

Tema 2: Núcleo atómico y Desintegración

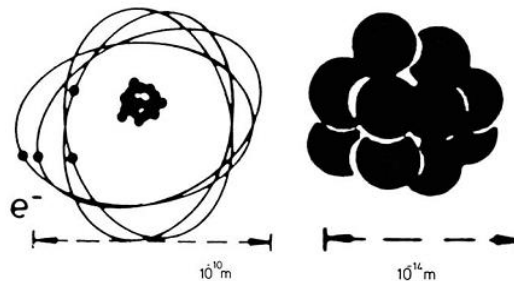
Núcleo atómico.
Radiactividad.
Modos de Decaimiento

1

Núcleo Atómico

- El núcleo atómico es la parte del átomo que contiene toda la carga positiva y la mayoría de la masa.
- Ocupa una región muy pequeña dentro del átomo

Radio atómico $\approx 10^{-10}$ m
Radio nuclear $\approx 10^{-15}$ m



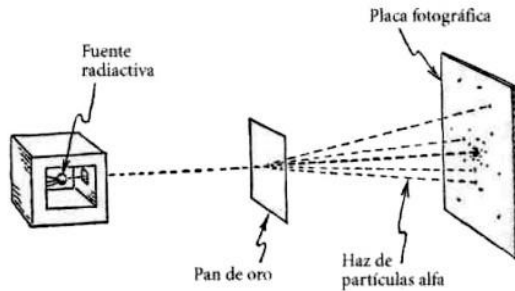
2

Núcleo Atómico

Fue descubierto por Rutherford en 1911

Ernest Rutherford realizó una serie de experimentos haciendo incidir sobre una lámina finísima de oro un delgado haz de partículas α .

Observó que la mayoría de las partículas atravesaban la lámina sin desviarse, algunas se desviaban y muy pocas retrocedían.



Esta experiencia implicaba: que los átomos estaban casi vacíos y que hay una zona cargada positivamente, responsable de las desviaciones y de los choques.

3

¿Cómo está formado el núcleo Atómico?

- ❖ Las partículas básicas que constituyen el núcleo son **protones y neutrones**.
 - Los protones son partículas cargadas positivamente, mientras que los neutrones carecen de carga eléctrica.
 - La carga del protón es igual en magnitud a la del electrón
- ❖ La cantidad de protones (**Z**) define al elemento

Si el átomo es neutro: $Z =$ cantidad de electrons
- ❖ Cantidad de neutrones (**N**) + cantidad de protones (**Z**) = número de **nucleones (A)**

$$A = N + Z$$

4

Energía del núcleo Atómico

- La distribución de los nucleones (protones+neutrones) dentro del núcleo determina la energía de éste.
- Existe:
 - un estado fundamental nuclear (mínima energía) y
 - estados excitados (estados alternativos de mayor energía).
- El pasaje de un núcleo excitado al estado fundamental (desexcitación) va acompañada, al igual que la de los electrones, por la emisión de radiación electromagnética (radiación gamma).

5

¿Qué es un nucleido?

Todos los átomos con igual Z tienen iguales propiedades químicas (Z identifica al elemento químico), sin embargo, **no todos los núcleos con igual Z tienen las mismas propiedades.**

Un nucleido es un tipo de átomo con un número definido de protones y neutrones, distribuidos con un determinado orden dentro del núcleo.

- Es la unidad en Radioquímica, así como el elemento es la unidad en Química.
 - Se conocen hasta el momento unos 120 elementos y más de 2000 nucleidos. Esto significa que átomos del mismo elemento pueden corresponder a nucleidos diferentes.
- De los más de 2000 nucleidos conocidos, sólo 275 son estables; el resto son radiactivos.

6

Clasificación de los Nucleidos



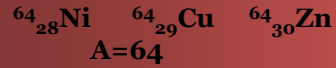
ISÓTOPOS

**IGUAL Z,
DISTINTO N, DISTINTO A**



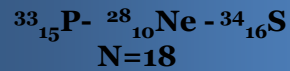
ISÓBAROS

**IGUAL A,
DISTINTO N, DISTINTO Z**



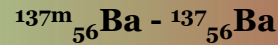
ISÓTONOS

**IGUAL N,
DISTINTO Z, DISTINTO A**



ISÓMEROS

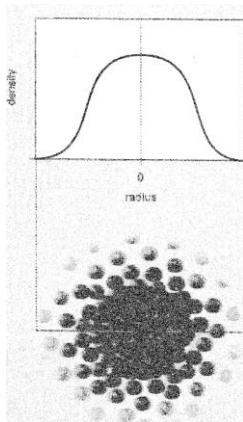
**IGUAL Z, IGUAL N,
IGUAL A
DISTINTA ENERGÍA
NUCLEAR**



7

Propiedades nucleares

RADIO NUCLEAR



Radio nuclear es la distancia al centro para la cual la densidad de empaquetamiento disminuye a la mitad

Representación del núcleo, formado por protones y neutrones densamente empacados

8

Energía del núcleo Atómico

- Al estudiar la variación del radio nuclear al aumentar el número de nucleones:

$$r = r_0 (A)^{1/3}$$

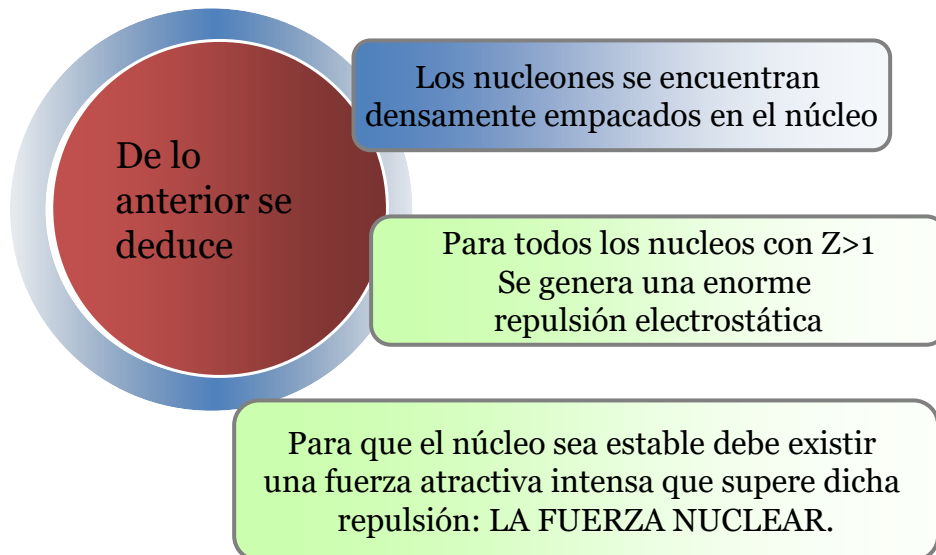
- Si consideramos al núcleo como una esfera, el volumen será proporcional al n° de nucleones
- Como la masa es proporcional al número de nucleones



- La densidad de todos los núcleos será constante y vale aproximadamente $1.2 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$.

9

Energía del núcleo Atómico



10

Energía del núcleo Atómico

Fuerzas nucleares

Las fuerzas nucleares se producen por intercambio de **gluones**, partículas virtuales con masa y carga eléctricas nulas y con spin igual a uno, intercambiadas entre los **quarks** que constituyen a los nucleones.

Propiedades:

- Son fuerzas atractivas entre los nucleones.
- Son de rango muy corto ($\sim 2 \times 10^{-13}$ cm).
- Son extremadamente intensas
(100 veces mayores que las electromagnéticas y 1035 veces superiores a la gravedad).
- Son independientes de la carga.

11

Energía del núcleo Atómico

Las partículas virtuales no existen en todo momento dentro del núcleo, sino que tienen una vida muy breve determinada por el principio de incertidumbre de Heisemberg.



Principio de Incertidumbre de Heisemberg, aplicado a la Energía

Es imposible determinar con exactitud la energía de una partícula en todo momento.

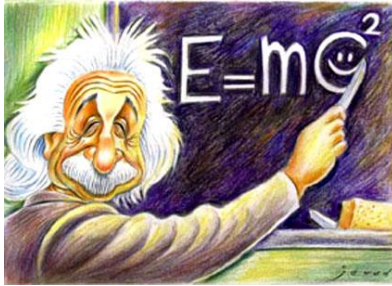
$$\Delta E \times \Delta t < h/2\pi$$

Es posible, por lo tanto, que se cree o desaparezca una cantidad pequeña de energía, en un tiempo muy corto sin violar el principio de conservación.

12

Energía del núcleo Atómico

CONSERVACIÓN DE MASA Y ENERGÍA



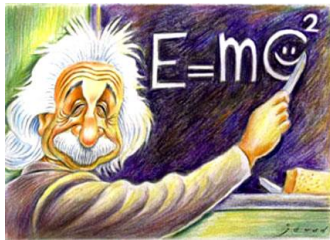
Según la teoría de la relatividad la masa es una forma de energía y la teoría de conservación de la energía se extiende a la suma de ambas magnitudes.

La creación de masa a partir de energía es posible (obtención de partículas subatómicas en un acelerador) y también la desaparición de masa y aparición de energía (radiación de aniquilación)

13

Energía del núcleo Atómico

CONSERVACIÓN DE MASA Y ENERGÍA



Según la teoría de la relatividad la masa es una forma de energía y la teoría de conservación de la energía se extiende a la suma de ambas magnitudes.

Equivalente energético del electrón:

Masa electrón = 0.000549 umas

$E \text{ (MeV)} = m \text{ (umas)} \times 931.5 = 0.511 \text{ MeV}$

Equivalente energético del protón:

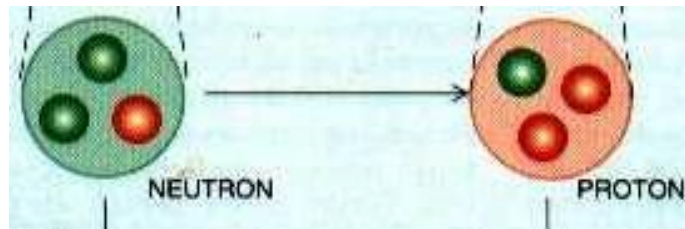
Masa protón = 1.007277 umas

$E \text{ (MeV)} = m \text{ (umas)} \times 931.5 = 938.3 \text{ MeV}$

14

Energía del núcleo Atómico

En definitiva, protón y neutrón no son partículas elementales sino que están formadas por otras mas pequeñas, los quarks. La fuerza que mantiene unidos a los quarks es tan fuerte que también cohesiona a protones y neutrones entre sí, permitiendo que exista el núcleo.



15

Estabilidad nuclear

El núcleo es intrínsecamente inestable debido a la repulsión electrostática entre los protones.

El balance repulsión-atracción determina si un nucleido es estable o radiactivo.

$F_{\text{za repulsión}} > F_{\text{za Nuclear}} \rightarrow \text{Núcleo radiactivo}$

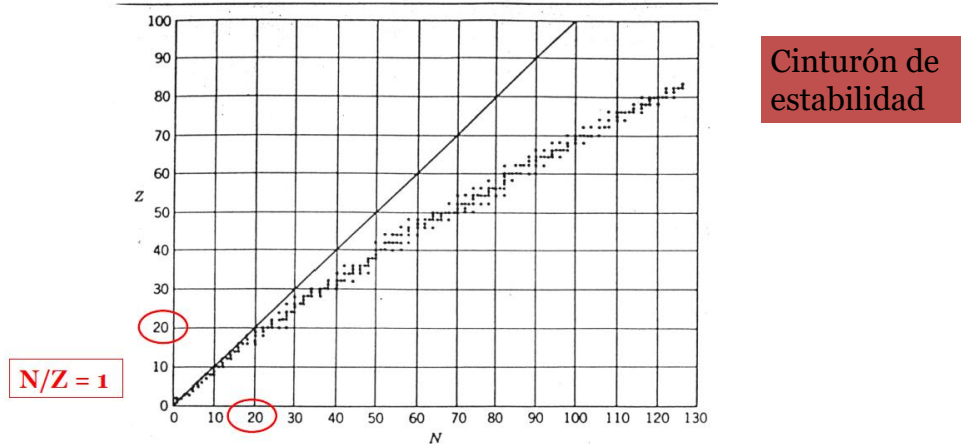
$F_{\text{za repulsión}} < F_{\text{za Nuclear}} \rightarrow \text{Núcleo estable}$

La relación entre N y Z es de fundamental importancia en dicho balance.

16

Energía del núcleo Atómico

Gráfica Z versus N para todos los nucleidos estables



17

Energía del núcleo Atómico

Relación N/Z y estabilidad

Cada elemento puede tener varios nucleidos estables. Estos nucleidos constituyen el "cinturón de estabilidad".

Estudiando la relación N/Z :

- ❖ Si $Z < 20$ $N/Z \cong 1$
- ❖ Si $20 < Z < 83$ $1 < N/Z < 1.5$
- ❖ Si $Z > 83$ todos los nucleidos son radiactivos

18

- La teoría de la relatividad establece que la masa es una forma de energía y la teoría de conservación de la energía se extiende a la suma de ambas magnitudes.

- El equivalente entre masa y energía está dado por

$$E = mc^2$$

- Se cumple que:

$$E \text{ (MeV)} = m \text{ (umas)} \times 931.5$$

21

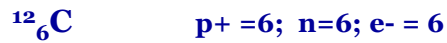
La masa de un átomo es siempre menor que la suma de las masas de las partículas que lo constituyen.

Esa diferencia se denomina defecto de masa (Δm) y es equivalente a la cantidad de energía que el núcleo gasta en mantener juntos a sus nucleones (energía de ligadura).

La energía de ligadura/nucleón es una medida de la estabilidad del núcleo.

22

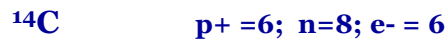
EJEMPLOS



$$\Delta m {}^{12}\text{C} = 6 \times (m_p + m_n + m_e) - 12.000 = 0.0989 \text{ umas.}$$

$$E_1 {}^{12}\text{C} = 92.166 \text{ MeV}$$

$$E_1/\text{nucleón } {}^{12}\text{C} = 7.68 \text{ MeV/nucleón}$$



$$\Delta m {}^{14}\text{C} = 6 \times (m_p + m_e) + 8 \times m_n - 14.00324 = 0.113034 \text{ umas.}$$

$$E_1 {}^{14}\text{C} = 105.29 \text{ MeV}$$

$$E_1/\text{nucleón } {}^{14}\text{C} = 7.52 \text{ MeV/nucleón}$$

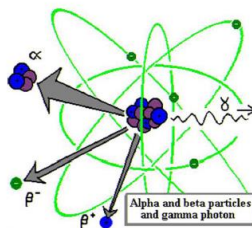
23

Radiactividad

❖ La **radiactividad** es el fenómeno de emisión espontánea de partículas y/o radiaciones que presentan ciertos nucleidos.

Radionucleido

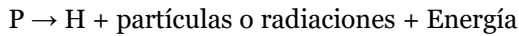
Átomo inestable cuyo núcleo se transforma (desintegra, decae) emitiendo energía bajo la forma de partículas cargadas (α , β) o radiación electromagnética (γ)



24

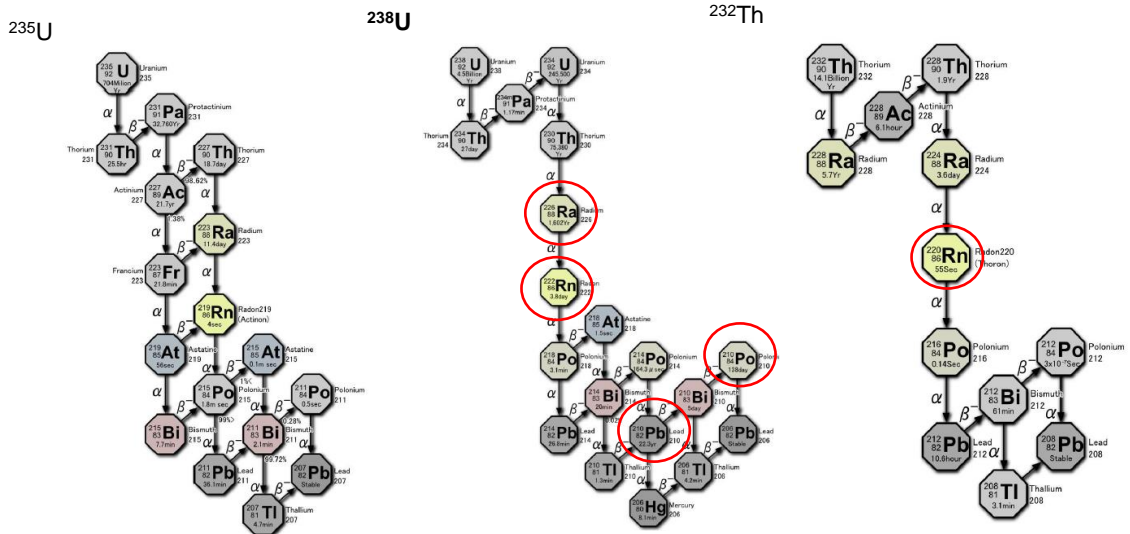
Radiactividad

- ❖ El proceso de **Decaimiento Radiactivo** es al azar y la probabilidad de ocurrencia es propia de cada nucleido y no se ve afectada por las condiciones físicas o químicas en las que el mismo se encuentre.
- ❖ Al radionucleido que experimenta el proceso se le denomina "padre" (P) y al decaer se convierte en el nucleido "hijo" (H), el cual puede ser estable en cuyo caso permanecerá como tal o ser también radiactivo convirtiéndose en un nuevo núcleo " nieto" , etc.



25

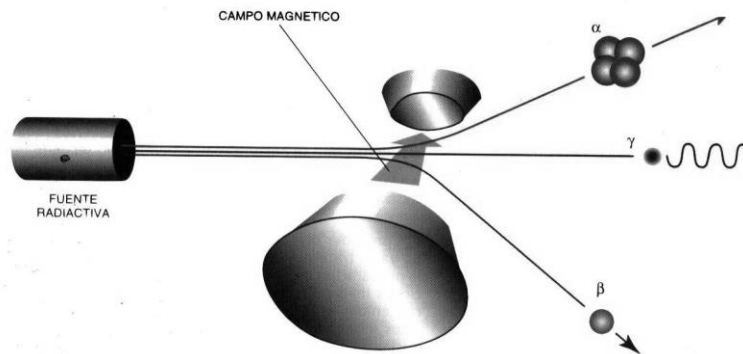
Radiación Natural Terrestre – otros Radionucleidos primordiales



26

Tipos de decaimiento Radiactivo

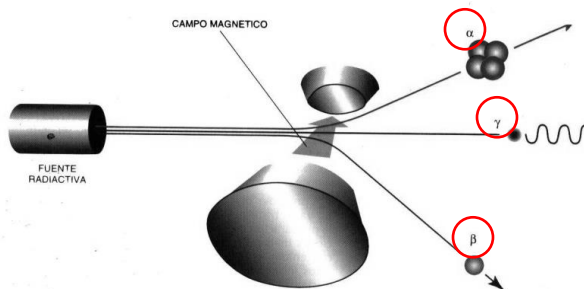
Los más frecuentes e importantes son 3 y se denominan: alfa (α), beta (β) y gamma (γ).



27

Tipos de decaimiento Radiactivo

Las **partículas α** son núcleos de Helio (He^{+2}) formadas por 2 neutrones y 2 protones: ${}^4_2\text{He}$



Las **radiaciones gamma** son cuantos de energía y no poseen masa ni carga por lo que no se desvían en un campo magnético

Las partículas β^- , son electrones y por lo tanto mucho más livianas que las alfa.
El **decaimiento β** comprende 3 procesos: beta negativo (β^-), beta positivo (β^+) y captura electrónica (CE).

28

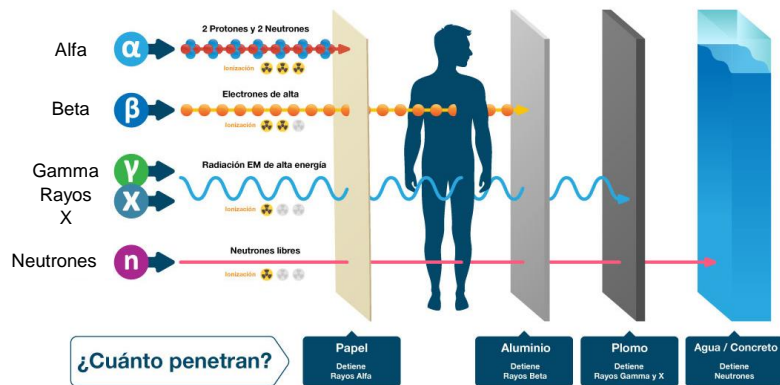
Poder de penetración es la capacidad para atravesar la materia y depende de cuanto interaccione una determinada radiación con el medio por el que avanza.

Rango es la distancia recta que avanzan antes de detenerse

29

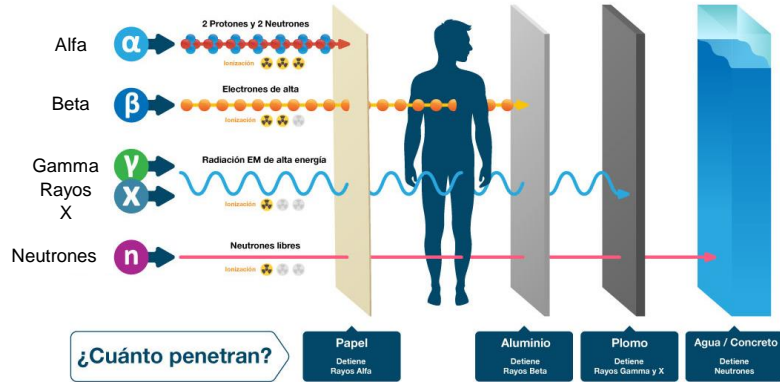
Poder de penetración es la capacidad para atravesar la materia y depende de cuanto interaccione una determinada radiación con el medio por el que avanza.

Rango es la distancia recta que avanzan antes de detenerse



30

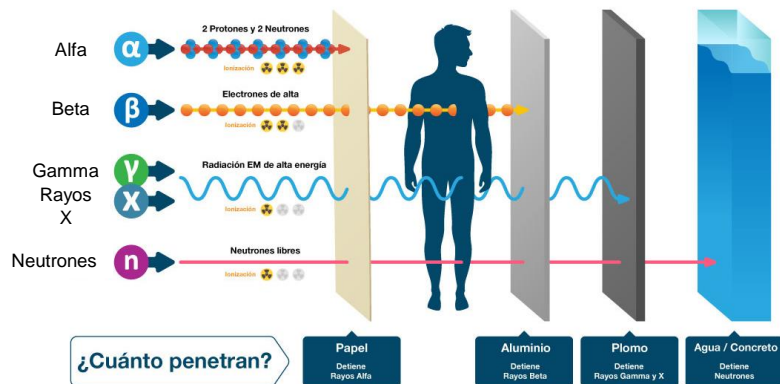
- ❖ Las **partículas α** por ser muy pesadas y cargadas experimentan muchas interacciones con las moléculas del medio que atraviesan y en cada una de ellas pierden parte de su energía. Avanzan muy poca distancia y pueden detenerse con una hoja delgada de papel. A su paso ionizan muchas moléculas del medio por su doble carga positiva y por esto son las más ionizantes.



31

- ❖ Las **partículas β** mucho más livianas y con una sola carga negativa tienen rangos mucho mayores que las α de la misma E y son menos ionizantes que ellas.

- ❖ La **radiación γ** no es directamente ionizante, por no tener carga ni masa y es la más penetrante de todas.



32

Resumiendo:

PODER DE PENETRACION de los principales tipos de radiaciones es :

$$\gamma > \beta > \alpha$$

PODER IONIZANTE es :

$$\alpha > \beta > \gamma$$

33

Tipos de decaimiento

Decaimiento β^-

Decaimiento β^+

Captura electrónica (CE)

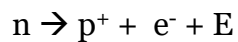
Decaimiento α

Decaimiento γ

34

Decaimiento β^-

- ❖ Se produce en nucleidos con exceso de neutrones ($N/Z > \text{estabilidad}$).
- ❖ Implica la transformación de un neutrón en un protón con emisión de un electrón y energía.

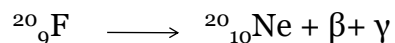
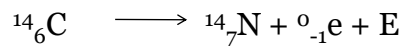


- ❖ El número total de nucleones (A) permanece constante mientras que el número atómico (Z) aumenta en una unidad.

35

Decaimiento β^-

Ejemplos:

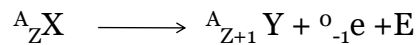


Ecuación General:

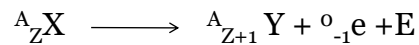


36

Cálculo del defecto de masa y la energía β máxima



$$\Delta m = M \text{ padre} - M \text{ hijo} - m_e$$



$Z e^-$

$Z e^-$

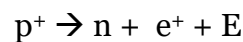
$$\Delta m = M \text{ at. del padre} - M \text{ at. del hijo}$$

$$E = \Delta m \times 931.5$$

37

Decaimiento β^+

- ❖ Se produce en nucleidos con defecto de neutrones ($N/Z < \text{estabilidad}$).
- ❖ Implica la transformación de un protón en un neutrón con emisión de un positrón y energía.



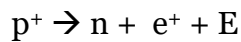
- ❖ El número total de nucleones (A) permanece constante mientras que el número atómico (Z) disminuye en una unidad.



38

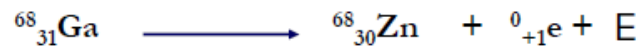
Decaimiento β^+

- ❖ Se produce en nucleidos con defecto de neutrones ($N/Z < \text{estabilidad}$).
- ❖ Implica la transformación de un protón en un neutrón con emisión de un positrón y energía.



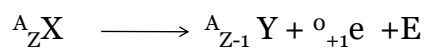
- ❖ El número total de nucleones (A) permanece constante mientras que el número atómico (Z) disminuye en una unidad.

Ejemplo:

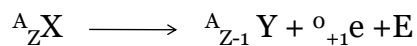


39

Cálculo del defecto de masa y la energía β máxima



$$\Delta m = M \text{ padre} - M \text{ hijo} - m_e$$



$$\underbrace{Z e^-}_{Z e^-} \quad \underbrace{Z e^-}_{Z e^-}$$

$$\Delta m = M \text{ at. del padre} - M \text{ at. del hijo} - 2 m_e$$

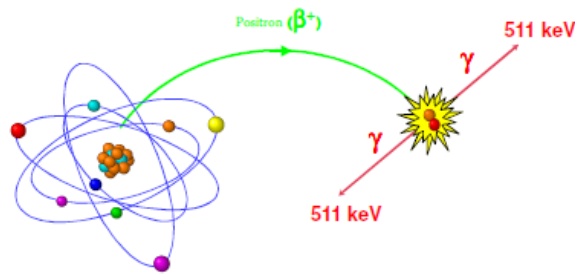
$$E = \Delta m \times 931.5$$

40

Decaimiento β^+

El positrón emitido al encontrarse con algún electrón del medio experimenta el fenómeno de aniquilación, produciéndose la emisión simultánea de 2 rayos γ de 0.51 MeV.

Esta radiación de aniquilación siempre está presente cuando hay emisión de positrones.



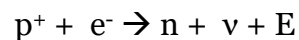
41

Captura electrónica (CE)

❖ Se produce en nucleidos ricos en protones o con defecto de neutrones

($N/Z < \text{estabilidad}$)

❖ Implica la captura de un electrón periférico por parte de un protón nuclear, transformándose ambos en un neutrón, con emisión de un neutrino y energía.



❖ **A** permanece constante mientras que **Z** disminuye en una unidad

42

Captura electrónica (CE)

Fórmula General:

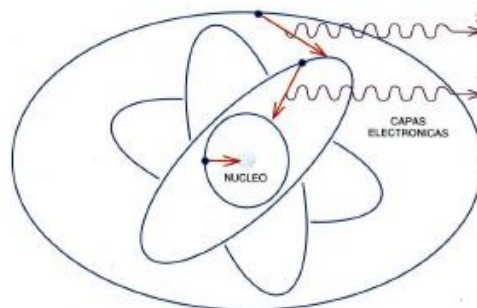


Ejemplos:



43

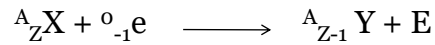
Captura electrónica (CE)



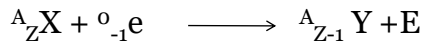
El hueco en las capas electrónicas es llenado por otros electrones más externos produciéndose la emisión concomitante de Rayos X característicos

44

Cálculo del defecto de masa y la energía



$$\Delta m = M \text{ padre} + m_e - M \text{ hijo}$$



$Z e^-$

$Z e^-$

$$\Delta m = M \text{ at. del padre} - M \text{ at. del hijo}$$

$$E = \Delta m \times 931.5$$

45

Modos de decaimiento de núcleos ricos en protones

Si $\Delta m < 2 m_{e^-}$ \longrightarrow Sólo captura electrónica

Si $\Delta m > 2 m_{e^-}$ \longrightarrow Captura electrónica o Emisión de positrones



Z alto \rightarrow Predomina captura electrónica (CE)

Z bajo \rightarrow Predomina emisión de positrones

46

Decaimiento α

$$\alpha = {}^4_2\text{He}$$

- ❖ Ocurre generalmente en nucleidos con $Z > 83$
- ❖ Implica la emisión simultánea de 2 protones y 2 neutrones
- ❖ El número total de nucleones (A) disminuye en 4 y el número atómico (Z) disminuye en 2 unidades.

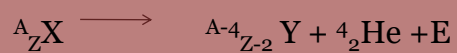
47

Decaimiento α

Ejemplos:

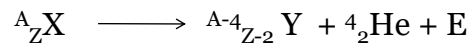


Ecuación General:



48

Cálculo del defecto de masa y la energía β máxima



$$\Delta m = M \text{ padre} - M \text{ hijo} - M {}^4_2\text{He}$$

$$E = \Delta m \times 931.5$$

49

Decaimiento γ

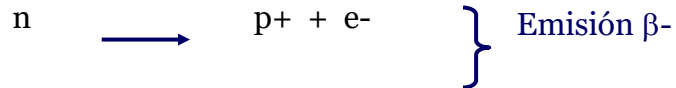
- ❖ Se produce cuando el núcleo se encuentra en estado excitado.
- ❖ Implica la emisión del exceso de energía como un cuanto de radiación electromagnética.
- ❖ No produce cambio ni en el número de nucleones ni en el número atómico.

50

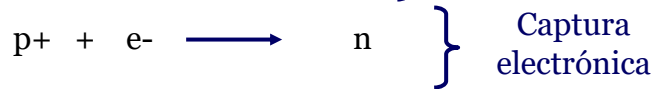
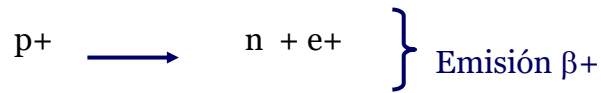
Cuando N/Z cae fuera del “cinturón de estabilidad” el nucleido es radiactivo.

El modo de decaimiento más probable será aquel que lo acerque a la estabilidad:

Si $N/Z >$ estabilidad



Si $N/Z <$ estabilidad



✓ Si $Z > 83 \rightarrow$ emisión alfa

51

Modos de decaimiento de los isótopos del Carbono

Isótopo	N/Z	Tipo de decaimiento
^9C	0.50	β^+
^{10}C	0.67	β^+
^{11}C	0.83	β^+
^{12}C	1.0	estable
^{13}C	1.17	estable
^{14}C	1.33	β^-
^{15}C	1.50	β^-
^{16}C	1.67	β^-

52

Ejemplos

Modos de decaimiento de los isótopos del Cobre

Isótopo	N/Z	Tipo de decaimiento
$^{57}\text{Cu} - ^{62}\text{Cu}$	0.97 - 1.14	β^+
^{63}Cu	1.17	estable
^{64}Cu	1.21	β^+, β^-
^{65}Cu	1.24	estable
$^{66}\text{Cu} - ^{69}\text{Cu}$	1.28 - 1.38	β^-

53

Ejemplos

Modos de decaimiento de los isótopos del Iodo

Isótopo	N/Z	Tipo de decaimiento
$^{111}\text{I} - ^{125}\text{I}$	1.09 - 1.36	β^+ o CE
^{126}I	1.38	$\beta^+, \beta^-, \text{CE}$
^{127}I	1.40	estable
^{128}I	1.42	β^+, β^-
$^{129}\text{I} - ^{140}\text{I}$	1.44 - 1.64	β^-

54

Cinética del decaimiento radiactivo

El decaimiento radiactivo es un proceso al azar



Sólo podemos establecer el número de átomos desintegrados por unidad de tiempo.

La probabilidad de decaimiento es característica de cada nucleido e independiente de las condiciones físicas y químicas.

55

Actividad de una muestra

Cantidad de átomos de la misma desintegrados por unidad de tiempo
Es una medida de la cantidad de sustancia

Unidades

Becquerel (Bq) = dps (desintegraciones por segundo)

Curie (Ci)

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

56

Constante de decaimiento λ

- ❖ Probabilidad de que un átomo se desintegre en la unidad de tiempo.
- ❖ Es característico de cada radionucleido

Unidades

Inversa de tiempo (s^{-1} , h^{-1} , d^{-1})

57

Período de semidesintegración ($t_{1/2}$)

- ❖ Tiempo en el cuál la actividad de la muestra o el número de átomos de la misma disminuye a la mitad.
- ❖ Es característico de cada radionucleido al igual que λ

$$t_{1/2} = \text{Ln } 2 / \lambda$$

Unidades

Unidades de tiempo (s, d, h, a)

58

$$A \xrightarrow{?} B + X$$

$$\frac{-dN_A}{dt} = \lambda N_A$$

↓

Integrando

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Multiplicando por λ

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$\frac{-dN_A}{dt} = A$$

↓

$$A = \lambda N_A$$

59

Tabla de nucleidos

Ordena en forma sistemática la información disponible acerca de los nucleidos conocidos.

Cada cuadrado en la Tabla representa un nucleido y contiene información sobre modo de decaimiento, período de semidesintegración, energía de la radiación, etc.

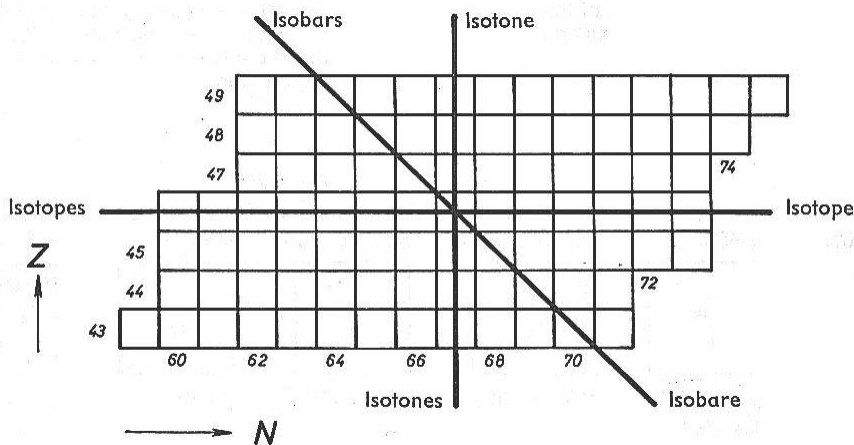
Cada fila de la Tabla contiene todos los isótopos de un mismo elemento y cada columna todos los isótonos.

60

Tabla de nucleidos

61

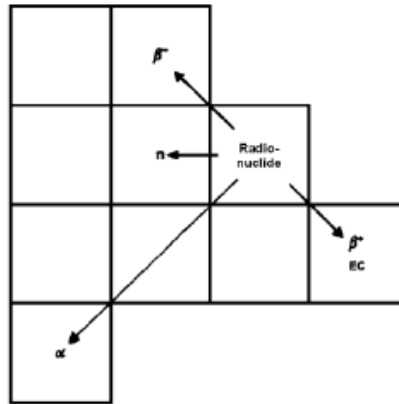
Tabla de nucleidos



62

Tabla de nucleidos

RADIOACTIVE DECAY



63

Tabla Interactiva de Radionucleidos

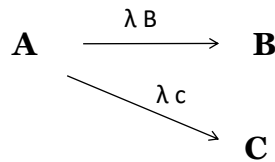
<https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>

64

Ground State isomers														Levels	Gammas	Decay Radiation	Nuclear Moments	Neutron Capture	Fission Yields	Schema Plot							
Comments <input type="checkbox"/> Click on a column header to open the guide • Uncertainty for numeric values refers to the last digits of the value: 12.1 23 means 12.1 ± 2.3 • Data from Sources														· Evaluation: M. SHAMSUZZOHA BASUNIA Publication cut-off: 31-Mar-2014 ENSDF insertion: 2014-08 Publication: Nuclear Data Sheets 121, 561 (2014)													
Nuclide	Energy [keV]	J ^π	T _{1/2} Abund. [mole fract.]	T _{1/2} [s]	Decay Modes BR [%]	Isospin	μ [μ _N]	Q [barn]	R [fm]	Q _{β⁻} [keV]	Q _α [keV]	Q _{EC} [keV]	Q _{β⁻ n} [keV]	S _n [keV]	S _p [keV]												
²¹⁰ ₈₄ Po	0.0	0+	138.376 d 2	1.2E7 1.73E2	α 100				5.5704 176	-3981 8	5407.53 7	-1161.2 18	-11141 5	7658.4 14	4983.4												
²¹⁰ ₈₄ Po	5057.65 5	16+	263 ns 5	2.63E-7 5E-9			9.84 8	-1.297 20																			

65

Cuando un radionucleido presenta varios modos de decaimiento simultáneos:

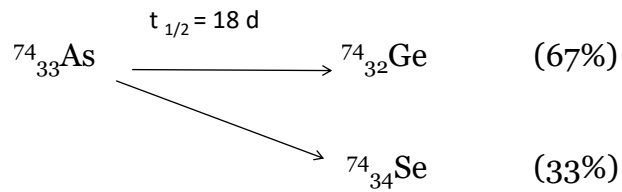


$$\text{Actividad (A)} = \lambda_T N_A$$

$$\lambda_T = \lambda_B + \lambda_C \quad \left\{ \begin{array}{l} \lambda_B = \lambda_T \times (\% B) \\ \lambda_C = \lambda_T \times (\% C) \end{array} \right.$$

66

EJEMPLO



$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda \rightarrow \lambda = \ln 2 / t_{1/2}$$

$$\lambda_T = 0.69 / 18 = 0.039 \text{ d}^{-1}$$

$$\lambda_1 = 0.67 \times 0.039 = 0.026 \text{ d}^{-1}$$

$$\lambda_2 = 0.33 \times 0.039 = 0.013 \text{ d}^{-1}$$

67

Mezcla de radionucleidos

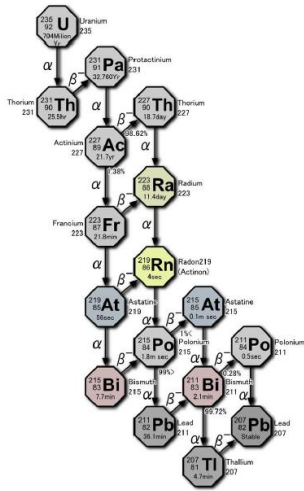
Una muestra radiactiva puede contener más de un nucleido radioactivo.

Si existe una mezcla de radionucleidos pueden darse 2 situaciones diferentes según que los integrantes de la misma estén relacionados genéticamente o no.

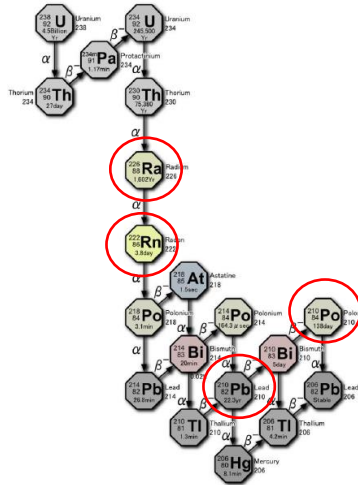
68

Radiación Natural Terrestre – otros Radionucleidos primordiales

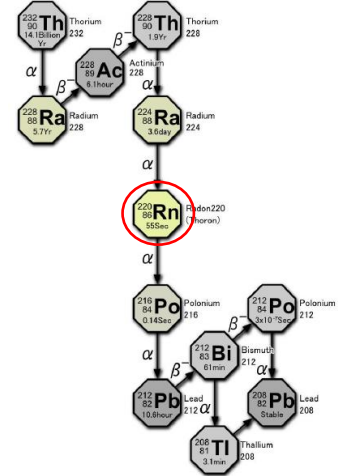
^{235}U



^{238}U

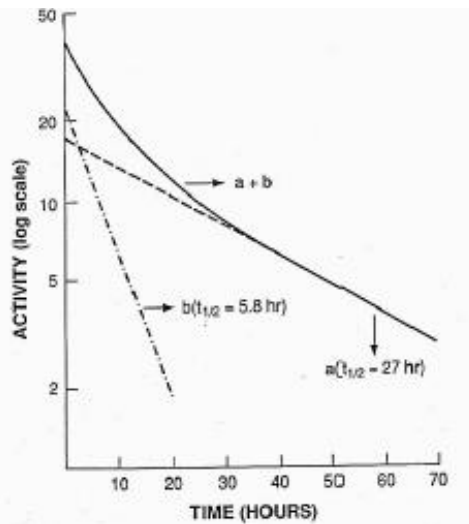


^{232}Th



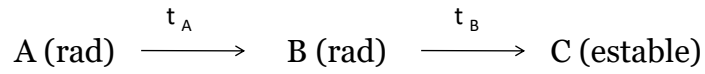
69

Mezcla de dos radionucleidos que decaen independientemente



70

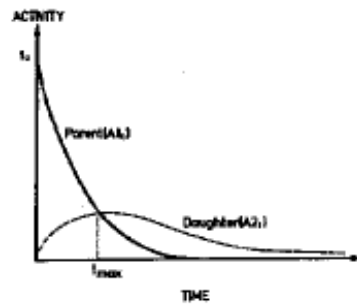
Decaimientos sucesivos



Si $t_A < t_B$

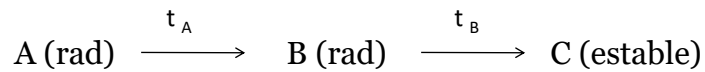


A decae totalmente a B



71

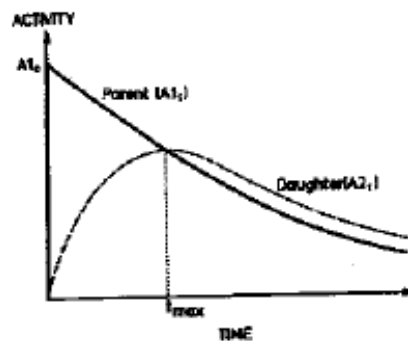
Decaimientos sucesivos



Si $t_A > t_B$



Se establece un EQUILIBRIO



72

Concentración de Actividad

Es la actividad contenida en cierta unidad de volumen.

Puede expresarse en mCi/ mL ; mCi/ μ L o cualquier otra combinación de unidades.

Rige la misma ecuación que se le aplica a la dilución de soluciones:

V_i	Añadimos volumen de diluyente inactivo	V_f
A_i		A_f



$$(A_i) \cdot V_i = (A_f) \cdot V_f$$

73

Concentración de Actividad

Ejemplo:

si a 1 ml de una solución de ^{35}S -cisteina cuya $(A_i) = 4 \text{ mCi/ml}$, se le adicionan 3 ml de Buffer Fosfato 0,05 M, pH = 7,4

¿cuál será la concentración de actividad de la solución resultante?

+ 3 ml de buffer

$$(A_i) \cdot V_i = (A_f) \cdot V_f$$

$V_i = 1 \text{ mL}$
 $A_i = 4 \text{ mCi/ml}$

$V_f = 1+3 \text{ mL}$
 $A_f = 4 \text{ mCi}/4 \text{ ml} = 1 \text{ mCi}/ \text{ ml}$

74

Concentración de actividad de una muestra: 100 Bq/ kg de ^{210}Po

Fecha de muestreo: hace 45 días

$T_{1/2}$: 138 días

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$