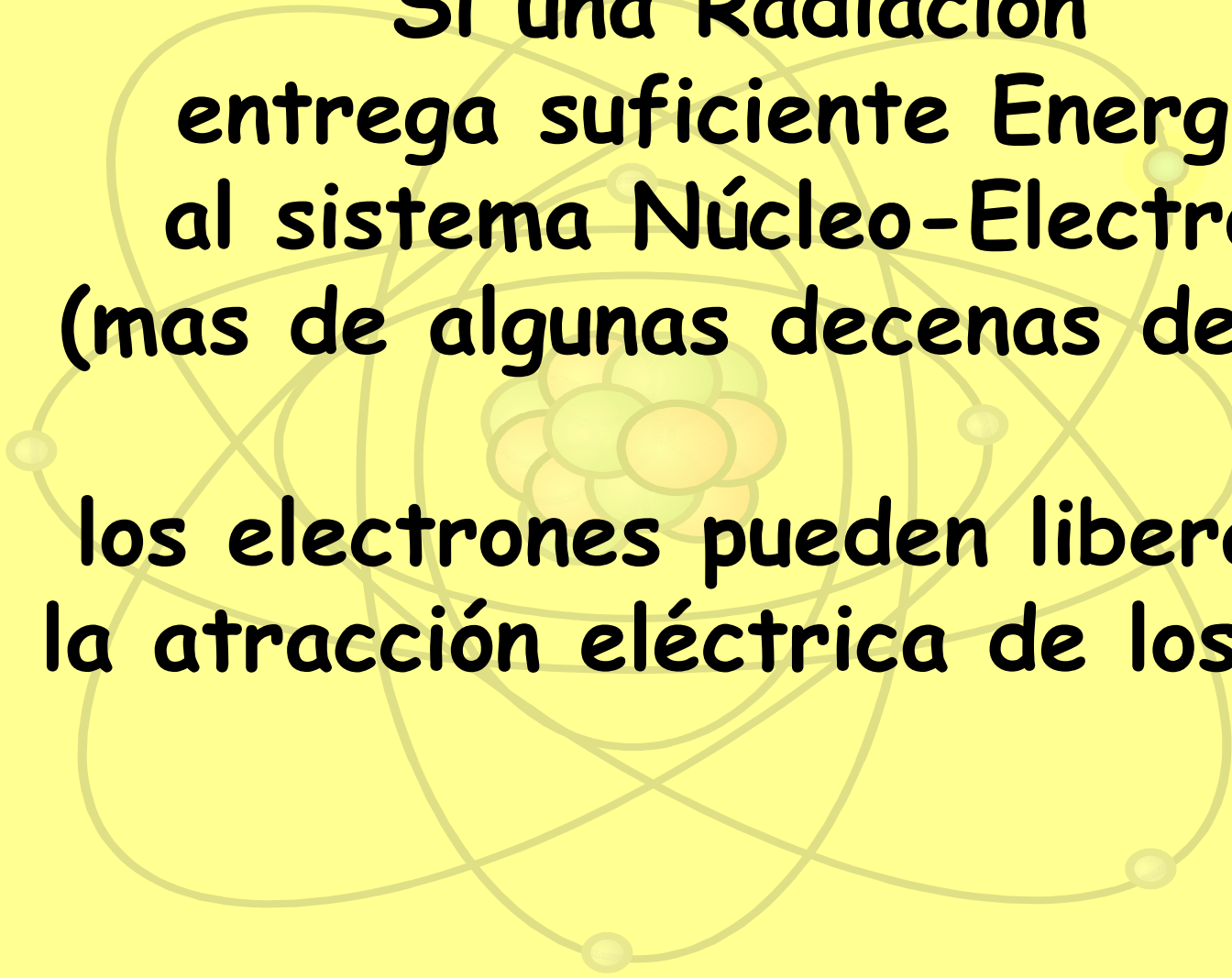
MOLECULAS Y ATOMOS



MODELO ATOMICO
Esquema simplificado



**El Atomo posee tantas cargas positivas (protones)
como negativas (electrones).
NEUTRALIDAD ELECTRICA**



**Si una Radiación
entrega suficiente Energía
al sistema Núcleo-Electrón
(mas de algunas decenas de eV)**

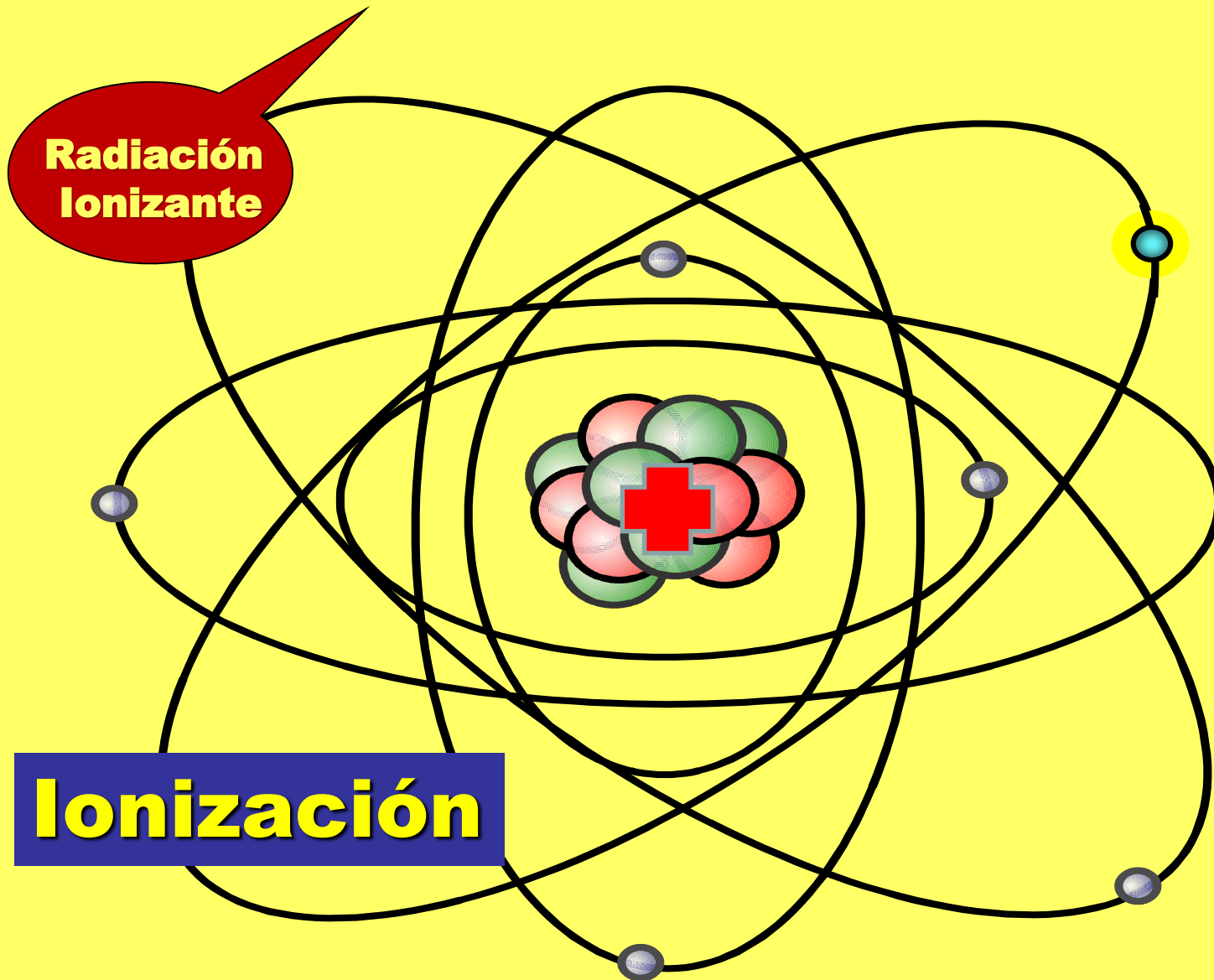
**los electrones pueden liberarse
de la atracción eléctrica de los núcleos**

El proceso se denomina

IONIZACIÓN

Y la Radiación que lo provoca

RADIACION IONIZANTE

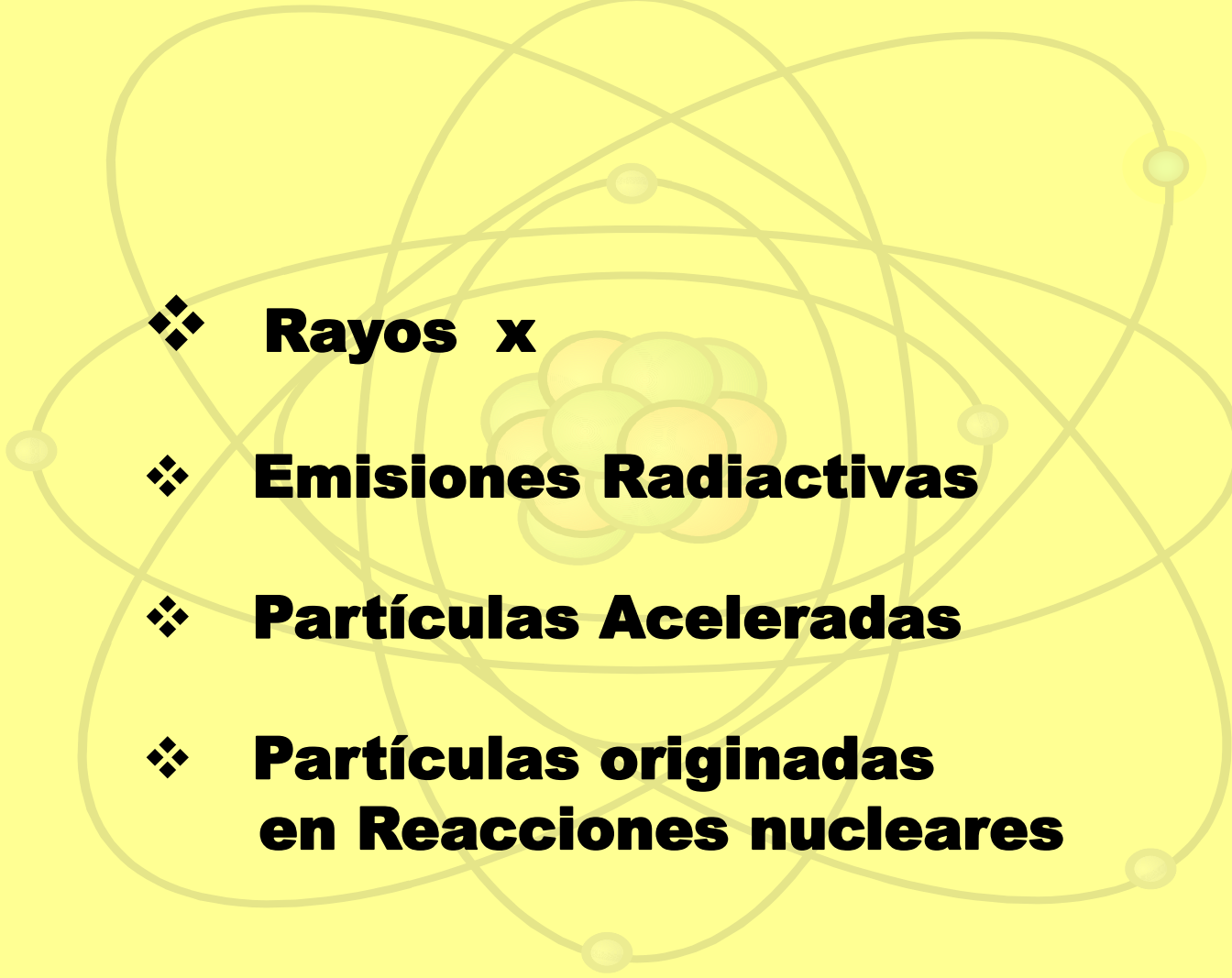


El Atomo pierde un electrón
y queda cargado positivamente

**La neutralidad eléctrica se pierde
Las partículas
(electrón y átomo residual)
quedan con cargas eléctricas
sin neutralizar.**

IONES

Qué Radiaciones son Ionizantes ?

- 
- ❖ **Rayos x**
 - ❖ **Emisiones Radiactivas**
 - ❖ **Partículas Aceleradas**
 - ❖ **Partículas originadas en Reacciones nucleares**

Capacidad Ionizante

Depende de la energía que transporta cada partícula o cada fotón y no de la energía total transportada por el haz de radiación.

Seguidamente se muestran
tres haces de Radiación que transportan
la misma POTENCIA
(energía por unidad de tiempo):
100 Joule / seg = 100 Watt

MICROONDAS:

Cada Fotón transporta una Energía de $1 \mu\text{eV}$

LUZ:

Cada Fotón transporta una Energía de 1eV

RAYOS X DE 1MEV:

Cada Fotón transporta una Energía de 1MeV

MICROONDAS

Cada Fotón transporta una Energía de $1 \mu\text{eV}$

Fluyen: $6,2 \cdot 10^{24}$ Fotones / s

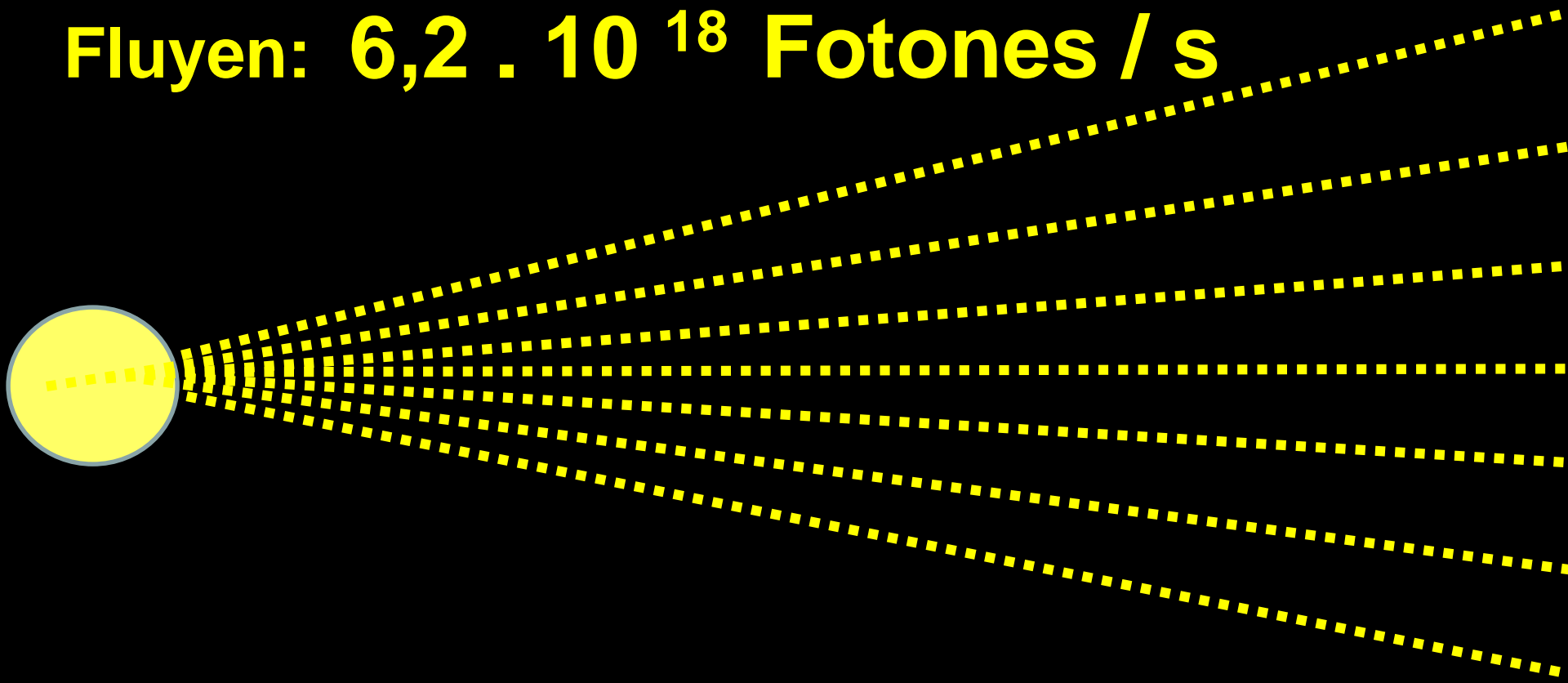


Potencia: $100 \text{ W} = 6,2 \times 10^{20} \text{ eV/s}$

LUZ

Cada Fotón transporta una Energía de 1 eV

Fluyen: $6,2 \cdot 10^{18}$ Fotones / s

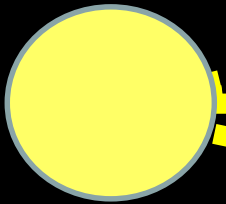


Potencia: $100 \text{ W} = 6,2 \times 10^{20} \text{ eV/s}$

Rayos X

Cada Fotón transporta una Energía de 1 MeV

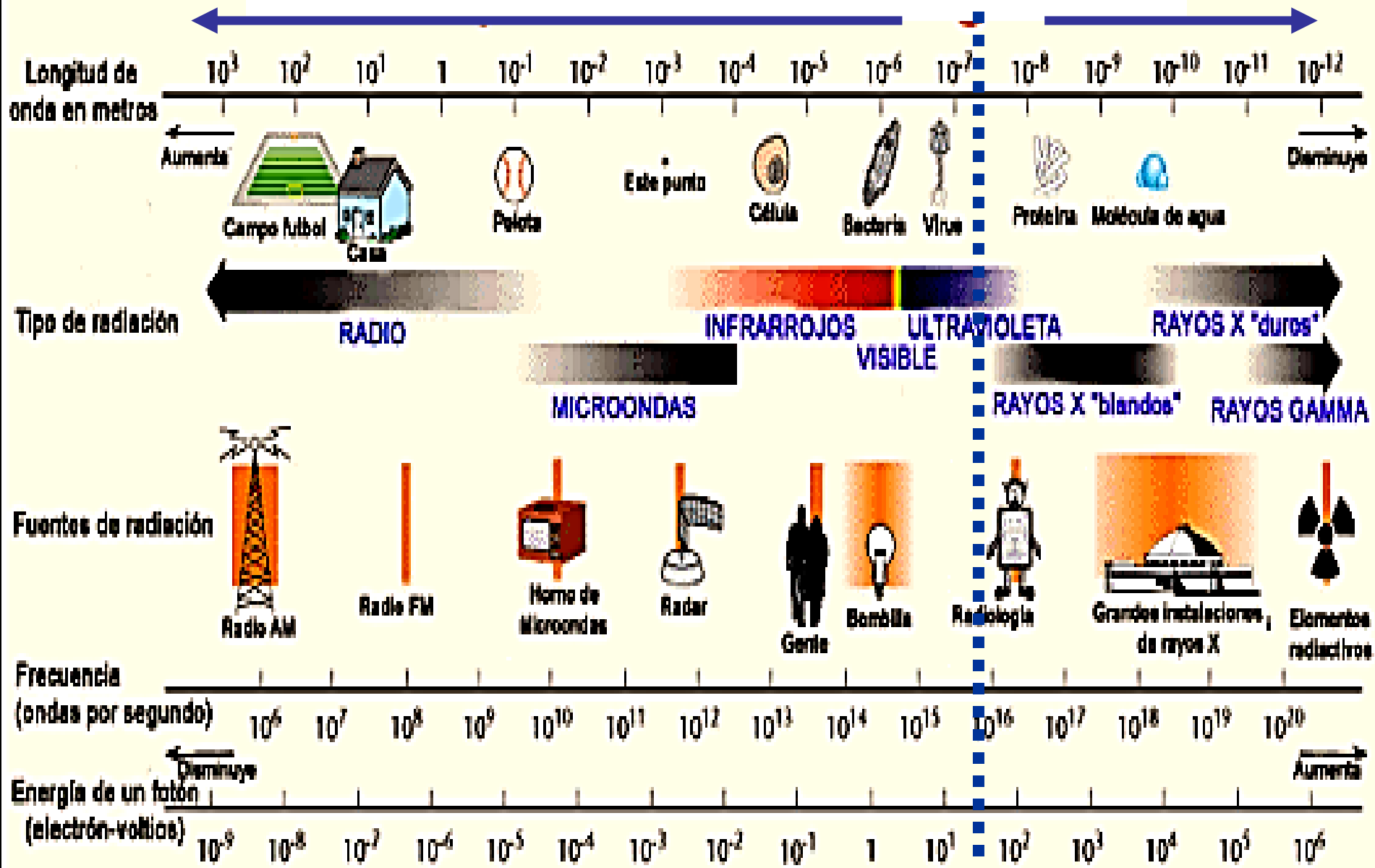
Fluyen: $6,2 \cdot 10^{12}$ Fotones / s

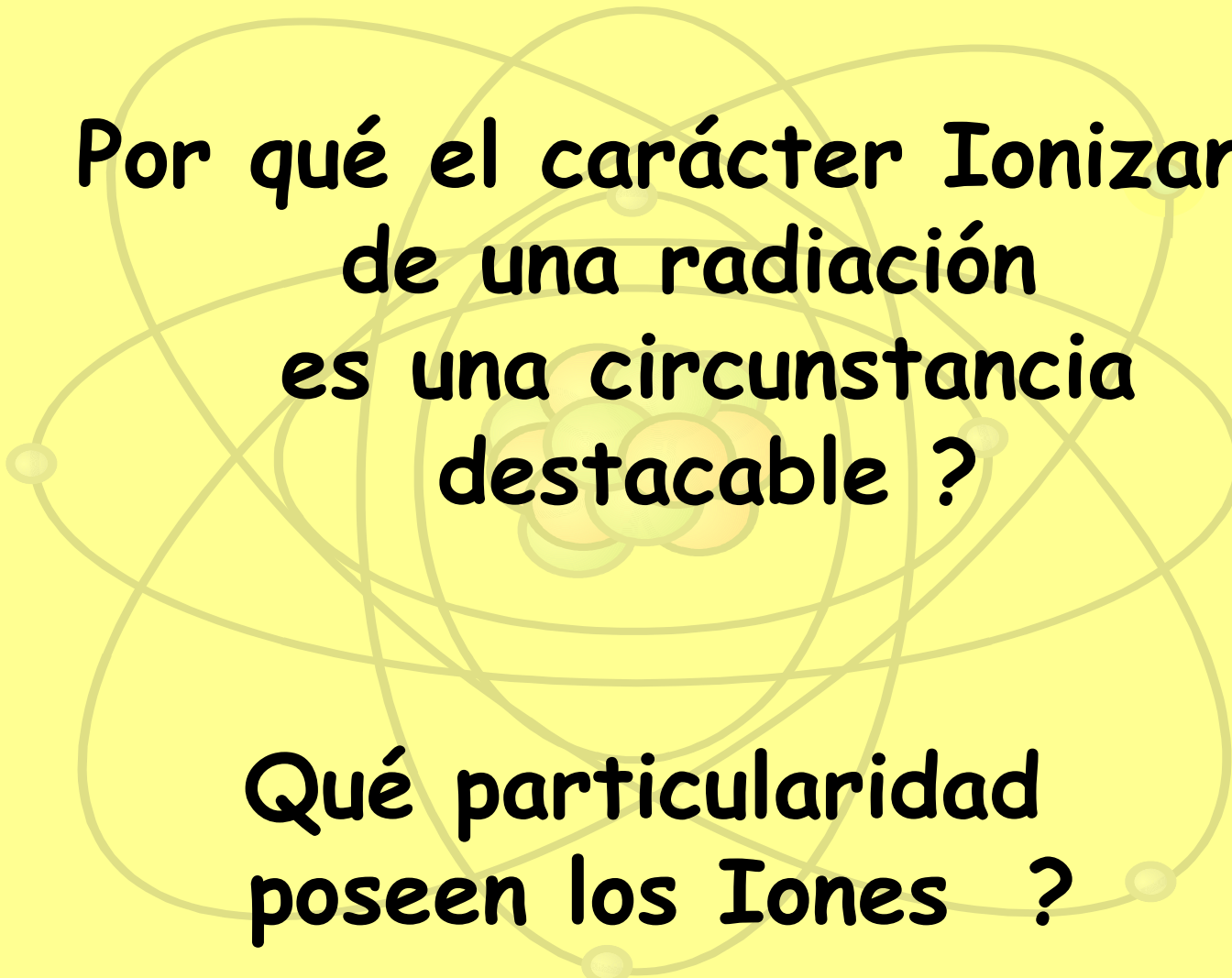


Potencia: $100 \text{ W} = 6,2 \times 10^{20} \text{ eV/s}$

No Ionizantes

Ionizantes





**Por qué el carácter Ionizante
de una radiación
es una circunstancia
destacable ?**

**Qué particularidad
poseen los Iones ?**

Una molécula en la que alguno de sus átomos se ha ionizado es químicamente mas reactiva.

La ionización aumenta la REACTIVIDAD QUÍMICA del medio.

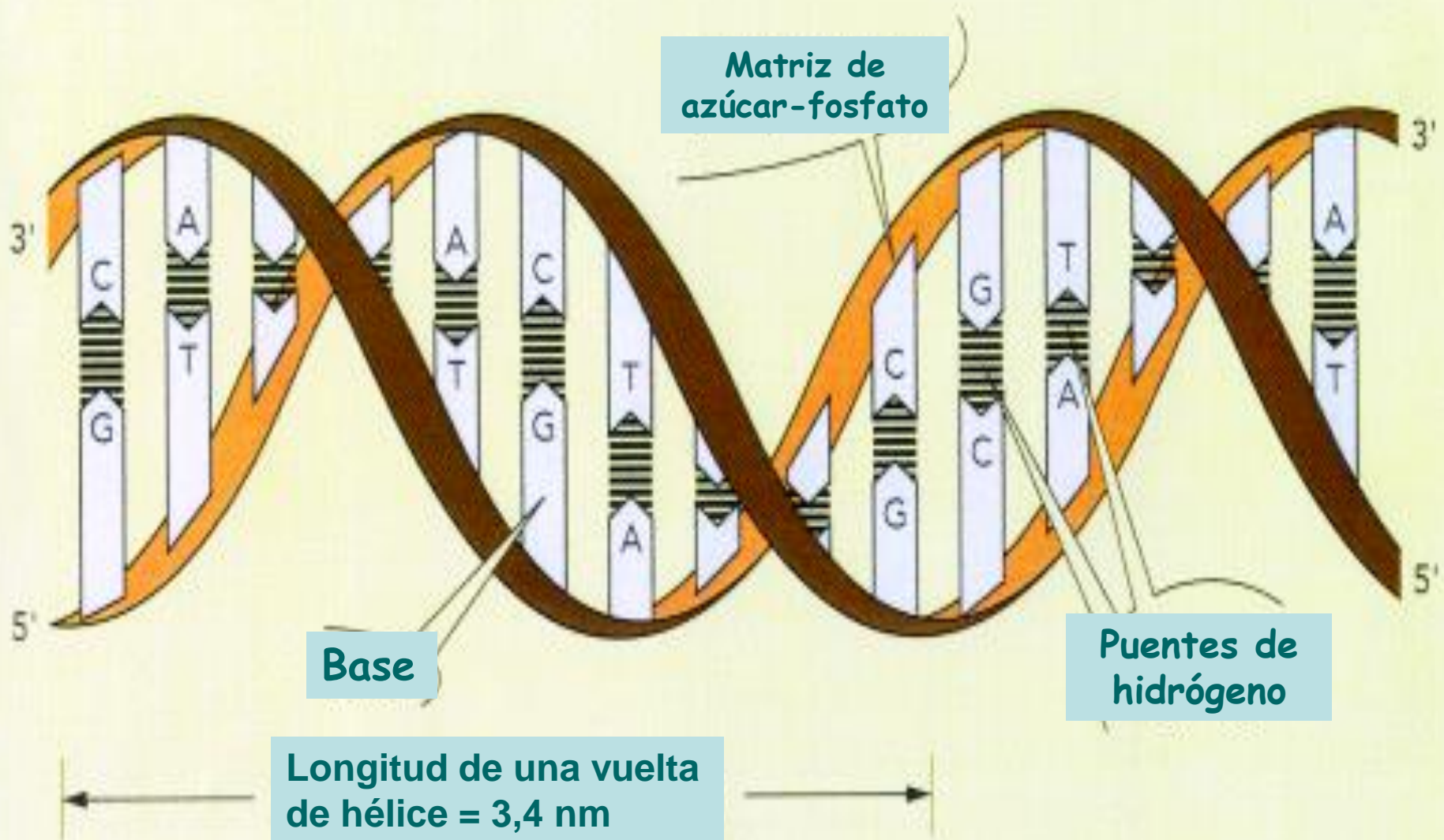
**Las reacciones
químicas anormales
en el medio celular
pueden alterar
las estructuras
celulares:**

**Cambios Morfológicos
Cambios Funcionales**

RADIACIÓN

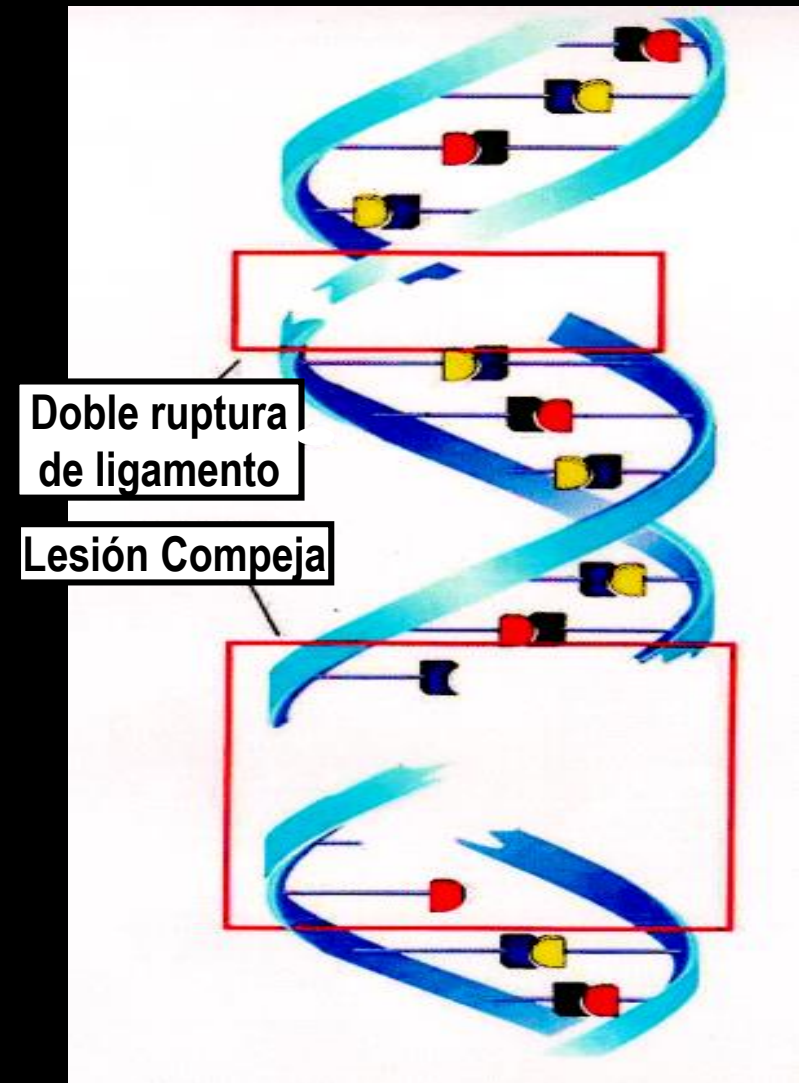
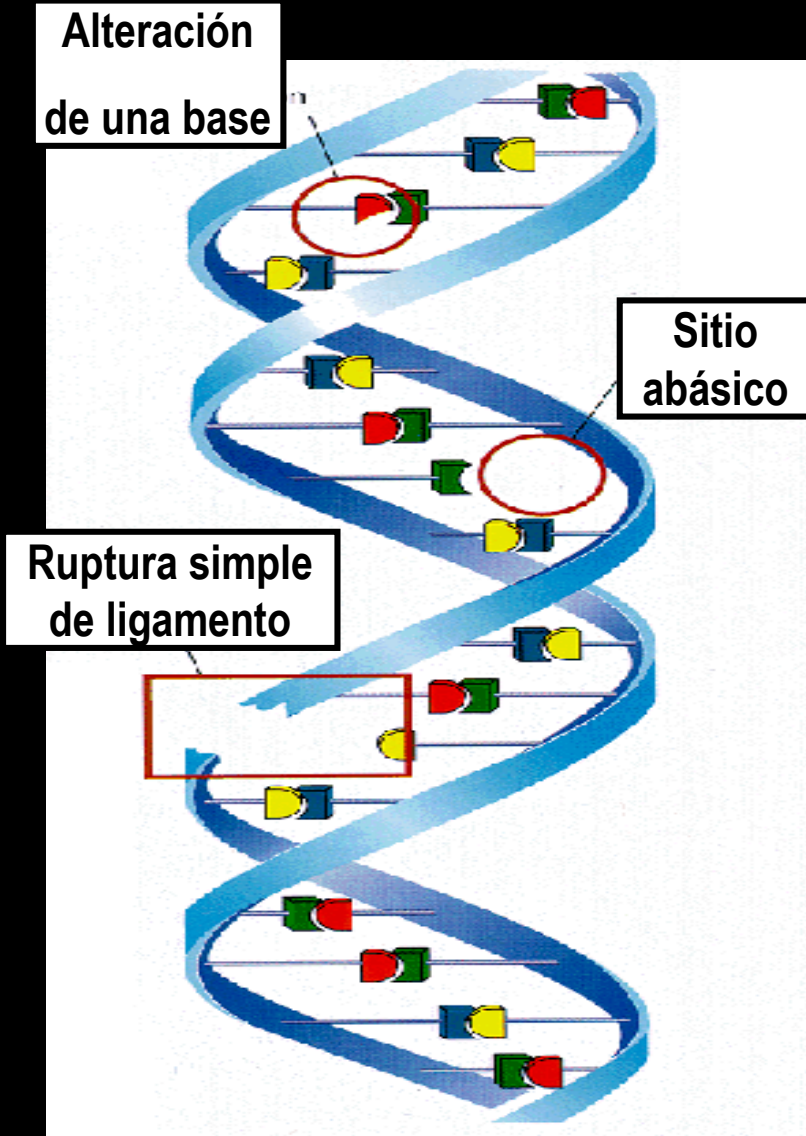
**FUENTE:
IAEA**

Blanco crítico: ADN



**FUENTE:
IAEA**

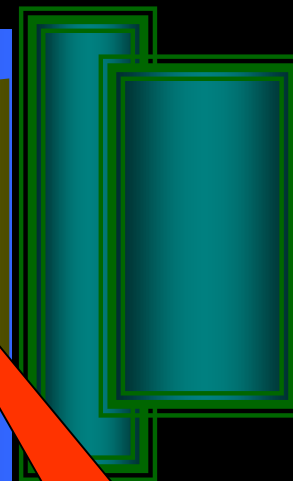
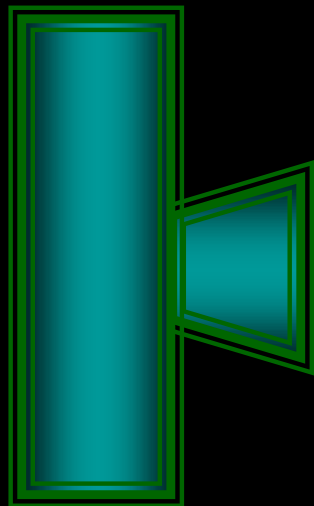
Daños posibles en la molécula de ADN



Los efectos sobre Organos y Tejidos

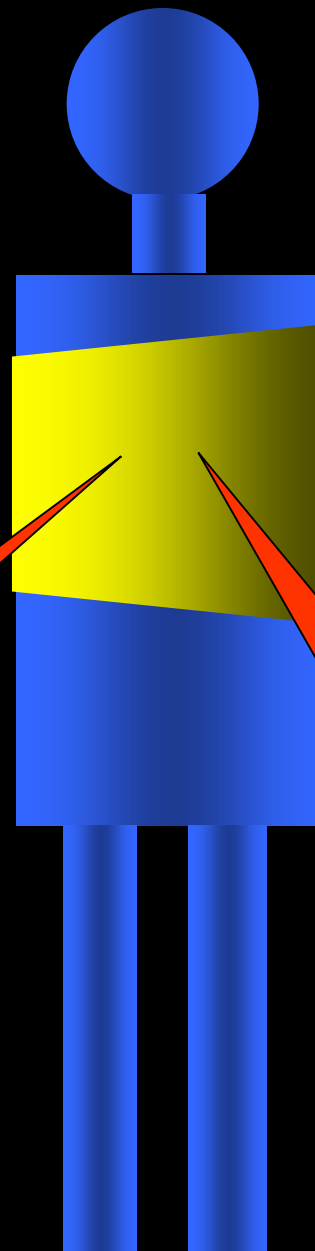
Se originan en los procesos
de **ionización**
que provoca la **energía**
absorbida por los tejidos
de las personas expuestas

**Emisión
y Transporte
de Energía**



**Absorción
de Energía
en la masa
de Tejido**

**Distribución
heterogénea
de Energía
Absorbida**



ENERGÍA

**Magnitud fundamental empleada
para evaluar los efectos
de la radiación ionizante.**

Magnitud dosimétrica Básica

$$\text{Dosis Absorbida (D)} = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Masa del absorbente}}$$

$$\text{Unidad: Gray (Gy)} = \frac{\text{Joule}}{\text{kg}}$$

Louis Harold Gray

1905 – 1965

**Físico británico
dedicado a la
investigación
de los efectos
de la radiación
en sistemas
biológicos
creando el campo
de la Radiobiología.**



La Magnitud

DOSIS ABSORBIDA

Es un concepto

Físico Macroscópico

La Magnitud

DOSIS ABSORBIDA

**Puede no correlacionarse
adecuadamente
con los efectos biológicos
que provoca**

Por dos Motivos

- A igualdad de Dosis Absorbida *diferentes tipos de radiación* provocan efectos de diferente intensidad.

- A igualdad de Dosis Absorbida *diferentes tipos de tejidos experimentan* efectos de diferente intensidad.

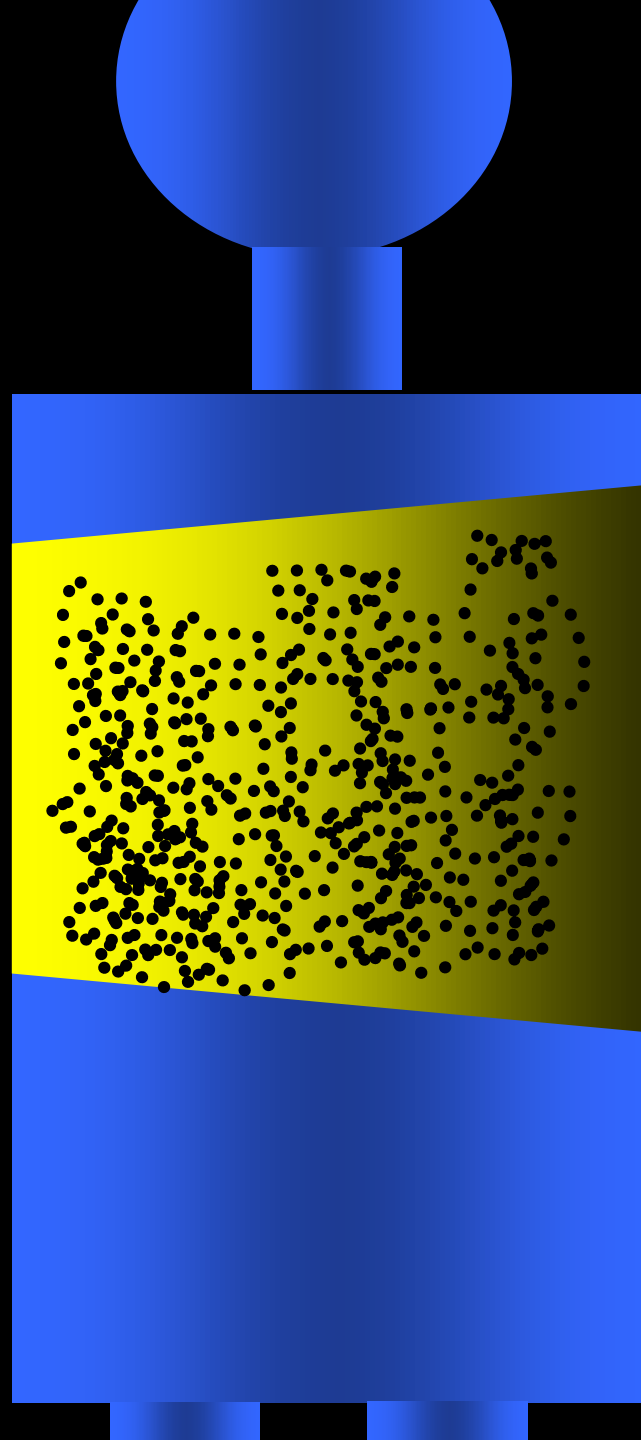
TIPOS DE RADIACIÓN Y TRANSFERENCIA LINEAL DE ENERGIA

(TLE)

Características de la Radiación Ionizante que influyen en sus efectos celulares

**A igualdad de Dosis Absorbida
y otros Factores,
RADIACIONES DE DISTINTA
NATURALEZA O ENERGÍA
provocan efectos de diversa intensidad.**

La energía
absorbida
provoca
ionizaciones



**Diferentes Tipos de Radiación
interactúan con la materia de modo muy diverso**

**A igualdad de Dosis Macroscópicas
las Distribuciones Microscópicas
de la energía absorbida
y de los iones producidos
pueden ser muy diferentes**

Transferencia Lineal de Energía

TLE

Concepto Físico

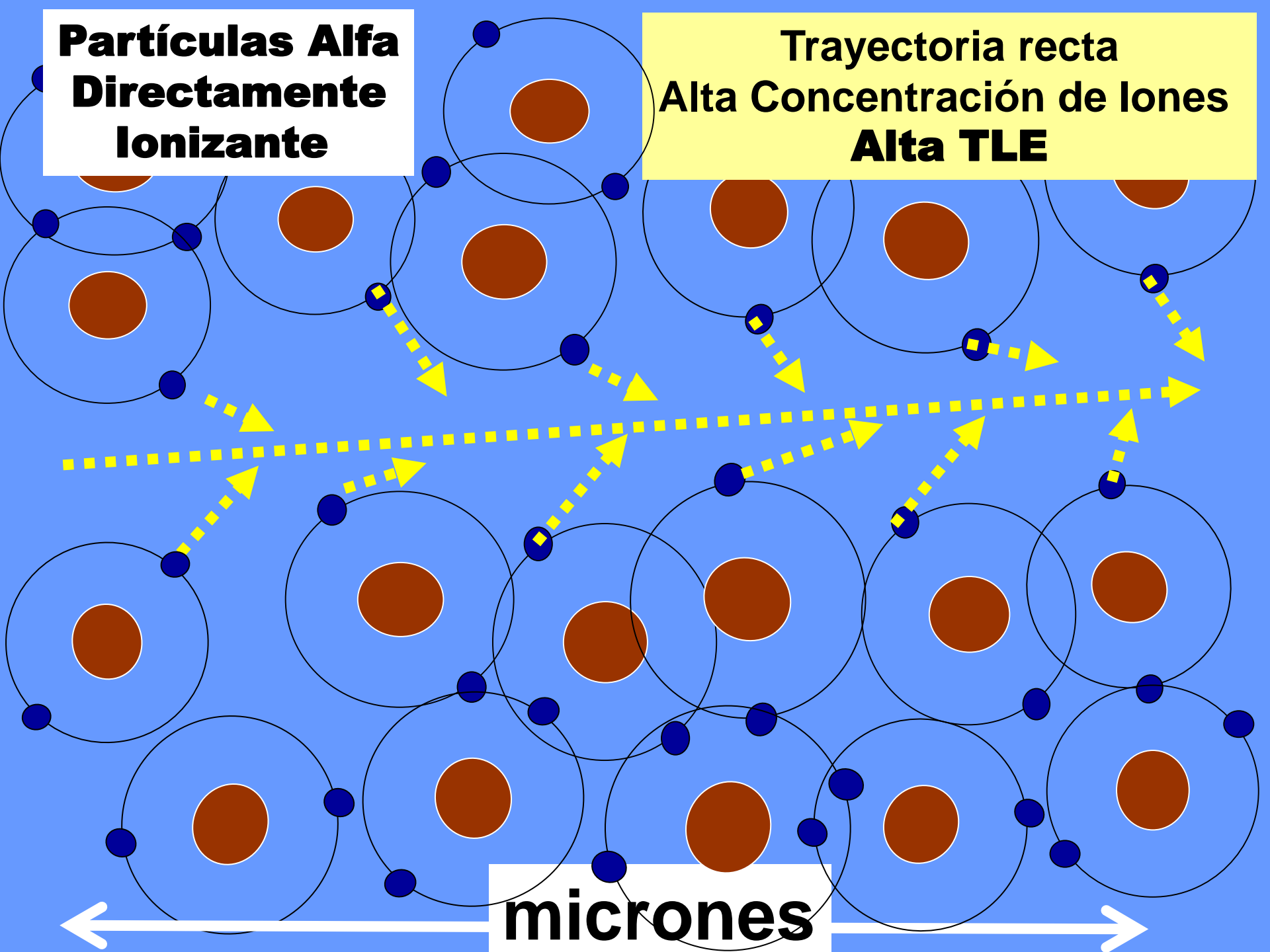
**Permite evaluar la distribución
microscópica de la Energía Absorbida**

Microdosimetría

Aunque las Dosis Medias en órganos sean iguales
las distribuciones microscópicas de las dosis
pueden ser muy diferentes

**Partículas Alfa
Directamente
Ionizante**

**Trayectoria recta
Alta Concentración de Iones
Alta TLE**



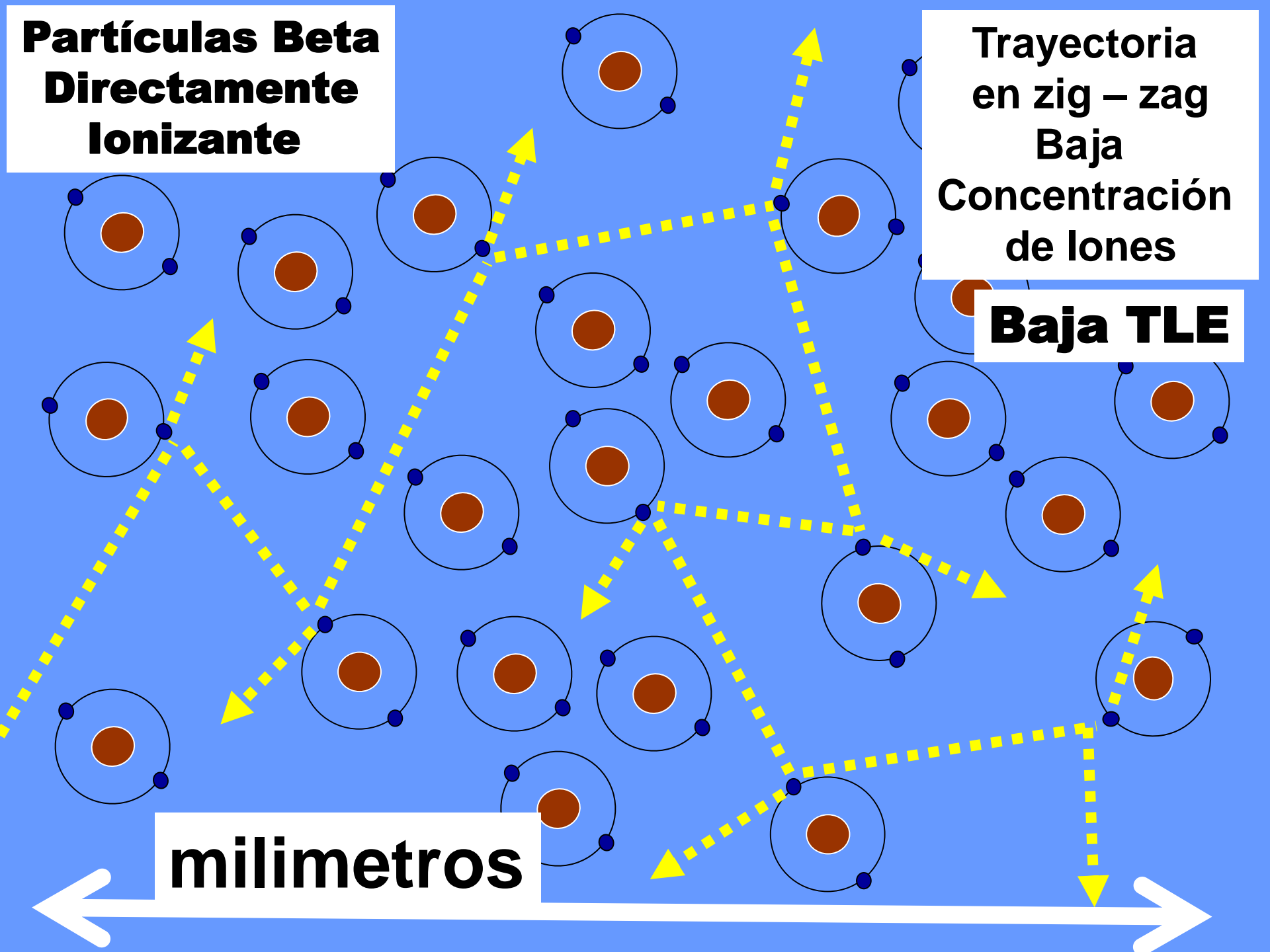
micrones

**Partículas Beta
Directamente
Ionizante**

**Trayectoria
en zig – zag
Baja
Concentración
de Iones**

Baja TLE

milímetros



The diagram illustrates the process of indirect ionization. It features a blue background with a grid of blue circles, each containing a brown dot, representing atoms or molecules. A white double-headed arrow at the top spans the width of the image, with the text 'Decenas de centímetros' (Decades of centimeters) centered within it. On the left side, a vertical blue bar contains a high-frequency, high-amplitude black sine wave representing incident electromagnetic radiation. This radiation transitions into a lower-frequency, lower-amplitude black sine wave that propagates through the medium. Yellow dashed arrows with triangular heads show the path of secondary electrons (delta rays) being ejected from the atoms by the secondary radiation. These electrons travel in various directions, interacting with other atoms. A white box on the right side contains the text 'Baja Concentración de Iones' (Low Ion Concentration) and 'Baja TLE' (Low TLE). At the bottom, a white box contains the text 'Radiación Electromagnética Indirectamente Ionizante' (Indirectly Ionizing Electromagnetic Radiation).

Decenas de centímetros

**Baja
Concentración
de Iones**

Baja TLE

**Radiación Electromagnética
Indirectamente Ionizante**

TRANSFERENCIA LINEAL DE ENERGÍA

Energía que una Radiación Ionizante
transfiere a la materia irradiada
por unidad de recorrido.

$$\frac{\text{keV}}{\mu\text{m}}$$

TABLE 2.2 TYPICAL LET VALUES OF IONIZING RADIATION

Radiation Linear Energy Transfer, KeV/ μ m	
Co- 60 γ rays	0.2
250 kVp X rays	2.0
10 MeV protons	4.7
150 MeV protons	0.5
14 MeV neutrons	12
2.5 MeV α particles	166
2 GeV Fe ions	1000

(Hall and Giaccia, 2006)

**A igualdad de Dosis Absorbida
por el material irradiado**

**La Distribución Microscópica
de los Iones producidos
en las células
puede ser muy diferente**

Ello significa:

**Aunque la Macrodosimetría
indique iguales valores**

**la Microdosimetría
puede ser distinta**

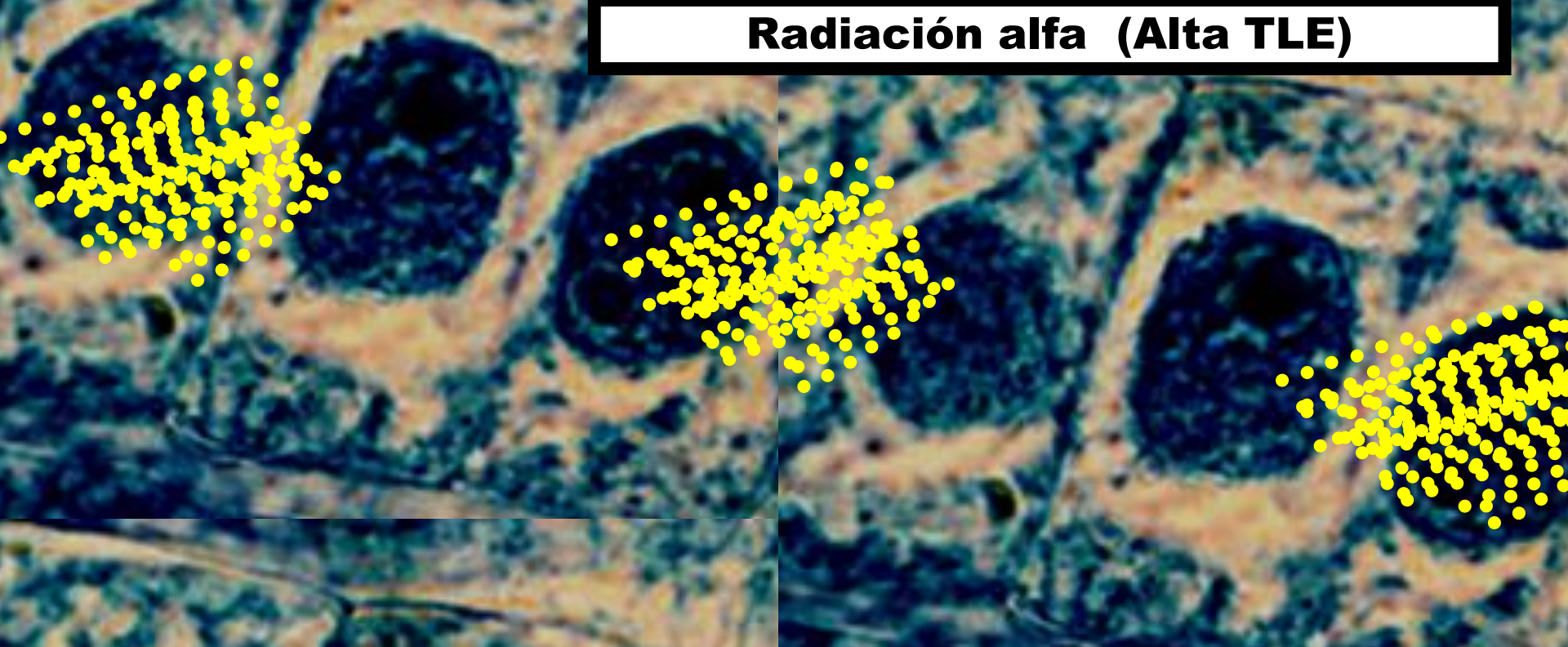
**Y, consecuentemente,
puede ser muy diferente
la repercusión Biológica**

Radiación X o Gamma (Baja TLE)

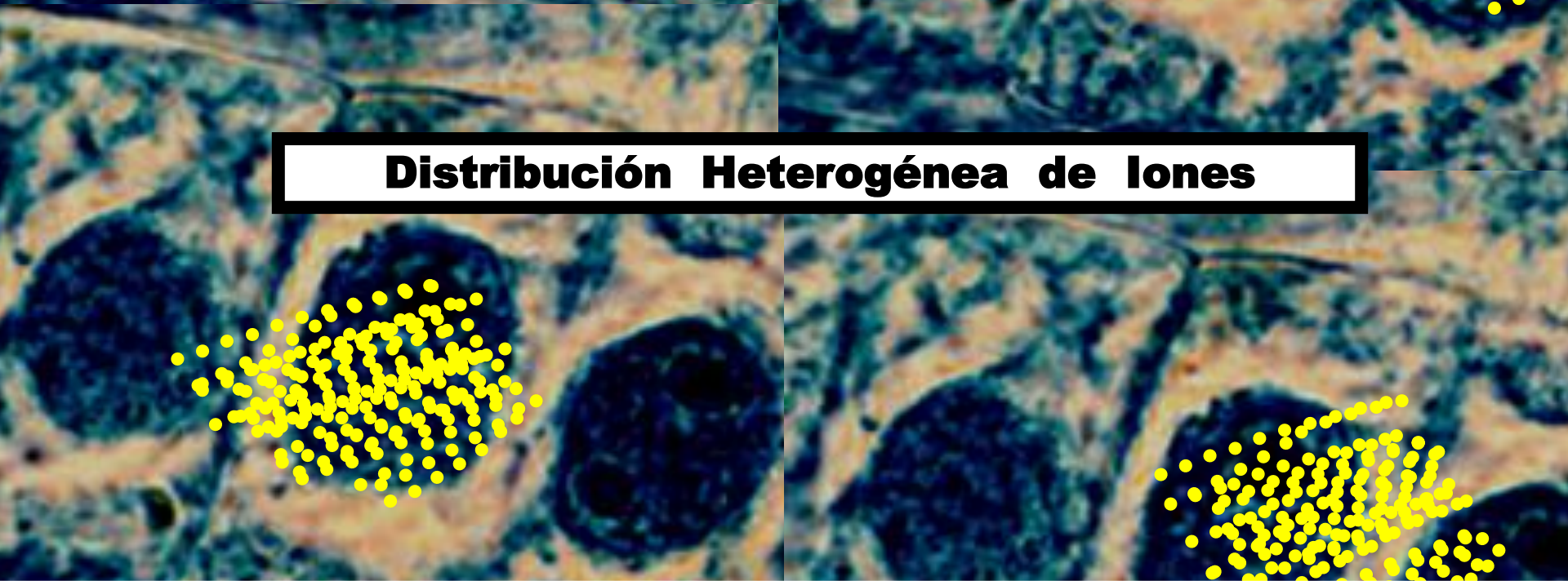
Distribución Homogénea de Iones

Rayos X (D = 10 mGy) : cientos de ionizaciones por célula

Radiación alfa (Alta TLE)



Distribución Heterogénea de Iones



Alfa ($D = 10$ mGy): miles de ionizaciones en algunas células

Radiación alfa, (Alta TLE)

Microdosimetría

**Igual número total de iones
Igual dosis macroscópica
Diferente concentración microscópica**

**Diferente
Efectividad Biológica**

Alfa ($D = 10 \text{ mGy}$): miles de ionizaciones en algunas células

Un recurso que permite establecer equivalencias entre Dosis de distintos tipos de radiación es el concepto:

EFFECTIVIDAD BIOLÓGICA RELATIVA

Efectividad Biológica Relativa - EBR

$$\text{EBR} = \frac{\text{Dosis de Radiación de Referencia}}{\text{Dosis de Radiación que produce igual efecto (cáncer)}}$$

Radiación de Referencia : Rayos x de 250 kV
Gamma Co⁶⁰

**Concepto Biofísico
de origen Científico**

EBR

Depende de:

- **Tipo de Radiación**
- **Energía de las Partículas o Fotones de la Radiación**
- **Tipo de Efecto Biológico analizado**

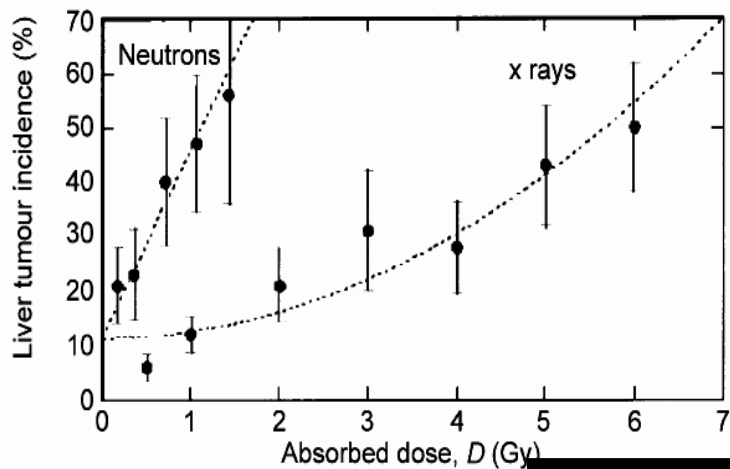


Table 3.4. Relative biological effectiveness for neutron-induced oncogenic transformation of C3H10T1/2 cells (Miller et al., 2000)

Neutron energy (keV)	RBE ^a
40	3.7±1.9
70	6.6±3.1
350	7.2±3.3

RBE, relative biological effectiveness.

^a RBE determined from the ratios of the α values for neutrons and 250 kV x rays.

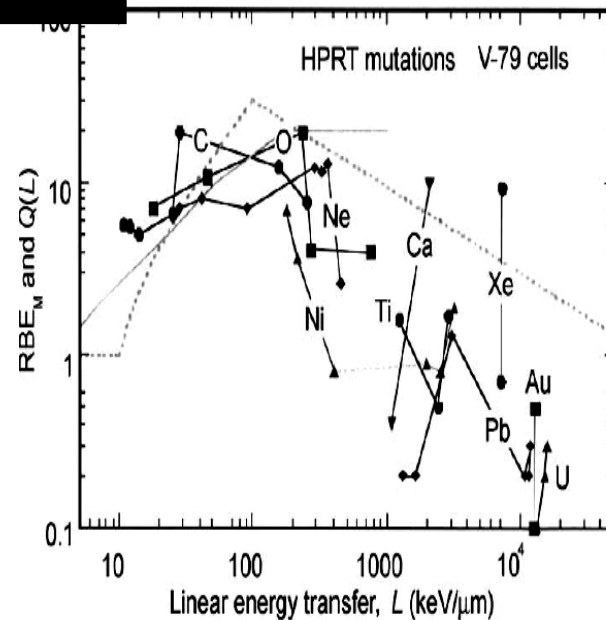
EBR - ICRP 92

Table 3.7. Effects of proton irradiation

Biological effect	Species	Proton energy/MeV	RBE	Reference
Lethality LD _{50/30}	Mouse	126	0.7	Ryzkov et al. (1967) ^a
Lethality LD _{50/30}	Mouse	50	1.2	Grigoryev et al. (1969) ^a
Lethality	Monkey	32-2300	about 1	Dalrymple et al. (1991)
Cataract	Mouse	50	about 1	Fedorenko et al. (1995)
Cataract	Monkey	160	about 1	Fedorenko et al. (1995)
Cataract	Monkey	55	about 1	Nierner-Tucker et al. (1999)
Gut, lens, and skin	Mouse	160	0.8-1.3	Urano et al. (1984)
Intestinal crypt	Mouse	85	0.9-1.2	Gueulette et al. (1996)

RBE, relative biological effectiveness.

^a Cited in Tobias and Grigoryev (1975).



EBR - ICRP 92

Table 3.5. Relative biological effectiveness for neutron-induced chromosome aberrations in human lymphocytes (Edwards et al., 1982)

Neutron energy (MeV)	RBE ^a
(Fission neutrons) 0.7	53
(Fission neutrons) 0.9	46
(²⁵² Cf neutrons) 2.13	38
(Cyclotron neutrons) 7.6	30

RBE, relative biological effectiveness.

^a RBE values: ratio of α coefficients for neutrons and ⁶⁰Co γ rays.

EBR - ICRP 92

Table 3.9. Low-dose relative biological effectiveness relative to 250 kV x rays for α -particle-induced cell killing and oncogenic transformation in Syrian hamster embryo cells (Martin et al., 1995)

LET (keV/ μ m)	RBE _M for cell killing	RBE _M for morphological transformation
90	9	60
100	10	37
120	12	10
150	10	7
180	8	3
200	7	6

RBE_M relative biological effectiveness at minimal doses. LET, linear energy transfer.

EBR - ICRP 92

Table 3.10. Relative biological effectiveness for the induction of dicentrics in human lymphocytes

α particle (He ion) energy (MeV)	RBE			Reference
	Reference radiation			
	x rays	γ rays		
5.1	8	24	Purrott et al. (1980)	
6.1	6	18	Edwards et al. (1980)	
23.0	16	48	Takatsuji and Sasaki (1984)	

RBE, relative biological effectiveness.

EBR - Ejemplo

Se puede provocar un determinado efecto (Inducción de Dicéntricos) con una cierta dosis de Rayos x, o con:

EBR en Radioterapia

En la planificación de Tratamientos se tiene en cuenta el valor de EBR apropiado según el tipo de radiación empleada.

En Radioterapia el margen de TOLERANCIA en la administración de Dosis DEBE SER menor a 5 %

En consecuencia

Los valores de Dosis se multiplican por EBR para obtener un valor representativo de los efectos biológicos que se inducirán.

En Protección Radiológica

**En situaciones de exposición Normal
(Bajas Dosis)**

**la TOLERANCIA ACEPTABLE
en la estimación de las dosis
es del orden del **30 %**.**

En Protección Radiológica

No se utilizan valores de EBR.

**W_r : Factor de Ponderación
por Efectividad de la Radiación**

**Versión Regulatoria
de la EBR**

**Mensurado para efectos estocásticos
a bajas dosis y baja tasa de dosis
(condiciones de linealidad entre Dosis y Probabilidades de Efectos)**

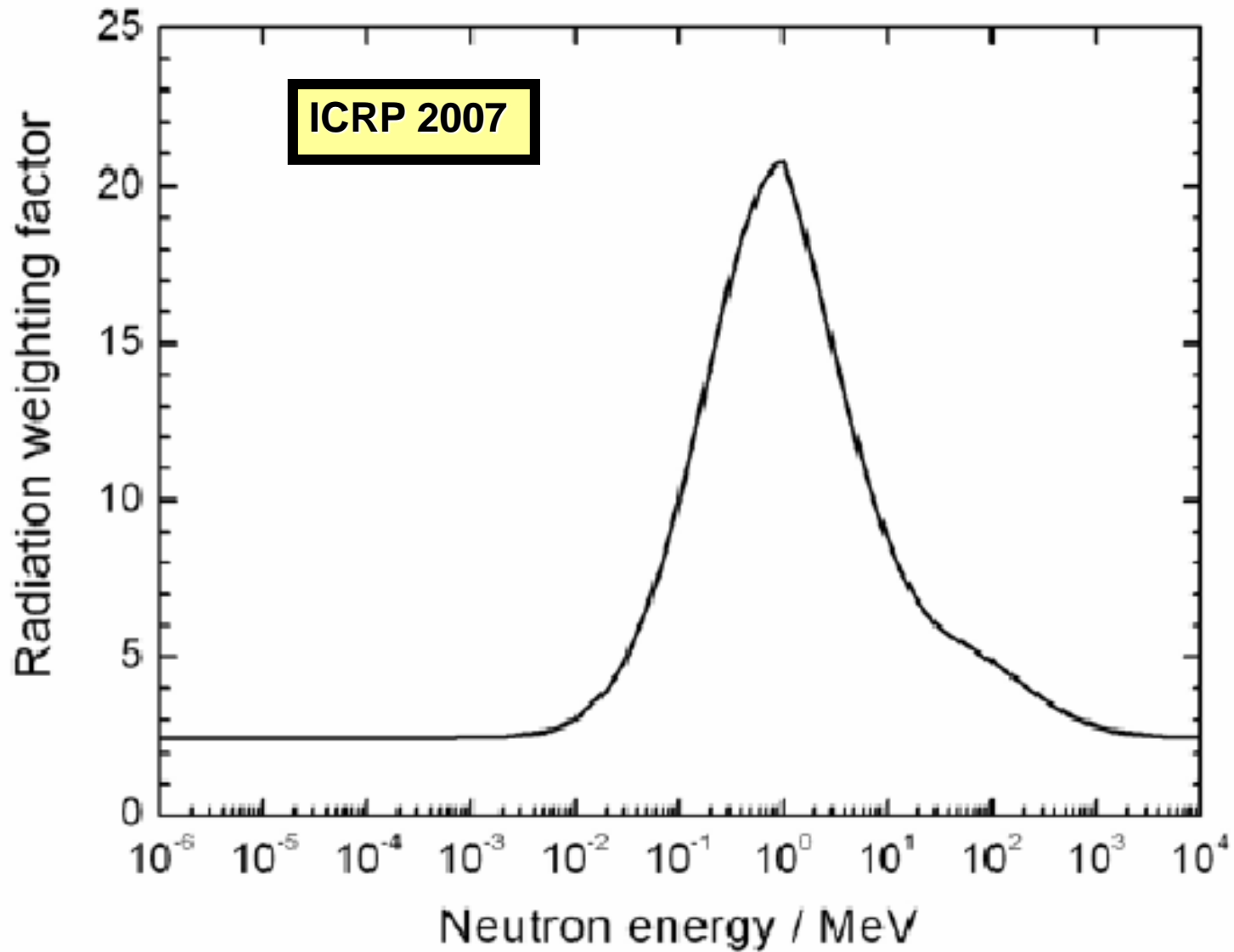
ICRP 103 - 2007

FACTORES DE PONDERACION POR TIPO DE RADIACION w_r

Tipo de radiación	w_r
Fotones de todas las energías	1
Electrones, todas las energías	1
Protones	2
Partículas alfa, fragmentos de fisión y núcleos pesados	20
Neutrones según energía ver curva	

**Valores para efectos estocásticos
a bajas dosis y baja tasa de dosis
(condiciones de linealidad)**

VALORES DE w_r PARA NEUTRONES



**La adopción de w_r permite
definir otra magnitud
en Protección Radiológica**

DOSIS EQUIVALENTE

$$\text{Dosis Equivalente (H)} = D \cdot W_r$$

D : Dosis

**w_r : factor de ponderación
por tipo de radiación**

$$[H] = \text{Joule / Kg} = \text{Sievert (Sv)}$$

Ejemplo:

Una Dosis de 5 mGy provocada por neutrones de 1 Mev EQUIVALE a una Dosis de 100 mGy provocada por radiación Gamma.

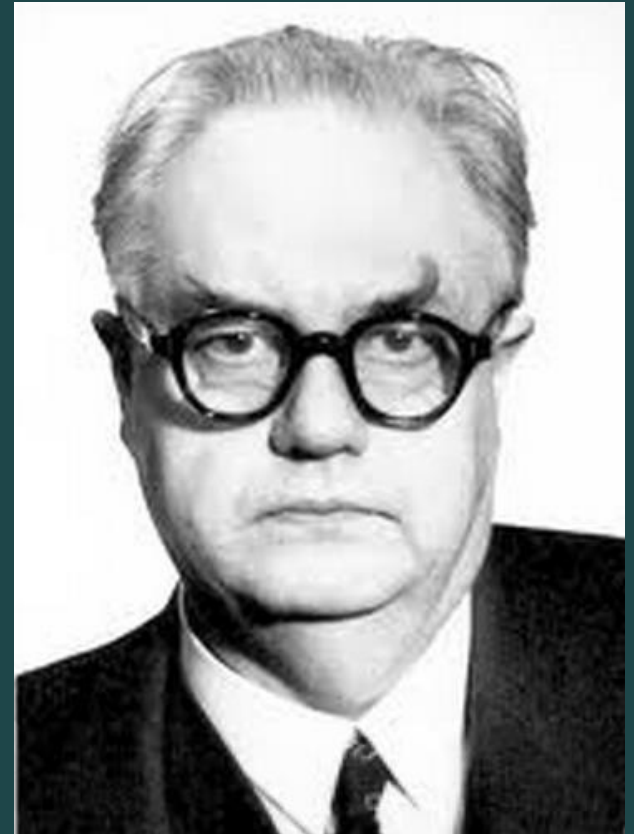
$$D = 5 \text{ mGy}$$

$$H = D \cdot W_r = 5 \cdot 20 \text{ mSv} = 100 \text{ mSv}$$

Rolf Maximilian Sievert

(06 – 05 – 1886 a 03 -10 – 1966)

Físico Médico sueco cuya notable contribución a la ciencia fue el estudio de los efectos biológicos de la radiación ionizante



SI LA EXPOSICIÓN OCURRE CON VARIOS TIPOS DE RADIACION

$$**H = \sum D \cdot W_r**$$

Se suman las contribuciones de cada una

Evaluación del Riesgo Cancerígeno a largo plazo

**Existen evidencias epidemiológicas
de que la Probabilidad de Efectos
Cancerígenos a largo plazo,
asociada a bajas Dosis de Radiación,
es proporcional a la Dosis Equivalente
recibida en cada órgano**

Qué significa proporcionalidad?

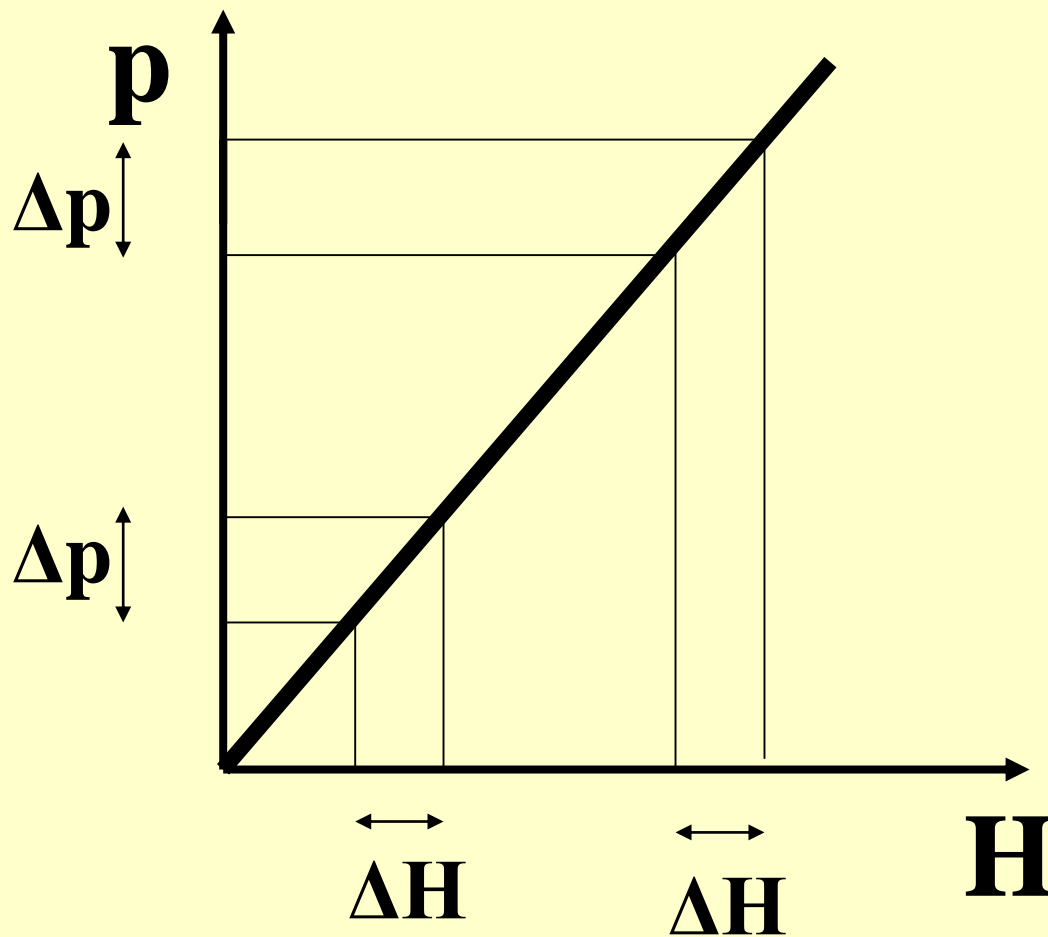
Para cada tejido u órgano:

$$p = k \cdot H$$

- **p**: Probabilidad de Efecto Cancerígeno

k: Factor de Proporcionalidad para cada tejido u órgano. “Factor de riesgo”

H: Dosis Equivalente en el tejido u órgano

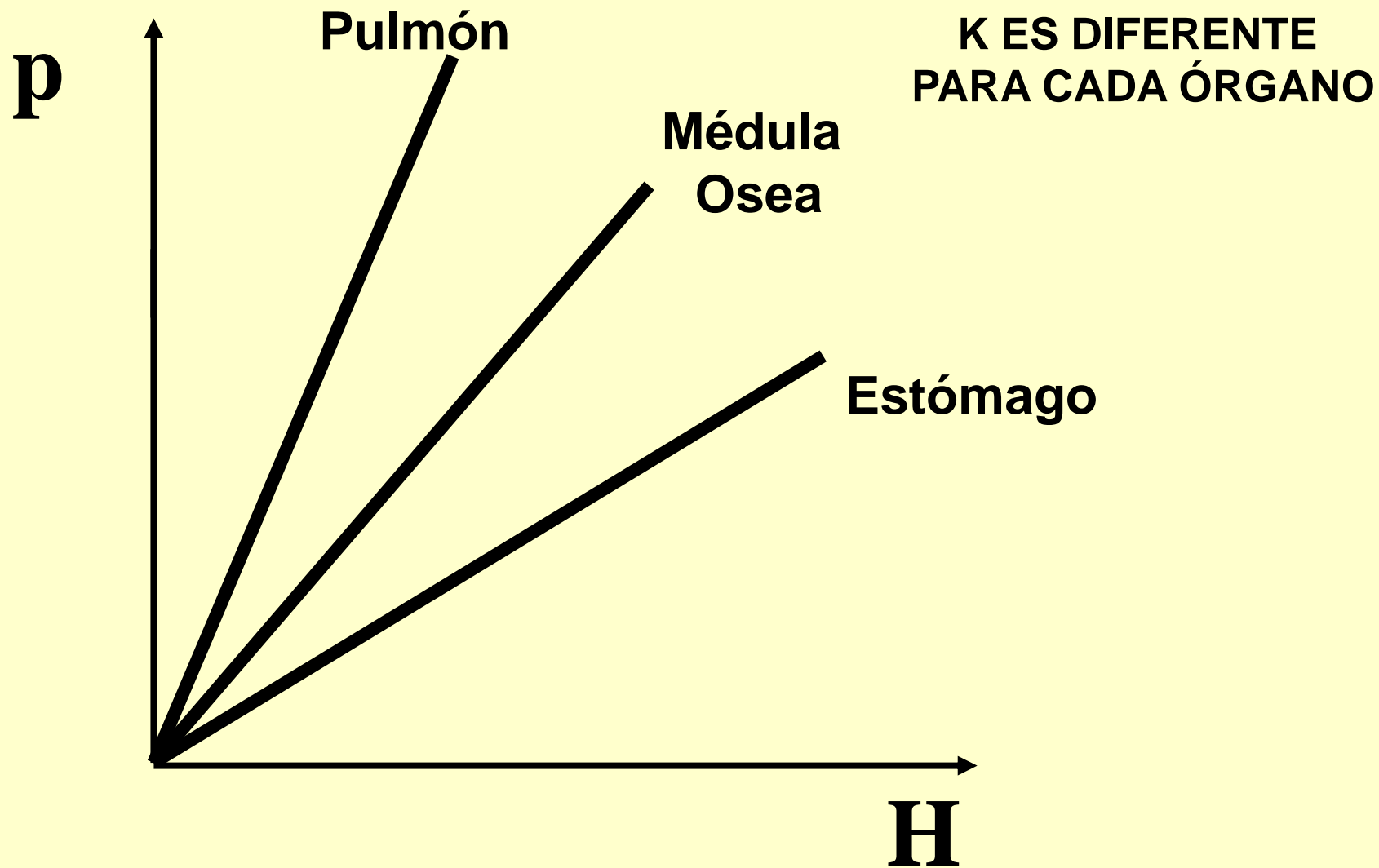


LINEALIDAD

$$p = k \cdot H$$

Significado de la LINEALIDAD:

**Iguals Incrementos de Dosis Equivalente
Provocan iguales Incrementos de Probabilidad
cualquiera fuere la historia dosimétrica previa.**



LINEALIDAD

$$p = k \cdot H$$

SIGNIFICADO DE K

K: Factor de proporcionalidad entre la Dosis Equivalente y el Detrimento Compuesto.

DETRIMENTO COMPUESTO

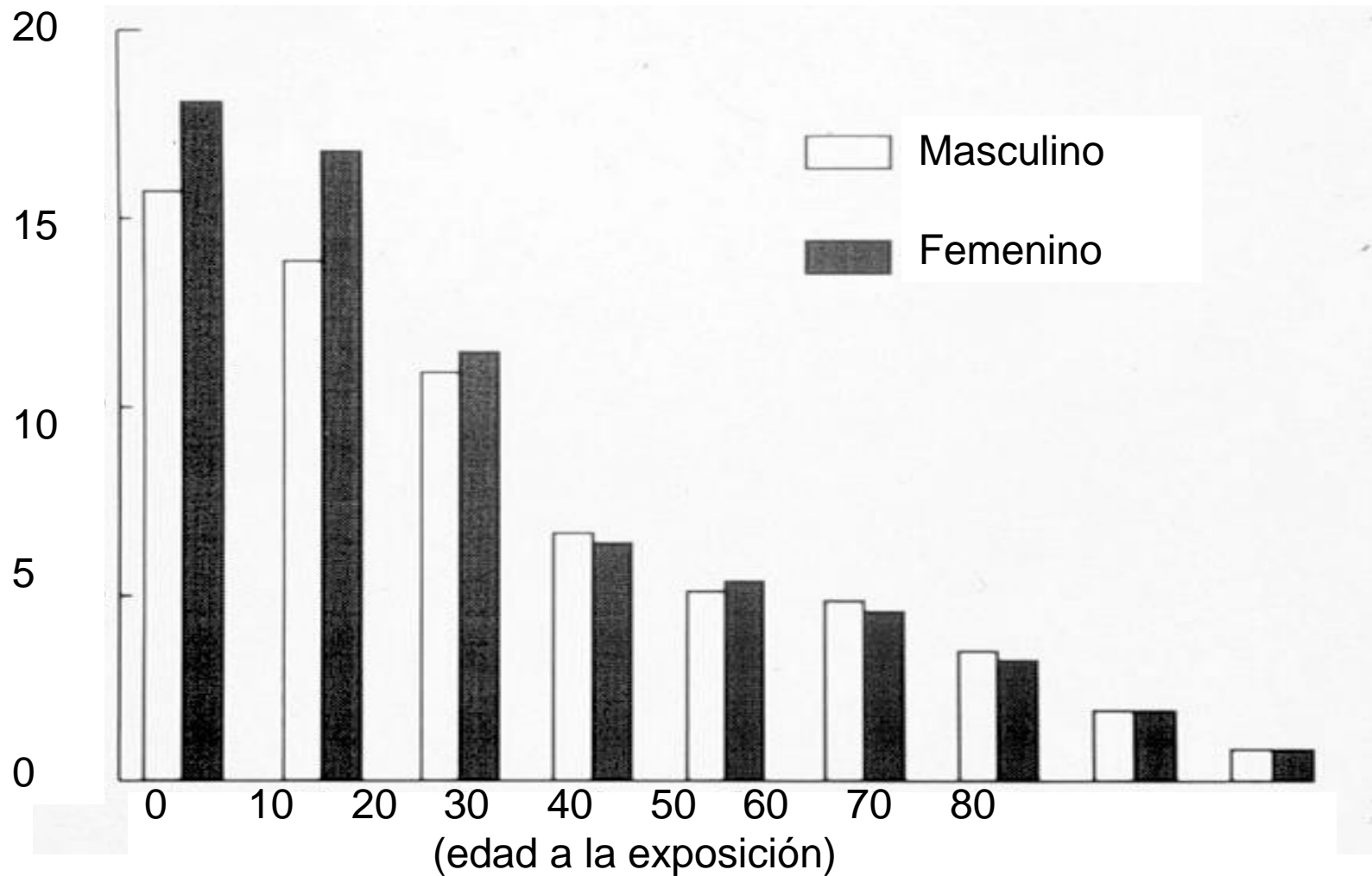
Tiene en cuenta:

- **Inducción de Cáncer Mortal**
- **Deterioro de la Calidad de vida que implica un cáncer no mortal**
- **Pérdida de años de vida por un cáncer mortal**

Los valores de K para cada órgano

Varían según sexo y edad

Riesgo (% / Sv) de inducción de cáncer por edad a la exposición y por sexo



**Los valores de K
Varían según sexo y edad.**

**Pero, a los fines de la Protección Radiológica
la ICRP ha promediado
los valores de K
según dos categorías de personas:**

**Público (Todas las edades)
Exposición Poblacional**

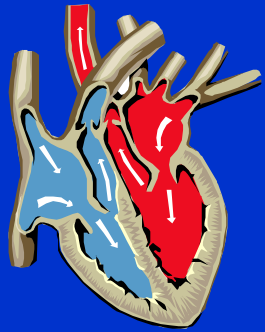
**Trabajadores (Mayores de 18 años)
Exposición Ocupacional**

**ICRP 103
2007****FACTOR DE
RIESGO DE
INCIDENCIA****Casos /10.000
personas por Sv****FRACCION
LETAL****RIESGO AJUSTADO
POR LETALIDAD,
CALIDAD DE VIDA
Y PERDIDA DE VIDA
RELATIVA POR CÁNCER****FACTOR
DE
DETRI
MENTO
 k_i** **DETRI
MENTO
RELATIVO
 K_i/K** **PUBLICICO**

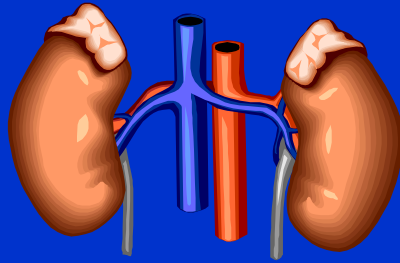
Oesophagus	15	0.93		13.1	0.023
Stomach	79	0.83		67.7	0.118
Colon	65	0.48		47.9	0.083
Liver	30	0.95		26.6	0.046
Lung	114	0.89		90.3	0.157
Bone	7	0.45		5.1	0.009
Skin	1000	0.002		4.0	0.007
Breast	112	0.29		79.8	0.139
Ovary	11	0.57		9.9	0.017
Bladder	43	0.29		16.7	0.029
Thyroid	33	0.07		12.7	0.022
Bone Marrow	42	0.67		61.5	0.107
Other Solid	144	0.49		113.5	0.198
Gonads (Heritable)	20	0.80		25.4	0.044

TOTAL**1715****574****1.000**

Los Organos tienen diferente radiosensibilidad (O sea: diferentes valores de k_i)



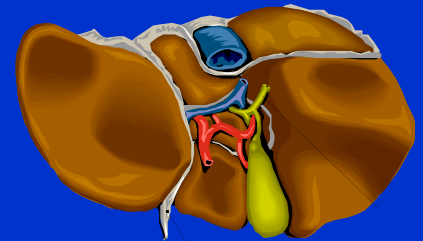
k_1



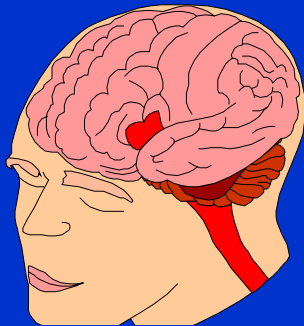
k_2



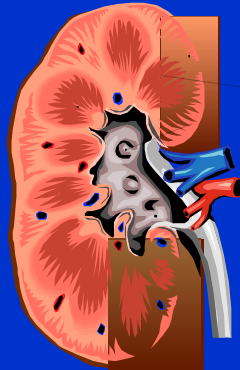
k_3



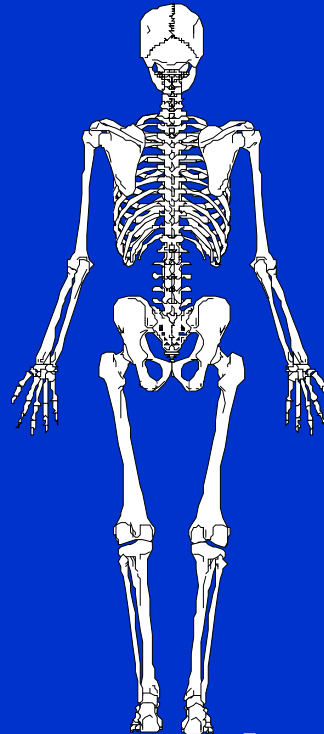
k_4



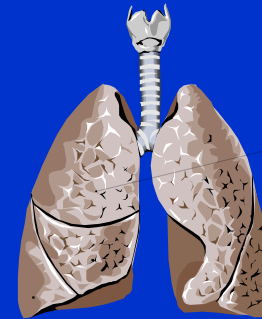
k_5



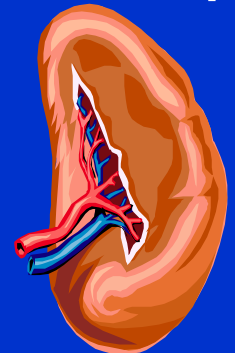
k_6



k_7



k_8



k_9

**Dosis Equivalentes Iguales
en Organos distintos**



**Diferentes probabilidades
de efectos**

**ICRP 103
2007****FACTOR DE
RIESGO DE
INCIDENCIA****Casos / 10.000
personas por Sv****FRACCION
LETAL****RIESGO AJUSTADO
POR LETALIDAD,
CALIDAD DE VIDA
Y PERDIDA DE VIDA
RELATIVA POR CÁNCER****FACTOR
DE
DETRI
MENTO
 k_i** **DETRI
MENTO
RELATIVO
 K_i / K** **TRABAJADORES**

Oesophagus	16	0.93		14.2	0.034
Stomach	60	0.83		51.8	0.123
Colon	50	0.48		43.0	0.102
Liver	21	0.95		19.7	0.047
Lung	127	0.89		120.7	0.286
Bone	5	0.45		3.4	0.008
Skin	670	0.002		2.7	0.006
Breast	49	0.29		32.6	0.077
Ovary	7	0.57		6.6	0.016
Bladder	42	0.29		19.3	0.046
Thyroid	9	0.07		3.4	0.008
Bone Marrow	23	0.67		23.9	0.057
Other Solid	88	0.49		65.4	0.155
Gonads (Heritable)	12	0.80		15.3	0.036

TOTAL 1179 422 1.000

La suma de los valores de K_i para todos los órganos representa el factor del riesgo K para exposición de cuerpo entero con dosis equivalente uniforme

$$K = \sum k_i$$

La relación entre el valor de K_i para cada órgano y el valor de k para todo el cuerpo representa la proporción (w_{ti}) con que cada órgano contribuye al detrimento total.

$$K_i / \sum k_i = w_{ti}$$

$$K_i / k = w_{ti}$$

W_t

**Factor de ponderación
de la Dosis Equivalente
según radiosensibilidad
del tejido u órgano expuesto**

**ICRP 103
2007****FACTOR DE
RIESGO DE
INCIDENCIA****Casos / 10.000
personas por Sv****FRACCION
LETAL****RIESGO AJUSTADO
POR LETALIDAD,
CALIDAD DE VIDA
Y PERDIDA DE VIDA
RELATIVA POR CÁNCER****FACTOR DE
DETRI
MENTO
 k_i** **$W_T = K_i / K$**  **K_i / K** **TRABAJADORES**

Oesophagus	16	0.93		14.2	0.034
Stomach	60	0.83		51.8	0.123
Colon	50	0.48		43.0	0.102
Liver	21	0.95		19.7	0.047
Lung	127	0.89		120.7	0.286
Bone	5	0.45		3.4	0.008
Skin	670	0.002		2.7	0.006
Breast	49	0.29		32.6	0.077
Ovary	7	0.57		6.6	0.016
Bladder	42	0.29		19.3	0.046
Thyroid	9	0.07		3.4	0.008
Bone Marrow	23	0.67		23.9	0.057
Other Solid	88	0.49		65.4	0.155
Gonads (Heritable)	12	0.80		15.3	0.036

TOTAL 1179 422 1.000

El valor de K_i para cada órgano se pueden expresar como una proporción (w_i) de la suma total ΣK_i

$$K_i = w_{ti} \cdot \Sigma k_i$$

Para Exposición Uniforme de cuerpo entero

- Se puede escribir:

$$p = k \cdot H$$

- Pero k debe ser la sumatoria de los valores k_i para todos los órganos
- Y H debe ser la **DOSIS EQUIVALENTE** recibida **uniformemente** en todo el cuerpo (o bien la ***DOSIS EFECTIVA***)

Irradiación de cuerpo entero con Dosis Equivalente uniforme H

$$p_1 = k_1 \cdot H$$

$$p_2 = k_2 \cdot H$$

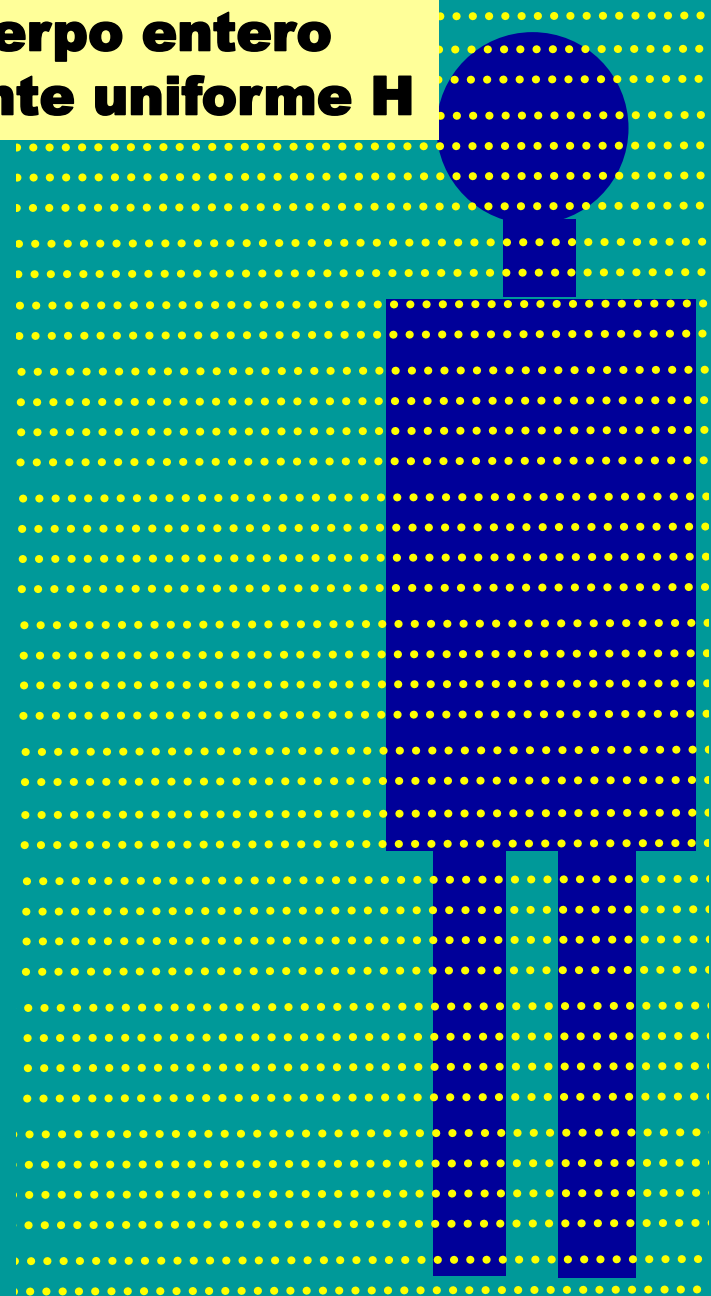
$$p_3 = k_3 \cdot H$$

.....

$$p = \sum p_i = \sum k_i \cdot H = H \cdot \sum k_i$$

$$\sum k_i = k$$

$$p = k \cdot H$$



**EXPOSICIÓN NO UNIFORME
DEL CUERPO**

Irradiación de cuerpo entero con dosis equivalente no uniforme

$$k_i = k \cdot w_T$$

$$p_1 = k_1 \cdot H_1 = k \cdot w_{t1} \cdot H_1$$

$$p_2 = k_2 \cdot H_2 = k \cdot w_{t2} \cdot H_2$$

$$p_3 = k_3 \cdot H_3 = k \cdot w_{t3} \cdot H_3$$

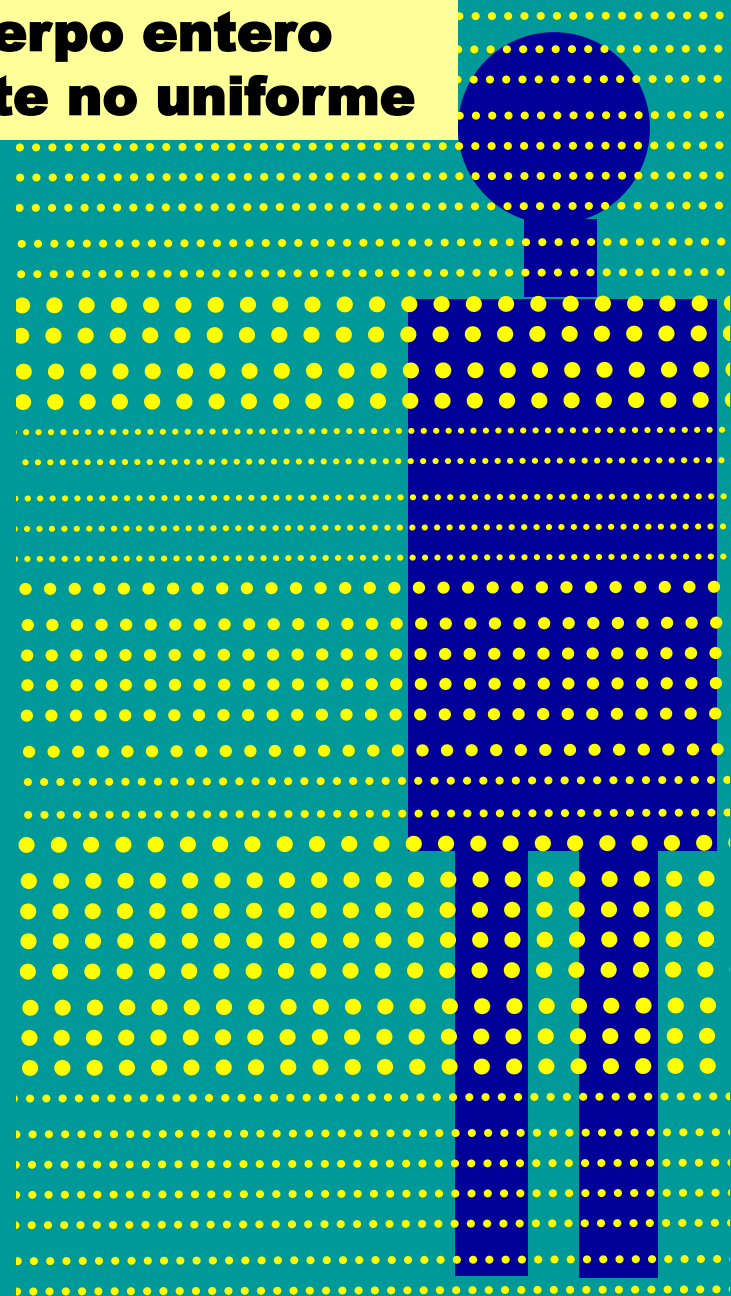
.....

$$p = \sum p_i = k \sum w_{ti} \cdot H_i$$

$$E = \sum w_{ti} \cdot H_i$$

DOSIS EFECTIVA

$$p = k \cdot E$$



Para evaluar el efecto total
sobre el organismo
se deben sumar
las dosis equivalentes
en los distintos órganos
considerando
su radiosensibilidad relativa

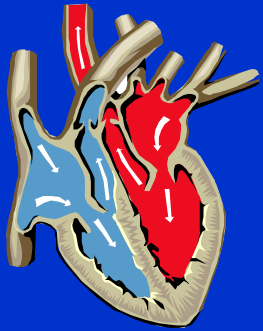
Así surge la conveniencia de
definir la Magnitud

DOSIS EFECTIVA (E)

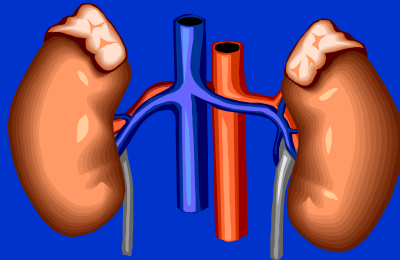
$$E = \sum w_{ti} \cdot H_i$$

Unidad: **SIEVERT**

$H_1 w_{t1}$



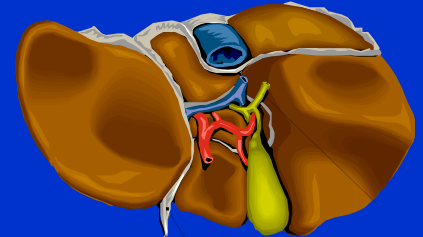
$H_2 w_{t2}$



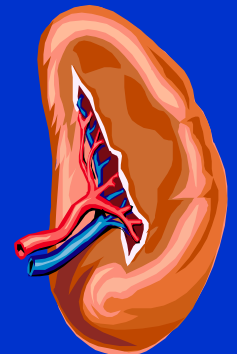
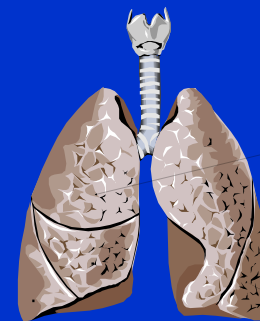
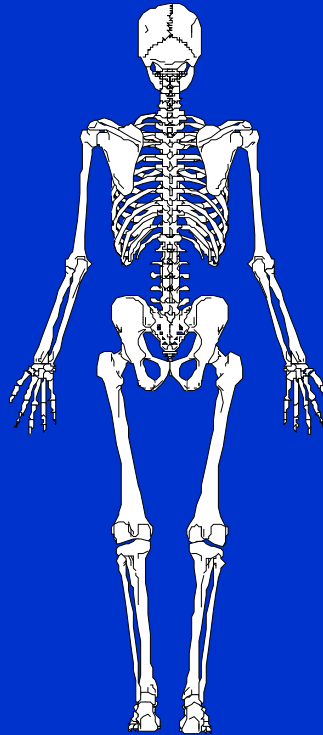
$H_4 w_{t4}$



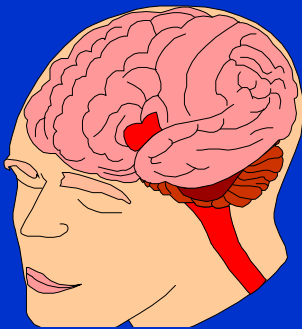
$H_5 w_{t5}$



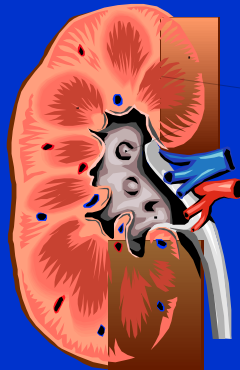
$H_3 w_{t3}$



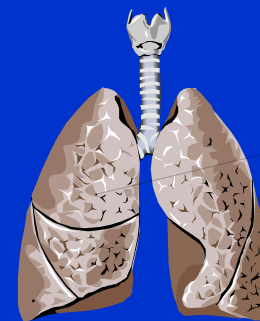
$H_6 w_{t6}$



$H_7 w_{t7}$

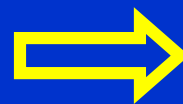


$H_8 w_{t8}$



$H_9 w_{t9}$

Dosis Efectiva



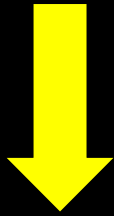
$$E = \sum w_{ti} \cdot H_i$$

Unidad: Sievert (Sv)

**SINTESIS
DE MAGNITUDES
Y UNIDADES
DOSIMETRICAS**

**DOSIS
D**

Gray



W_r

**Ponderación por efectividad
del tipo de Radiación**

**DOSIS
EQUIVALENTE
H**

Sievert

$$H = D \cdot w_r$$



W_t

**Ponderación por radiosensibilidad
del tipo de Organo**

**DOSIS
EFECTIVA
E**

Sievert

$$E = \sum H_t \cdot w_t$$

**ICRP 103
2007**

**Factor de Ponderación
por Radiosensibilidad de Tejidos w_t**

ORGANO	w_t

**En el siguiente cuadro
se presentan valores
de Dosis Efectiva Anual
por persona
y Dosis Colectiva Anual
a nivel Global
atribuibles a causas naturales
y artificiales**

**UNSCEAR
2008**

Dosis efectivas anuales promedio y dosis colectivas mundiales anuales

**UNSCEAR
2008**

Fuentes de exposición en el mundo	Dosis efectiva anual per cápita (mSv)	Rango Dosis individual anual (mSv)	Dosis colectiva mundial (millones de Svp)
Radiación natural	2,4	1 a 13	15.500
Radiodiagnóstico médico	0,6	0,05 a 2,5	3900
Pruebas nucleares en la atmósfera	0,005	-----	32
Accidente de Chernobyl	0,002	-----	12
Producción de energía nuclear	0,0002	Hasta 0,02 en Grupos Críticos	1,2

Gracias por vuestra atención !



