

# **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN FORMACIÓN DEL PROFESORADO DE EDUCACIÓN  
SECUNDARIA OBLIGATORIA Y BACHILLERATO, FORMACIÓN PROFESIONAL Y  
ENSEÑANZAS DE IDIOMAS**

**ESPECIALIDAD EN FÍSICA Y QUÍMICA**

## **Enseñanza de la Física Nuclear en Bachillerato**

**Marta Sanz García**

**Curso 2012/2013**

**Universidad Nacional de Educación a Distancia**



# ÍNDICE

1. Justificación de la propuesta práctica
2. Fundamento teórico a nivel universitario
  - 2.1. Constitución del núcleo atómico. Características de la estructura del núcleo
  - 2.2. Fuerzas entre nucleones
  - 2.3. Propiedades del núcleo atómico
    - 2.3.1. Nucleidos
    - 2.3.2. Momento angular nuclear
    - 2.3.3. Defecto de masa y energía de enlace por nucleón
  - 2.4. Descubrimiento de la radiactividad natural. Propiedades generales de las radiaciones.
  - 2.5. Familias radiactivas
  - 2.6. Cinética del decaimiento radiactivo
    - 2.6.1. Ley de decaimiento radiactivo
    - 2.6.2. Actividad radiactiva
    - 2.6.3. Cadenas de desintegración radiactiva. Equilibrios nucleares
  - 2.7. Tipos de emisión radiactiva
    - 2.7.1. Desintegración alfa
    - 2.7.2. Desintegración beta ( $\beta^-$ )
    - 2.7.3. Desintegración  $\beta^+$
    - 2.7.4. Captura electrónica
    - 2.7.5. Emisión gamma
    - 2.7.6. Otros tipos de desintegraciones nucleares
  - 2.8. Reacciones nucleares
    - 2.8.1. Balance energético de una reacción nuclear
    - 2.8.2. Sección eficaz de reacción nuclear
    - 2.8.3. Tipos de reacciones nucleares
    - 2.8.4. Reacciones de fisión nuclear
    - 2.8.5. Reactores de fisión
    - 2.8.6. Problemática de los residuos radiactivos procedentes de los reactores nucleares
    - 2.8.7. Reacciones de fisión incontroladas
    - 2.8.8. Reacciones de fusión

### 3. Referencia al ámbito de la física y la química y al contexto de la educación secundaria

- 3.1. Introducción: descubrimiento de la radiactividad y su naturaleza
- 3.2. Composición del núcleo. Nucleones. Número atómico y número másico. Nucleidos. Isótopos
- 3.3. Estabilidad de los núcleos. Energía de enlace nuclear
  - 3.3.1. Fuerza nuclear fuerte
  - 3.3.2. Defecto de masa y energía de enlace
- 3.4. La desintegración radiactiva y sus leyes.
  - 3.4.1. Leyes de los desplazamientos radiactivos (desintegración alfa, beta y gamma)
  - 3.4.2. Ley de la desintegración radiactiva. Actividad. Periodo de semidesintegración. Vida media
- 3.5. Aplicaciones de la radiactividad
- 3.6. Reacciones nucleares
- 3.7. Fisión y fusión nuclear
  - 3.7.1. Fisión nuclear
  - 3.7.1. Fusión nuclear
- 3.8. Reactores nucleares
  - 3.8.1. Reactores nucleares de fisión
  - 3.8.2. Reacciones de fisión incontroladas
- 3.9. Riesgos de la energía nuclear. Problemática de los residuos
  - 3.9.1. Los peligros de la radiactividad
  - 3.9.2. La problemática de los residuos radiactivos

### 4. Planificación de la enseñanza-aprendizaje

### 5. Metodología y estrategias de enseñanza

### 6. Diseño de recursos y materiales didácticos

- 6.1. Preparación de la práctica de laboratorio
- 6.2. Descripción de la actividad de determinación de la antigüedad de una muestra por  $^{14}\text{C}$
- 6.3. Descripción de la actividad de seguimiento del curso de una reacción bioquímica
- 6.4. Reactor de Fukushima y problemática de la energía nuclear

7. Evaluación de la enseñanza y del aprendizaje de los alumnos
8. Conclusiones
9. Recomendaciones y propuestas de mejora de la propuesta práctica desarrollada.
10. Reflexión
11. Bibliografía

## 1. JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA PRÁCTICA

La Física Nuclear se imparte en el segundo curso de la asignatura de Física, y viene incluida en la legislación vigente como parte de los contenidos mínimos de bachillerato. En el Real Decreto 1467/2007, por el que se establece la estructura del bachillerato y se fijan sus enseñanzas mínimas, La Física Nuclear aparece como el último de tres apartados dentro del sexto y último bloque de contenidos, “Introducción a la Física Moderna”. Así mismo, en el Decreto 45/2008, por el que se establece el currículo de bachillerato de la Comunidad Autónoma de La Rioja, La Física Nuclear aparece como el último de tres apartados dentro del séptimo y último bloque de contenidos, “Introducción a la Física Moderna”.

A pesar de ser un tema reconocido como esencial por la legislación, es bastante común que la Unidad Didáctica de Física Nuclear se sitúe al final del temario, y que a menudo se aborde sólo con pinceladas. Si bien la falta de tiempo es un problema a tener en cuenta, muchos docentes son conscientes de la dificultad que acarrea el aprendizaje de Física Nuclear a este nivel. La Física Nuclear a nivel de bachillerato es considerada ardua, abstracta y alejada de la experiencia de los alumnos.

Sin embargo, la Física Nuclear nos permite responder preguntas sobre cómo está formada la materia y cómo ha evolucionado el universo. Ha permitido el desarrollo de aplicaciones que van desde las terapias y diagnóstico médicos mediante técnicas como la tomografía por emisión de positrones (PET), hasta la generación de energía o el análisis de obras de arte o de restos arqueológicos.

Por lo tanto, podemos decir que la enseñanza de la Física Nuclear plantea diversos retos didácticos al docente, al tratarse de un tema de contenidos básicos del Bachillerato, con multitud de aplicaciones y relevancia para la ciencia y la sociedad, pero que presenta diversas dificultades para su aprendizaje por parte del alumnado, que en este trabajo vamos a intentar abordar.

Para abordar las dificultades del aprendizaje de la Física Nuclear, nos basaremos en el siguiente planteamiento teórico. En todo proceso de enseñanza-aprendizaje es deber del docente diseñar y emplear recursos para tratar que los alumnos asienten conceptos, tratar de favorecer ciertas actitudes, y motivar al alumnado. Para conseguir un adecuado aprendizaje son necesarios enfoques y estrategias centrados en el aprendizaje de los estudiantes, estimular su interés y curiosidad, y de esta manera, fomentar un aprendizaje autónomo orientado por el profesor. Varios autores enfatizan que el aprendizaje debe estar basado en un contexto, y que en ausencia de éste, las asociaciones de cada individuo pueden ser no significativas. Por lo tanto, es conveniente desarrollar estrategias para el aprendizaje significativo basadas en una enseñanza situada y experiencial: solución de problemas auténticos, análisis de casos, proyectos, simulaciones situadas, etc (Falk y Dierking (1992, 2000); Díaz Barriga, F. (2003)). La experimentación proporciona experiencias para reafirmar o cuestionar sus ideas y puede terminar de dar sentido a aspectos que se estudian y son demasiado abstractos para entenderlos sin poder acercarse a ellos de una forma más directa, familiarizándonos con ellos. El hecho de enfrentarnos con “fenómenos reales” y permitir que los experimentemos, amplía nuestra percepción de la realidad y construcciones mentales.

La Física Nuclear nos va a permitir realizar este enfoque didáctico de la enseñanza situada y experiencial. La Física Nuclear da pie a utilizar ejemplos de sus aplicaciones prácticas y ejemplos de la vida real (por ejemplo, accidentes nucleares, o el debate social sobre el uso de la energía nuclear), y que esto sirva como estímulo para motivar a los alumnos a aprender la base teórica de la Física Nuclear, y como contexto sobre el cual construir un mejor aprendizaje. Así mismo, la realización de experimentos sencillos que demuestren la existencia de la radiactividad en nuestro entorno, puede cambiar la concepción de los alumnos sobre la radiactividad, dejando de ser algo abstracto y puramente teórico, y permite un mejor asentamiento de las ideas al experimentar y enfrentarse a fenómenos reales.

### **Objetivo:**

Acercar a los alumnos de segundo de bachillerato el estudio de la Física Nuclear usando ejemplos y aplicaciones de ésta en la vida real, y realizando experimentos sencillos que puedan abordarse en el aula de bachillerato, y de esta manera facilitar la adquisición de los fundamentos teóricos de la Física Nuclear a nivel de bachillerato, y conseguir un aprendizaje significativo.

## **2. FUNDAMENTO TEÓRICO A NIVEL UNIVERSITARIO**

### **2.1. Constitución del núcleo atómico. Características de la estructura del núcleo**

El primer modelo atómico que consideró la existencia del núcleo fue el modelo de Rutherford. Rutherford propuso este modelo para explicar los resultados de su experimento de la lámina de oro, realizado en 1911. El experimento consistió en incidir un haz de partículas alfa sobre una fina lámina de oro y observar cómo dicha lámina afectaba a la trayectoria de dichos rayos. Según el modelo atómico anterior, el modelo de Thomson, las partículas alfa atravesarían la lámina metálica sin desviarse demasiado de su trayectoria. Sin embargo, se observó que un pequeño porcentaje de partículas se desviaban o rebotaban hacia la fuente radiactiva, y que la mayoría de las partículas atravesaban la hoja metálica. Para Rutherford, estos hechos indicaban que gran parte del átomo está vacío, que la desviación de las partículas alfa indica que el deflector y las partículas poseen carga positiva, pues la desviación siempre era dispersa. Y el rebote de las partículas alfa indicaba un encuentro directo con una zona fuertemente positiva del átomo y a la vez muy densa. El modelo atómico de Rutherford mantenía el planteamiento de Thomson, de que los átomos poseen electrones, pero su explicación sostenía que todo átomo estaba formado por un núcleo y una corteza. El núcleo debía tener carga positiva, un radio muy pequeño y en él se concentraba casi toda la masa del átomo. La corteza estaría formada por una nube de electrones que orbitan alrededor del núcleo.

El núcleo está formado por una aglomeración de protones ( $p^+$ ) y neutrones ( $n$ ) en una región muy pequeña del espacio y en el centro del átomo, del orden de  $10^{-14}$  de diámetro (la diezmillonésima parte del radio atómico). Los protones y neutrones, partículas constituyentes del núcleo, se denominan nucleones. Son partículas con spin semientero de  $1/2$ , y por lo tanto, como los electrones, están sujetos al Principio de exclusión de Pauli. Este es un hecho importante, ya que protones y neutrones en un

núcleo atómico no pueden estar en un mismo estado cuántico, por lo que se distribuyen en una serie de capas nucleares análogas a las de los electrones en el modelo atómico. Además, de la suma del spin de protones y neutrones se desprende el spin nuclear.

La masa de protones y neutrones es muy similar, y mucho mayor que la del electrón:

$$\begin{aligned}m_{e^-} &= 9,109 \cdot 10^{-28} \text{ g} \\m_{p^+} &= 1,673 \cdot 10^{-24} \text{ g} \\m_n &= 1,675 \cdot 10^{-24} \text{ g}\end{aligned}$$

## 2.2. Fuerzas entre nucleones

La primera pregunta que nos podemos hacer es por qué se mantienen unidos en el núcleo los protones y los neutrones.

En una primera aproximación, se dice que existe un campo de fuerzas que actúa sobre todos los nucleones y una fuerza resultante, o fuerza central, de todas las interacciones mutuas entre los nucleones, que los mantiene unidos.

Estas interacciones mutuas deben ser, en primer lugar, de tipo electromagnética. Estas fuerzas explican el movimiento de los electrones en torno al núcleo, pero no puede ser el único tipo de interacción en el núcleo, ya que debido a la repulsión de los protones, el núcleo se destruiría. Debe existir otro tipo de fuerza que mantenga unidos a los nucleones y que explique la estabilidad del núcleo. Esta fuerza no está relacionada con la carga de las partículas, y debe ser de mayor intensidad que la electromagnética para compensar el efecto desestabilizante de ésta. Esta fuerza es la Fuerza Nuclear o Fuerte.

Hay cuatro tipos de interacciones en el núcleo, que se dividen en dos grupos según se traduzcan a largo o corto alcance:

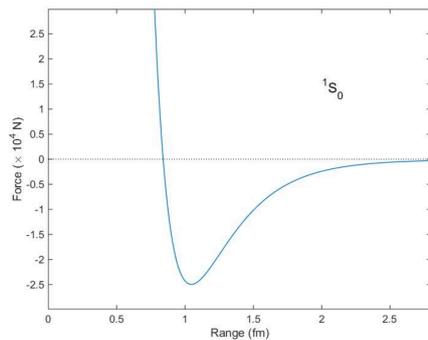
- Fuerzas de largo alcance: gravitatorias y electromagnéticas.
- Fuerza gravitatoria:  $F_{gr} = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$   $\gamma = 6,61 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2$
- Fuerza electromagnética:  $F_{em} = K \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$   $K = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$

La constante  $\gamma$  es mucho más pequeña que  $K$ , por lo que la intensidad de las  $F_{em}$  es mucho mayor que las  $F_{gr}$ , por lo que éstas últimas son despreciables frente a las primeras.

- Fuerzas de corto alcance: Fuerza nuclear o fuerte, y Fuerza débil.
- Fuerza nuclear. Es de intensidad mayor que la electromagnética, y atractiva, para que los núcleos permanezcan unidos. Características principales:

1. Son atractivas a distancias del orden de 1fm, para asegurarnos de que los nucleones permanecen unidos.

2. A distancias menores de 1 fm, son repulsivas, para evitar colapsos (podrían formarse núcleos gigantes).
3. No son de carácter electromagnético, puesto que actúan sobre los neutrones, ni gravitatorio, ya que necesitamos una fuerza mucho más intensa. Son independientes de la carga, y la intensidad de la fuerza es igual para  $p^+ - p^+$ ,  $n - n$ , o  $n - p^+$
4. Son de corto alcance. A distancias superiores de su radio de acción (radio nuclear), no se manifiestan y se hacen bruscamente cero.
5. Su intensidad es del orden de 10 veces mayores en magnitud que las fuerzas electromagnéticas.
6. Es saturada, puesto que cada nucleón interacciona sólo con sus vecinos.
7. Tienen carácter no central: cada nucleón interactúa independientemente de la posición mutua con los nucleones con los que interactúa.



**Figura 1.** Representación de la Fuerza nuclear frente a la distancia. Reproducido de Bdushaw - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=40780930>

- Fuerza débil. Es de intensidad muy pequeña respecto a la nuclear y la electromagnética, pero superior a la gravitatoria.

## 2.3. Propiedades del núcleo atómico

### 2.3.1. Nucleidos

El núcleo se identifica o caracteriza por tres parámetros:

- número de protones,  $Z$  (nº atómico)
- número de nucleones,  $A$  (nº másico)
- número de neutrones,  $N$   $N=A-Z$

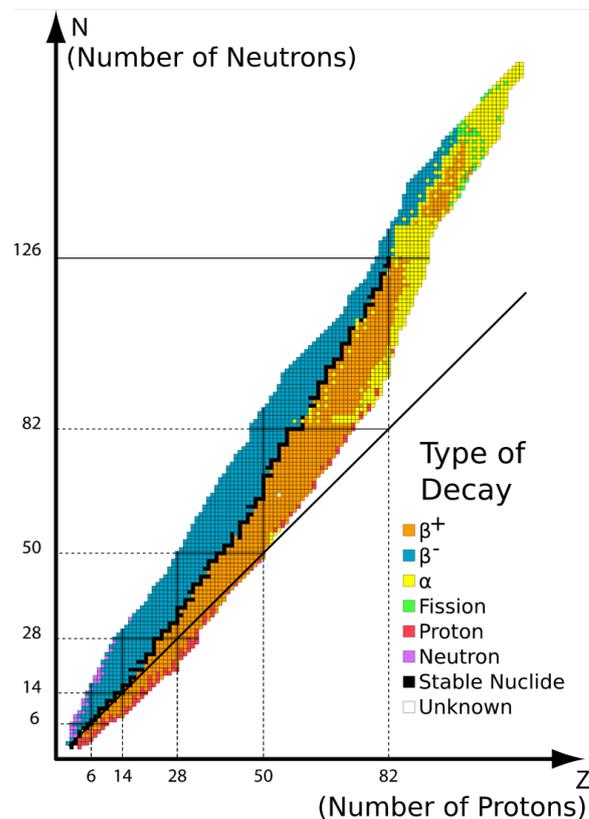
Todos los átomos con igual  $Z$  corresponden al mismo elemento; sin embargo, no todos los núcleos con igual  $Z$  tienen las mismas propiedades. Por este motivo es necesario definir una nueva unidad, el nucleido.

Cada una de las posibles agrupaciones de nucleones (protones y neutrones), con un estado energético definido, se denomina nucleido, y se representa con  ${}^A_Z X$ . No existe un número determinado de nucleidos (naturales o artificiales), ya que no hay una proporción fija de neutrones y protones permitidos. Hay una flexibilidad grande en el número de  $n$  y  $p^+$  que pueden constituir un nucleido, que viene dada por la Fuerza nuclear. El número de elementos conocidos hasta el momento es cercano a los 120 (año 2012), mientras que el número de nucleidos conocidos es alrededor de 2000, de los cuales sólo 275 son estables. El resto son inestables o radiactivos.

Un núcleo es estable cuando permanece inalterado durante largos periodos de tiempo; sin embargo, un nucleido inestable o radiactivo se transforma espontáneamente durante un periodo de tiempo determinado y característico de cada nucleido, para transformarse en un nucleido estable.

Si representamos el número de neutrones frente al número de protones (figura 2), observamos que la mayoría de los nucleidos ligeros ( $Z < 30$ ,  $N < 30$ ) (estables o inestables) están en la diagonal  $Z=N$ . Para núcleos pesados, el número de neutrones es mayor que el de protones, y estos nucleidos se separan de la diagonal  $Z=N$ . Esta característica se debe a un efecto de estabilización del núcleo. Los nucleidos tienen que tener más neutrones para compensar el efecto de repulsión coulombiana entre los protones que tienden a romper el núcleo. Mediante interacciones nucleares, los neutrones extra realizan un efecto estabilizante.

El área donde se localizan los núcleos estables se denomina banda de estabilidad. Todos los nucleidos con configuración  $n/p^+$  no estable están fuera de la banda de estabilidad de los nucleidos, y son radioisótopos (figura 2). Se descomponen emitiendo radiactividad hasta convertirse en núcleos con una configuración neutrón–proton adecuada. Todos los núcleos de  $Z > 83$  son inestables.



**Figura 2.** Gráfica del número de neutrones frente al número de protones de nucleidos estables y radiactivos. Cuando se eleva el número atómico, los núcleos estables presentan una mayor relación neutrones/protones. El área donde se localizan los núcleos estables se denomina banda de estabilidad. La mayoría de los núcleos inestables se sitúan fuera de dicha banda. Todos los núcleos de  $Z > 83$  son inestables.

Reproducido de Table\_isotopes.svg: Napy1kenobiderivative work: Sjlegg (talk) - Table\_isotopes.svg, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6703703>

Existen tres tipos de nucleidos:

- Isótopos: nucleidos con mismo Z, distinto N y distinto A. En la Figura 2, todos los que coinciden en la misma horizontal.
- Isótonos: nucleidos con distinto Z, mismo N y distinto A. En la Figura 2, todos los que coinciden en la misma vertical.
- Isóbaros: nucleidos con distinto Z, distinto N y mismo A. En la Figura 2, todos los que están en las líneas a 45°.

No existe ninguna regla en cuanto al número de isótopos que tiene un elemento.

### 2.3.2. Momento angular nuclear

El momento angular nuclear o spin nuclear (I) surge de la combinación de los momentos angulares de los protones y neutrones.

El protón y el neutrón tienen el mismo spin 1/2, igual que el electrón, y obedecen el principio de exclusión de Pauli. Cada neutrón y protón en el núcleo posee momento angular orbital y momento angular de espín, y estos pueden acoplarse para dar lugar al momento angular nuclear total:

$$|\vec{I}| = \hbar \sqrt{I(I+1)}$$

El momento angular total de un núcleo, respecto de su propio eje, es medible. Existen  $2I+1$  orientaciones posibles, de  $-I$  a  $+I$ .

### 2.3.3. Defecto de masa y energía de enlace por nucleón

La energía potencial del núcleo es menor que la energía potencial de las partículas que lo componen por separado; de hecho, los núcleos son estables, y cuando los nucleones constituyentes del núcleo se unen para formar el núcleo, se desprende energía. Esta energía desprendida tiene su origen en lo que se llama defecto de masa.

El valor obtenido experimentalmente de la masa de un átomo es siempre menor al obtenido de forma teórica. A este defecto entre la masa calculada de forma teórica y la masa determinada experimentalmente se le denomina defecto de masa ( $\Delta m$ ) y se puede determinar (en u.m.a.) según la siguiente expresión:

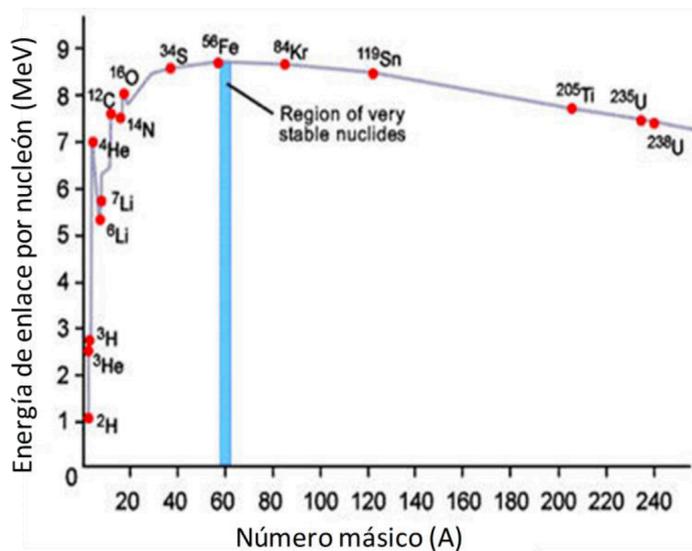
$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) m_n - M > 0$$

donde Z es el número atómico,  $m_p$  es la masa del protón,  $A-Z$  es el número de neutrones,  $m_n$  es la masa del neutrón y M es la masa del núcleo determinada experimentalmente.

Este defecto de masa equivale a energía (según la ecuación  $E = \Delta m \cdot c^2$ ), y se denomina energía de enlace del núcleo. Es la energía desprendida al formarse el núcleo desde sus partículas constituyentes. El defecto de masa es, por tanto, la responsable de que los núcleos sean más estables que las partículas por separado.

Las energías de enlace de los núcleos son enormes, oscilan entre 2,2 MeV para el deuterio y 1640 MeV para el isótopo bismuto-209.

En lugar de energía de enlace del núcleo se suele hablar de energía de enlace por nucleón, que se obtiene de dividir la primera entre el número de nucleones que tiene el núcleo considerado. La gráfica siguiente (figura 3) representa cómo varía esta energía de enlace por nucleón con respecto al número másico ( $A$ ) para los diferentes isótopos conocidos. La energía de enlace por nucleón nos da idea de la estabilidad de un núcleo. Se puede observar que cuanto mayor es la energía de enlace por nucleón más estable es el núcleo. El máximo de la curva corresponde a los núcleos más estables. El núcleo más estable es el hierro-56, al que corresponde una energía de enlace de 8,8 MeV/nucleón. Las mayores energías de enlace por nucleón se presentan para números másicos comprendidos entre 40 y 100 aproximadamente.



**Figura 3.** Representación de la energía de enlace por nucleón para varios nucleidos. Reproducido de: <http://cuentos-cuanticos.com/2011/11/03/de-strozando-nucleos-la-fision/>. Creative Commons CC BY-NC

#### 2.4. Descubrimiento de la radiactividad natural. Propiedades generales de las radiaciones.

A finales del siglo XIX se descubrió la radiactividad natural, lo que dio lugar a la Física nuclear y a la terminología en este campo. Existen núcleos en la naturaleza con una configuración no estable de  $n/p^+$  (neutrones/protones). Son núcleos inestables o radiactivos, que intentan aproximarse a configuraciones  $n/p^+$  estables emitiendo ciertas partículas de forma espontánea.

El fenómeno de la radiactividad fue descubierto casualmente por Henri Becquerel en 1896. Becquerel estudiaba los fenómenos de fluorescencia y fosforescencia, para lo cual colocaba un cristal de pechblenda, mineral que contiene uranio, encima de una placa fotográfica envuelta en papel negro y lo exponía al sol. Cuando desenvolvía la placa la encontraba velada, hecho que atribuía a la fosforescencia del cristal. Los días siguientes no hubo sol y dejó en un cajón la placa envuelta con papel negro y con la sal de uranio encima. Cuando sacó la placa fotográfica estaba velada, y no podía deberse a la fosforescencia ya que no había sido

expuesta al sol. La única explicación era que la sal de uranio emitía una radiación muy penetrante. Sin saberlo, Becquerel había descubierto lo que Marie Curie llamaría más tarde radiactividad.

En 1898, Pierre y Marie Curie estudiaron emisiones de minerales de uranio (pechblenda) y encontraron mayor actividad que la debida al uranio. Aislaron un nuevo elemento, el polonio y meses después el radio, realizando cristalizaciones sucesivas del mineral. En 1903 recibieron el premio Nobel de física junto con Becquerel por el descubrimiento de la radiactividad natural.

Rutherford y los esposos Curie también pusieron de manifiesto que la radiación era capaz de ionizar el aire contenido entre dos placas entre las que se aplicaba una diferencia de potencial. El propio Rutherford estableció tres componentes diferentes en la radiación emitida por estas sustancias: las denominó radiación alfa, beta y gamma, respectivamente.

La alfa era poco penetrante, de hecho era detenida por una simple hoja de papel y su recorrido en aire era de algunos centímetros, aunque tenía un alto poder ionizante. Por su parte, la beta podía atravesar hojas de aluminio y su recorrido en el aire ya alcanzaba algunos metros. Finalmente, la gamma era muy penetrante. Tan sólo era detenida por gruesos bloques de plomo y podía recorrer hasta decenas de metros.

Diversos experimentos con campos magnéticos y eléctricos demostraron que la radiación alfa estaba cargada positivamente. La beta también presentaba carga, si bien era negativa. En oposición a las anteriores, la gamma no experimentaba desviaciones en presencia de los campos por lo que se asoció a una onda electromagnética. Es decir, tenía la misma naturaleza que la luz.

- Las partículas alfa son núcleos de Helio, y fueron identificadas como tales por Rutherford, lo que se oponía a antiguas afirmaciones de que los núcleos son inalterables.
- En 1900, Becquerel identifica los rayos beta como electrones. Se emiten espontáneamente, a velocidades del orden de la velocidad de la luz. Son electrones de origen nuclear y no de la corteza atómica, que provienen de procesos que permiten que neutrones y protones se conviertan en electrones.
- Los rayos gamma son radiación electromagnética de alta energía. Un nucleido en un estado nuclear excitado, al pasar al estado fundamental, emite energía en forma de radiación electromagnética.

## **2.5. Familias radiactivas**

Cuando un núcleo que emite radiación, da lugar a otro núcleo distinto también radiactivo, que emite nuevas radiaciones, el proceso continuará hasta que aparezca un núcleo con una configuración estable, no radiactivo. Todos los núcleos que proceden del inicial (núcleo padre) forman una serie o familia radiactiva.

Se conocen cuatro series o familias radiactivas (tabla 1), tres de las cuales existen en la naturaleza ya que proceden de los radionúclidos primigenios. Se llaman radionúclidos primigenios a aquellos que sobreviven en la Tierra desde su formación. Esto se debe a que su semivida es comparable a la edad de la Tierra. Las tres series que existen en la naturaleza son la del uranio (figura 4), del actinio y del torio. La cuarta serie radiactiva es la del neptunio, el cual de acuerdo a su semivida, debería haberse extinguido, pero las pruebas nucleares realizadas han liberado estos núcleos y por lo tanto ha vuelto aparecer esta cadena radiactiva.

Tabla 1. Las cuatro familias radiactivas

Masas atómicas	Denominación de la familia	Primer elemento de la familia	Periodo de desintegración	Último elemento de la familia
4n	torio	$^{232}_{90}\text{Th}$	$1,39 \cdot 10^{10}$ años	$^{208}_{82}\text{Pb}$
4n+1	neptunio	$^{237}_{93}\text{Np}$	$2,20 \cdot 10^6$ años	$^{209}_{83}\text{Pb}$
4n+2	uranio	$^{238}_{92}\text{U}$	$4,50 \cdot 10^9$ años	$^{206}_{82}\text{Pb}$
4n+3	actinio	$^{235}_{92}\text{U}$	$7,10 \cdot 10^8$ años	$^{207}_{82}\text{Pb}$

En cada serie todos los núcleos están relacionados. Por ejemplo, en la del torio, todos los núcleos de la serie tienen números másicos iguales a 4n, siendo n un número entero cualquiera. Todas estas familias, por desintegración sucesiva de cada uno de sus miembros, terminan en isótopos estables del plomo.

Existen, asimismo, otros muchos núcleos radiactivos que no participan en ninguna familia de desintegración.

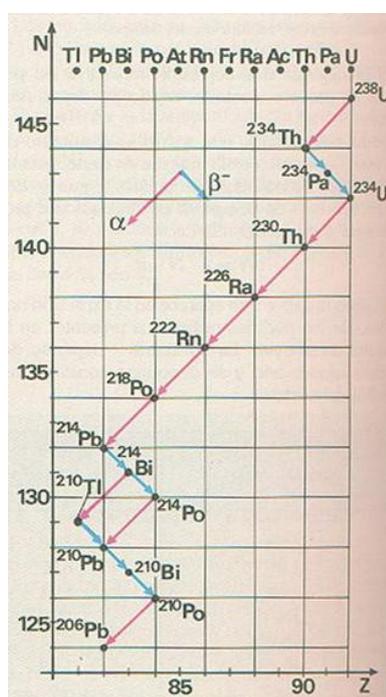


Figura 4. Diagrama de desintegración de la serie radiactiva 4n+2 del uranio. Reproducida de: <http://www.escriitoscientificos.es/tra b1a20/carpeta/nuclear/nu03.htm> Creative Commons

## 2.6. Cinética del decaimiento radiactivo

### 2.6.1. Ley de decaimiento radiactivo

Toda emisión radiactiva (natural o artificial) sigue una ley conocida como ley del decaimiento radiactivo. En 1900 Rutherford sugirió que el ritmo de emisión radiactiva de una sustancia disminuye exponencialmente con el tiempo. Experimentalmente se sabe que los procesos radiactivos siguen un comportamiento exponencial de primer orden (figura 5), de manera que:

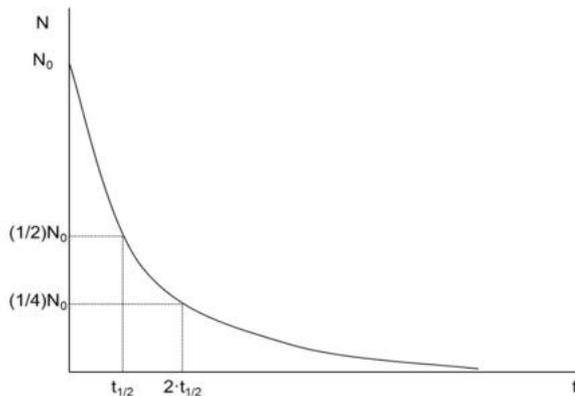
$$dN(t) = -\lambda \cdot N(t) \cdot dt \quad (1)$$

donde  $N$  es el número de partículas y  $\lambda$  es la llamada constante de desintegración, característica de cada núcleo y cuyas unidades son, en el S.I.,  $s^{-1}$ .

Para integrar la ecuación anterior, son necesarias algunas hipótesis previas: a) que  $\lambda$  es independiente de agentes físicos y químicos (temperatura, presión, compuesto químico en el que esté integrado el núcleo, etc.), b) que  $\lambda$  no depende del tiempo, y c) que  $\lambda$  sea la misma para todos los núcleos pertenecientes a la misma especie nuclear y en el mismo estado de energía. Aceptadas estas hipótesis, integrando (1) llegamos a:

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

donde  $N_0$  es el número de núcleos presentes en el instante inicial ( $t=0$ ).



**Figura 5.** Desintegración radioactiva en función del tiempo. Reproducida de [https://fisica2spp.wikispaces.com/UNID AD+VII](https://fisica2spp.wikispaces.com/UNID+AD+VII).

Para cada nucleido existe un intervalo de tiempo fijo que se llama periodo de semidesintegración o semivida ( $T_{1/2}$ ), o tiempo que tarda la población radiactiva en pasar de  $N_0$  a  $N_0/2$ , de manera que:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}} \rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

La radiactividad está regida por las leyes de la probabilidad; no se puede predecir cuándo un núcleo radiactivo va a emitir, por lo que la vida real de un núcleo concreto es impredecible. La semivida solamente nos da el tiempo que ha de transcurrir para que el número de núcleos se reduzca a la mitad. No obstante, se puede calcular la

vida media o promedio de vida media ( $\tau$ ), que se define como el tiempo promedio que tarda un núcleo radiactivo en desintegrarse.

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} tN(t)dt}{\int_0^{\infty} N(t)dt} = \frac{\int_0^{\infty} te^{-\lambda t} dt}{\int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt}$$

que al integrar:  $\tau = 1/\lambda$

La vida media ( $\tau$ ) es igual a la inversa de la constante de desintegración ( $\lambda$ ).

Así, resulta también que  $\tau$  es igual al tiempo necesario para que el número de átomos se reduzca en un factor e; y se relaciona con el periodo de semidesintegración, según:

$$T_{1/2} = \tau \cdot \ln 2$$

### 2.6.2. Actividad radiactiva

La actividad (A) de una fuente radiactiva es una magnitud física que expresa la velocidad de la especie radiactiva, es decir, da el número de desintegraciones por unidad de tiempo (dps). Si dN es el número de núcleos radiactivos que desaparecen en el intervalo de tiempo (t, t+dt), la actividad en el instante t vendrá dada por:

$$A(t) = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N$$

En consecuencia, la ley exponencial se extiende para la actividad, de manera que la actividad en el instante inicial (t=0),  $A_0 = N_0 \cdot \lambda$ , y tenemos que:

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

La unidad en el S.I. de la actividad es el becquerelio (Bq), donde 1 Bq = 1 dps. Por razones prácticas e históricas se sigue usando el curio (Ci); siendo:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Para dar una idea de los órdenes de magnitud asociados a las actividades de algunas fuentes radiactivas, mencionemos que un 1 kg de suelo no contaminado puede presentar una actividad en  $^{226}\text{Ra}$  entre 25 y 40 Bq, una misma cantidad de fosfoyeso (que contiene uranio y radio) presentará unos 1000 Bq de ese mismo radionúclido; mientras que una bomba de  $^{60}\text{Co}$  empleada en ciertos tratamientos tiene una actividad entre comprendida entre 2 y 5 kCi.

### 2.6.3. Cadenas de desintegración radiactiva. Equilibrios nucleares

Sabemos cómo evoluciona a lo largo del tiempo el número de núcleos de una población radiactiva así como su actividad. Supongamos ahora que el descendiente de la

especie radiactiva también es radiactivo. Decimos entonces que se genera una cadena o serie radiactiva:



El radionucleido “A” es denominado padre o progenitor, mientras que el “B” es el hijo o descendiente. La desintegración radiactiva del nucleido “A” se debe regir por la ecuación (1):

$$dN_A/dt = -\lambda_A \cdot N_A, \quad \text{que al integrar nos da:} \quad N_A = N_{0A} \cdot e^{-\lambda_A \cdot t}$$

Sin embargo, la evolución del número de núcleos “B” depende tanto de su progenitor “A”, que se desintegra según su constante  $\lambda_A$ , como de la propia desintegración de “B” impuesta por la constante de desintegración  $\lambda_B$ . Es decir, la variación en el número de núcleos “B” se rige por un término fuente y un término de pérdida. Aplicando estas ideas a toda la serie radiactiva se obtiene un conjunto de ecuaciones diferenciales que se denominan ecuaciones de Bateman. Por ejemplo, en el ejemplo propuesto:

$$dN_B/dt = \lambda_A \cdot N_A - \lambda_B \cdot N_B$$

Suponiendo que para el instante inicial ( $t = 0$ ), el número de núcleos “B” es  $N_{B0}$  (aunque normalmente,  $N_{B0}$  sería =0), la integración de la anterior ecuación resulta en:

$$N_B = N_{B0} \cdot e^{-\lambda_B \cdot t} + \frac{\lambda_A \cdot N_{A0}}{\lambda_B - \lambda_A} \cdot (e^{-\lambda_A \cdot t} - e^{-\lambda_B \cdot t})$$

Para el caso de “C”, tendremos:

$$N_C = N_{0A} - N_A - N_B$$

Si para  $t = 0$ , el número de núcleos “B” es  $N_{B0} = 0$ :

$$N_C = N_{0A} - N_{0A} \cdot e^{-\lambda_A \cdot t} - \frac{\lambda_A \cdot N_{A0}}{\lambda_B - \lambda_A} \cdot (e^{-\lambda_A \cdot t} - e^{-\lambda_B \cdot t})$$

En la figura 6 podemos ver representado la variación de los núcleos con el tiempo de esta serie radiactiva, en la que inicialmente sólo está presente el núcleo “A”.

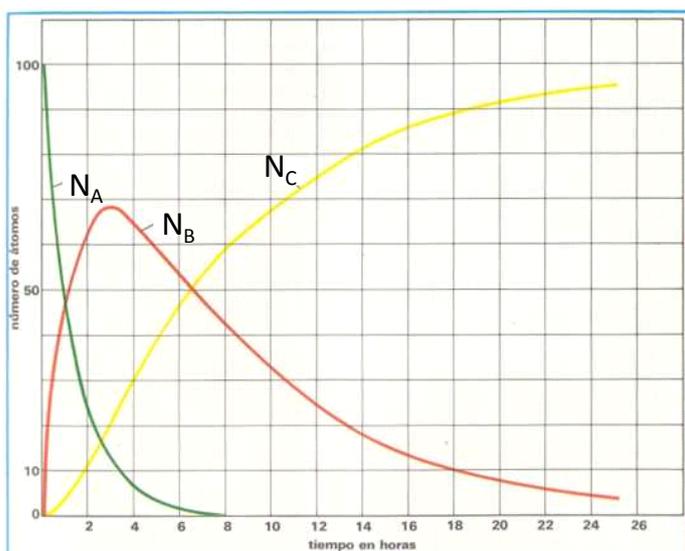
De igual manera, podemos escribir las respectivas actividades de los núcleos radiactivos A y B:

$$A_A = \lambda_A \cdot N_A \quad A_B = \lambda_B \cdot N_B$$

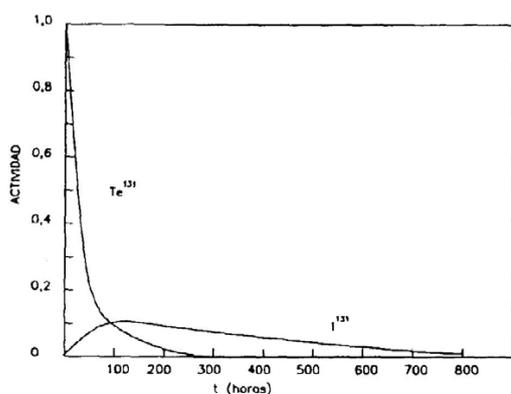
A continuación, es interesante considerar varias situaciones:

1.  $\lambda_A > \lambda_B$ : En este caso, el padre se desintegra más rápidamente que el hijo por lo que, con el transcurso del tiempo, se irán “acumulando” átomos del hijo. Llegará entonces un instante en el que el número de núcleos de “A” sea mucho menor que el de “B”, por lo que la desintegración de éste último vendrá determinada únicamente por su propia

semivida, como si el padre no existiese (figura 7). Se dice que en esta familia no existe equilibrio.



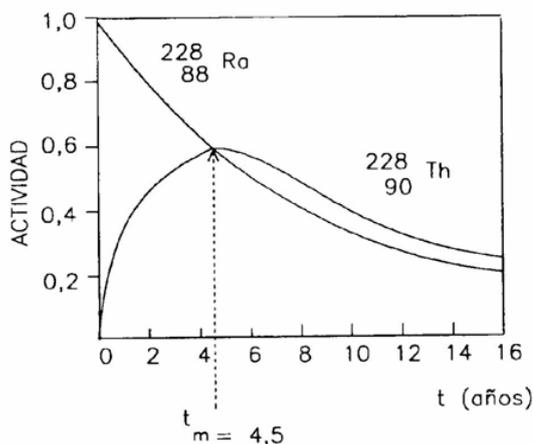
**Figura 6.** Serie radiactiva con tres miembros. Solamente el originario, A ( $\tau=1h$ ), está presente inicialmente. El intermedio B tiene una vida media de 5 h y el tercer miembro C es estable. Reproducida de <http://www.librosmaravillosos.com/losatomos/capitulo03.html>



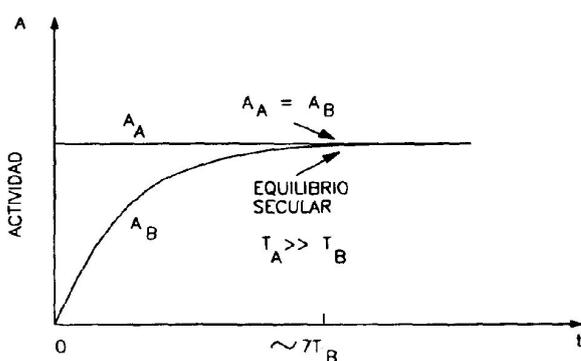
**Figura 7.** Ejemplo de evolución temporal de las actividades de un padre ( $^{131}\text{Te}$ ,  $T_{1/2}=30\text{ h}$ ) con constante de desintegración mayor que la del descendiente ( $^{131}\text{I}$ ,  $T_{1/2}=8\text{ d}$ ). Obtenida de: Apuntes de la asignatura de Radioquímica de la Licenciatura en Química, Universidad de La Rioja.

2.  $\lambda_A < \lambda_B$ : En oposición al caso anterior, el hijo es quien se desintegra más rápidamente. Los núcleos “B” tienden por tanto a desaparecer con mayor “velocidad” que son generados por desintegración del padre “A”. Estudiando la evolución temporal de ambos se observa que la actividad de “B” va aumentando hasta alcanzar el máximo y entonces comienza a decrecer hasta que llega un instante donde la actividad de ambos evoluciona en paralelo (figura 8). La curva de actividad del hijo alcanza un máximo cuando se cruza con la actividad del padre: es el instante de equilibrio transitorio.

3.  $\lambda_A \ll \lambda_B$ : Es una familia de equilibrio secular (figura 9). La actividad de B empieza a crecer hasta que llega al equilibrio secular, en el que  $A_A=A_B$ . Para este tipo de familias, se mantiene en el tiempo una constante de actividades, excepto para el último de la serie.



**Figura 8.** Ejemplo de evolución temporal de las actividades de un padre ( $^{228}\text{Ra}$ ,  $T_{1/2} = 5.7$  a) con constante de desintegración menor que la del descendiente ( $^{228}\text{Th}$ ,  $T_{1/2} = 1.9$  a). Obtenida de: Apuntes de la asignatura de Radioquímica de la Licenciatura en Química, Universidad de La Rioja.



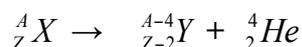
**Figura 9.** Esquema de evolución de actividades hacia equilibrio secular. Obsérvese que en el intervalo de tiempo mostrado en la figura la actividad del padre (A) permanece constante. Obtenida de: Apuntes de la asignatura de Radioquímica de la Licenciatura en Química, Universidad de La Rioja.

## 2.7. Tipos de emisión radiactiva

Analizadas las leyes que gobiernan el mecanismo de la desintegración radiactiva, vamos a profundizar en su naturaleza ya apuntada en la sección 2.4. Rutherford identificó tres tipos de emisiones radiactivas ( $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ ), pero en la actualidad se conocen, además: emisión de positrones ( $\beta^+$ ), captura K o captura electrónica, emisión de neutrones y emisión de protones.

### 2.7.1. Desintegración alfa

Mediante este mecanismo un núcleo emite espontáneamente núcleos de  $^4\text{He}$  totalmente ionizados, denominados partículas alfa. Son partículas con dos cargas positivas ( $Z = 2$ ) y muy pesadas (unas 7300 veces más masivas que electrón). Durante el proceso, el núcleo pierde su identidad apareciendo un núcleo distinto con número atómico  $Z-2$ , aunque no existen variaciones en el seno de los nucleones implicados en el proceso:



Es un proceso de desintegración típico de núcleos muy pesados, con número másico superior a 150. Excepcionalmente, pues es bastante improbable, se da en núcleos ligeros. Ejemplos:  ${}^{212}_{83} \text{Bi} \rightarrow {}^{208}_{81} \text{Tl} + {}^4_2 \text{He}$ ;  ${}^{226}_{88} \text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86} \text{Rn} + {}^4_2 \text{He}$

Las partículas alfa son muy estables; es un núcleo doblemente mágico ( $N=Z=2$ ), con spin nuclear  $I=0$  y paridad par. Sin embargo, no existen como tales en el interior del núcleo. Se ha postulado que la emisión de partículas alfa se puede explicar por ciertas correlaciones en el movimiento de los nucleones en el núcleo, que hacen que ocasionalmente dos protones y dos neutrones se agrupen como una unidad en una partícula alfa, en constante intercambio de energía con los nucleones restantes. Las fuerzas de repulsión entre cargas y las fuerzas nucleares originan una energía potencial sobre las partículas alfa, que hay que superar para que la partícula alfa salga del núcleo. Esta barrera de potencial o barrera de Coulomb es de unos 30 MeV, mientras que la energía de las partículas alfa emitidas es de 5-11 MeV. Por lo tanto, las partículas alfa sobrepasan la barrera de Coulomb sin tener esa energía. La emisión de partículas alfa no puede explicarse, por tanto, bajo el formalismo de la Física clásica. Sólo puede ser entendida desde la mecánica cuántica, que desarrolla el denominado efecto túnel, por el cual se admite que existe una probabilidad de que una partícula atraviese una barrera de potencial cuando, en términos de la Física clásica, no tiene energía suficiente para superar dicha barrera.

La energía liberada en el proceso, o balance energético ( $Q$ ), viene dada por la diferencia entre las masas del núcleo originario y la de los productos de la desintegración. Así, para la desintegración alfa:

$$Q_{\alpha} = (m_x - m_y - m_{\alpha})c^2$$

El proceso es energéticamente posible si  $Q_{\alpha} > 0$ .  $Q_{\alpha}$  se distribuye en forma de energía cinética entre la partícula alfa y el núcleo hijo, de manera que  $E_{c_{\alpha}} < Q_{\alpha}$ .

La partícula alfa presenta una energía bien definida (las energías típicas de la radiación alfa oscilan entre los 5 y 11 MeV). Su energía viene dada por la ecuación:

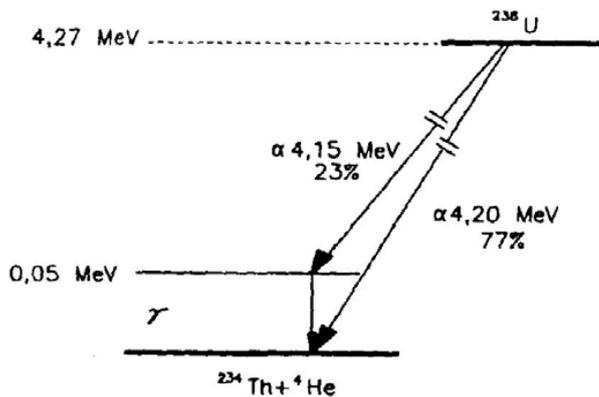
$$E_{c_{\alpha}} = \frac{A-4}{A} (Q_{\alpha} - E_{exc})$$

donde  $A$  es el número másico del padre y  $E_{exc}$  es la energía del estado excitado en el que puede quedar el núcleo hijo. De esta manera, el espectro de emisión asociado a la desintegración alfa es discreto.

Ahora bien, esto no quiere decir que un radionucleido emisor alfa sólo emita partículas de una sola energía. Existen muchos núcleos emisores alfa con bifurcaciones en este tipo de desintegración de diversa energía e intensidad, de forma que el núcleo hijo obtenido se alcanza en diferentes estados de energía.

Esto puede observarse en los denominados diagramas o esquemas de desintegración. En ellos, el eje de abscisas cubre el número atómico de los nucleidos implicados en orden creciente, mientras que el eje de ordenadas muestra los niveles energéticos implicados en orden también creciente. El diagrama puede venir complicado por la ya mencionada posibilidad de que el descendiente quede en un estado excitado. En ese caso aparecen diversas transiciones alfa para un mismo padre con varias emisiones gamma asociadas a los procesos de desexcitación. Este es un caso de ramificación, proceso que consiste en que los núcleos pueden desintegrarse mediante procesos radiactivos diferentes, o bien tienen diversos modos o vías para un mismo

proceso. Las ramificaciones de la emisión alfa se señalan en el esquema de desintegración con las correspondientes intensidades o fracciones de ramificación (figura 10).



**Figura 10.** Esquema de desintegración del  $^{238}\text{U}$ . Los porcentajes señalan las intensidades de ramificación de las desintegraciones alfa que pueden observarse con este radionucleido. Obtenida de: Apuntes de la asignatura de Radioquímica de la Licenciatura en Química, Universidad de La Rioja.

### 2.7.2. Desintegración beta ( $\beta^-$ )

Es la emisión radiactiva más común y se da en los núcleos situados por encima de la banda de estabilidad (ricos en neutrones), para cualquier valor de número másico del núcleo.

La desintegración  $\beta^-$  consiste en una emisión espontánea de electrones, perdiendo el núcleo padre su identidad; sin embargo, la emisión de partículas  $\beta^-$  o electrones va acompañada de la emisión de un antineutrino, antipartícula del neutrino de carga nula y masa muy pequeña (diez mil veces menor que la del electrón):



Los electrones se emiten a velocidades del orden de la velocidad de la luz. Son electrones de origen nuclear y no de la corteza atómica.

La existencia de los procesos beta (negativo y positivo) presentó históricamente serias dificultades teóricas de interpretación, sobre todo en cuanto a la conservación de la energía, la cantidad de movimiento y el momento angular total.

Para resolver la cuestión, Pauli introduce en 1927 la existencia de una nueva partícula, el neutrino, con su correspondiente antipartícula o antineutrino. El neutrino debería ser una partícula de masa nula o casi nula, neutra eléctricamente y con un momento angular intrínseco  $\frac{1}{2}$ .

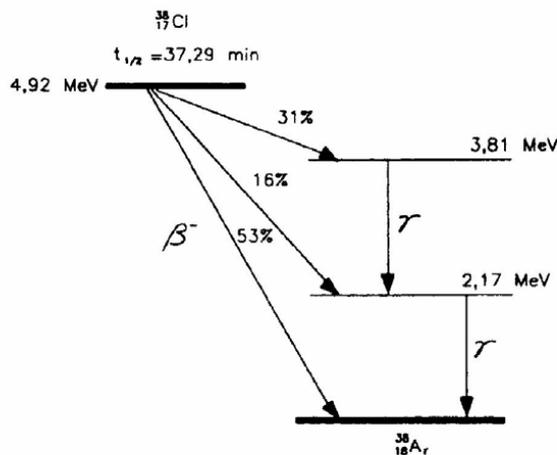
Pese a su introducción en el campo puramente teórico, hoy en día ya existen evidencias experimentales suficientes que demuestran la existencia real de esta partícula.

La energía liberada en este tipo de proceso es:

$$Q_{\beta^-} = (m_x - m_y)c^2$$

que se reparte entre el núcleo hijo, el electrón y el antineutrino. El espectro de energía de la desintegración  $\beta^-$  es continuo hasta un máximo, presentando un intervalo de 0,1 MeV a 3 MeV, a diferencia del espectro discreto de las partículas alfa. La partícula de antineutrino explica la conservación de la energía y el momento angular total de la desintegración  $\beta^-$ , así como el espectro continuo de energía.

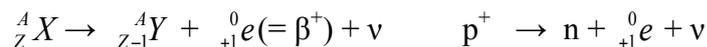
Al igual que en la desintegración alfa, en la desintegración beta también se producen ramificaciones que pueden ir acompañadas de emisiones gamma (figura 11).



**Figura 11.** Esquema de desintegración del  $^{38}\text{Cl}$ . Se dan las intensidades de ramificación para la desintegración beta. Obtenida de: Apuntes de la asignatura de Radioquímica de la Licenciatura en Química, Universidad de La Rioja.

### 2.7.3. Desintegración $\beta^+$

Consiste en una emisión espontánea de positrones ( $e^+$ ) de los núcleos:



donde se emite un positrón, antipartícula del electrón y, por ello, con igual carga que éste pero de signo positivo. En este caso la emisión va acompañada de un neutrino ( $\nu$ ). Esta emisión es típica de núcleos situados por debajo de la banda de estabilidad (ricos en protones), que optan por eliminar protones para acercarse a la franja de estabilidad.

La energía disponible en este caso es:

$$Q_{\beta^+} = (m_x - m_y - 2m_e) c^2$$

Los positrones emitidos dan lugar a un espectro continuo, con energía máxima de 1,24 MeV.

En la desintegración  $\beta^+$  se emiten fotones gamma en la desexcitación de los estados excitados en que puede quedar el núcleo hijo. Además, se produce otro fenómeno denominado aniquilación del positrón, entre el positrón emitido por el núcleo y un electrón de la corteza atómica. En este proceso se emiten dos fotones en la misma dirección pero con sentidos opuestos, cada uno con una energía de 0.511 MeV, lo que coincide con las masas en reposo del electrón y del positrón.

#### 2.7.4. Captura electrónica

Se trata de un mecanismo que compite con la desintegración  $\beta^+$ , es decir, se da en núcleos con exceso de protones. Se captura un electrón de las capas internas del átomo y se combina con un protón nuclear, dando lugar a un neutrón y un neutrino. La reacción nuclear asociada es:



El átomo al que pertenece el núcleo residual (Y) queda ionizado produciéndose un reajuste de su configuración electrónica con la consiguiente emisión de rayos X.

La energía liberada en este proceso es:

$$Q_{ce} = (m_x - m_y)c^2$$

El proceso es energéticamente posible si  $Q_{ce} > 0$ . Si se compara esta condición con la del proceso  $\beta^+$ , se observa que se trata de dos transiciones en competencia y que siempre que energéticamente sea posible la desintegración  $\beta^+$  también lo será la captura electrónica. En cambio puede ser posible la captura electrónica y no ser posible la  $\beta^+$ , precisamente cuando:

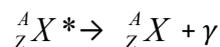
$$0 < (m_x - m_y)c^2 < 2m_e c^2$$

#### 2.7.5. Emisión gamma

Tras un proceso de desintegración como el alfa o el beta, un núcleo puede quedar en un estado excitado. La pérdida de la consiguiente energía de excitación puede realizarse por diversos caminos: emisión de fotones gamma (radiación  $\gamma$ ), proceso de conversión interna (IC) o proceso de producción de pares.

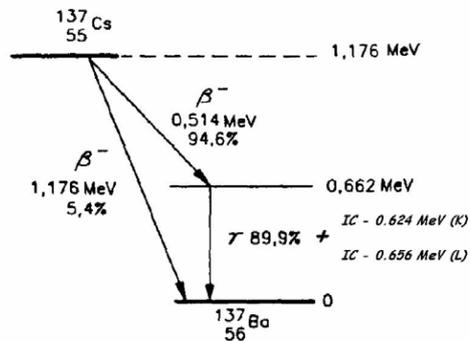
Por lo general, los estados excitados a los que se llega tras una desintegración alfa o beta son de vida muy corta ( $10^{-15}$  s), pero hay algunos de vida mucho más larga. Son los denominados estados metaestables o isoméricos. Por ejemplo, el  ${}^{99m}\text{Tc}$ , con un período de semidesintegración de 6,02 horas.

a) Emisión de radiación electromagnética (radiación  $\gamma$ ). Mediante la emisión gamma, el núcleo se desprende de la energía de excitación para pasar a un estado de energía inferior:



Dada la cuantización de los niveles de energía del núcleo, el espectro gamma es discreto, con energías que pueden ser desde unos pocos keV hasta varios MeV. Como se ha mencionado, la radiación gamma acompaña a las anteriores. Un núcleo emite radiación alfa o beta y deja a su descendiente en un estado excitado con lo que la posterior desexcitación da como resultado la emisión de radiación gamma. En la Naturaleza no se encuentren emisores gamma puros, sino que aparezcan acompañando a emisiones alfa o beta.

b) Proceso de conversión interna (IC). La energía nuclear es transmitida directamente a un electrón orbital del átomo, en una de las capas de mayor energía (K, L, M, N), el cual es emitido, dando lugar a un espectro de líneas netas. La energía cinética de estos electrones estará determinada por la diferencia entre la energía inicial del núcleo y la final, y la energía de enlace del electrón (figura 12).



**Figura 12.** Esquema de desintegración de  $^{137}\text{Cs}$ . La evolución del estado excitado a 662 keV se puede hacer por la emisión de un fotón (~ 90%) o por procesos de conversión interna de electrones de la capa K o L. Obtenida de: Apuntes de la asignatura de Radioquímica de la Licenciatura en Química, Universidad de La Rioja.

La IC es preponderante en núcleos pesados, mientras que la gamma lo es en los ligeros. Asimismo viene acompañada siempre de la emisión de rayos X o electrones Auger al quedar el átomo en un estado excitado. Es frecuente que el IC acompañe a determinadas emisiones beta, lo que se detecta por las consiguientes rayas monoenergéticas que se superponen al espectro continuo.

c) Producción de pares: Si la diferencia de energía entre el estado inicial y final del núcleo es superior a 1,022 MeV, se puede generar un par electrón-positrón. La probabilidad de este fenómeno es aproximadamente 1000 veces menor que la de la desintegración gamma. Este efecto, también denominado efecto de materialización de la energía, aparece en la interacción de fotones gamma con la materia.

### 2.7.6. Otros tipos de desintegraciones nucleares

Otro tipo de desintegración nuclear es la emisión de protones, que compite con la desintegración  $\beta^+$  y la captura electrónica. Es típica de núcleos con exceso de protones. Ejemplos:  $^{53}\text{Co}$ ,  $^{11}\text{N}$ ,  $^{12}\text{O}$ .

Por último, también se puede dar la emisión de neutrones, que compite con la emisión  $\beta^-$ , se tiene la emisión de neutrones ( $^{49}\text{K}$ ,  $^{27}\text{Na}$ ).

## 2.8. Reacciones nucleares

Una reacción nuclear son aquellas producidas entre nucleones o grupos de nucleones, o bien las que se producen al bombardear un núcleo con partículas o radiaciones. Por extensión, se incluyen también las interacciones entre partículas elementales.

La primera reacción nuclear llevada a cabo en el laboratorio, la realizó Rutherford, en 1919, bombardeando el isótopo 14 del nitrógeno con partículas alfa. En la reacción se produce el isótopo 17 del oxígeno y un protón.

En las reacciones nucleares hay, en general, dos núcleos o partículas que reaccionan, para dar lugar a productos de reacción. A semejanza de lo que ocurre en una reacción química, para producir una reacción nuclear normalmente es necesario comunicar al sistema inicial una energía de activación. En la reacción se libera energía, que se manifiesta en forma de energía cinética de los productos de la reacción, acompañada en ocasiones por la producción de radiación gamma.

En general, las reacciones nucleares se expresan:



donde a es la partícula incidente o bombardeante que incide sobre el núcleo X para generar un núcleo Y. b es la partícula emitida o de salida. Por ejemplo:  $^{14}\text{N} (\alpha, p) ^{17}\text{O}$ .

Para que ocurra la reacción es necesario que la partícula a tenga una energía suficiente para producirla. En las primeras reacciones nucleares realizadas en el laboratorio se emplearon como proyectiles partículas procedentes de una desintegración radiactiva. Sin embargo, el problema de las partículas cargadas, como la partícula alfa, es que sufren una fuerza eléctrica de repulsión antes de penetrar en el núcleo del blanco. Ninguna partícula alfa generada por la naturaleza posee suficiente energía para penetrar en un núcleo de potasio (con 19 protones) o con mayor número de protones. Sin embargo, en 1932 se construyeron los llamados aceleradores de partículas, donde la energía necesaria se obtiene mediante la acción de campos eléctricos o magnéticos. Esto abrió un nuevo campo en el estudio de las reacciones nucleares, ya que las partículas cargadas pueden traspasar la barrera de Coulomb y reaccionar con el núcleo si son aceleradas.

Cuando no existían aún los aceleradores, se utilizaba como proyectil la radiación alfa de una desintegración radiactiva; los trabajos de Rutherford en los primeros decenios del siglo XX se centraron en este tipo de reacciones. La construcción de aceleradores de partículas permitió el empleo de otros proyectiles cargados, principalmente protones. En 1934 el físico italiano Enrico Fermi concibió la idea de emplear el neutrón como proyectil. Los neutrones sí se podían utilizar como proyectiles, ya que no se verían afectados por esas fuerzas eléctricas de repulsión. El grupo de investigadores dirigido por Fermi estudió sistemáticamente las reacciones entre neutrones y los diversos elementos de la tabla periódica. En una de estas reacciones, la que tiene lugar entre el uranio 235 y el neutrón, en los últimos días de 1938, Otto Hahn descubrió la reacción en cadena de fisión nuclear.

### 2.8.1. Balance energético de una reacción nuclear

En una reacción nuclear se deben cumplir, entre otras, las siguientes leyes de conservación:

- ley de conservación de la carga eléctrica
- ley de conservación del número de nucleones
- ley de conservación de la masa y la energía ( $E=mc^2$ )
- ley de conservación de la paridad
- ley de conservación de la cantidad de movimiento

Suponemos la reacción:  $X + a \rightarrow Y + b$

Normalmente, X está en reposo ( $v_x=0$ ), por lo que su energía será  $E_x = m_x c^2$ . Para el caso de a, Y, b, estos tienen energía cinética. Su energía será  $E = mc^2 + 1/2mv^2$ . Cumpliéndose la ley de conservación de la masa y la energía, para la reacción nuclear:

$$m_x c^2 + [m_a c^2 + 1/2 m_a v_a^2] = [m_y c^2 + 1/2 m_y v_y^2] + [m_b c^2 + 1/2 m_b v_b^2]$$

$$(m_x + m_a - m_y - m_b) \cdot c^2 = 1/2 m_y v_y^2 + 1/2 m_b v_b^2 - 1/2 m_a v_a^2 = Q$$

Q es el balance energético de la reacción nuclear, y corresponde a la energía cinética de los productos menos la energía cinética de los reactivos.

Q nos da información de la reacción nuclear:

- $Q > 0$ : reacción nuclear exotérmica. Tiene lugar para cualquier valor de la energía cinética ( $E_c$ ) de la partícula a, incluso si  $E_{c_a} = 0$
- $Q < 0$ : reacción nuclear endotérmica. La energía cinética de a tiene que adquirir un valor igual o superior a un cierto valor de energía (energía umbral). El valor de la energía umbral ( $E_u$ ) se halla aplicando leyes de conservación de la energía y del momento lineal, y pasando a un sistema de referencia en el centro de masas:

$$E_u = -Q \cdot \frac{m_x + m_a}{m_x}$$

$E_u$  puede variar desde valores muy grandes (se necesitará acelerador de partículas), a valores más pequeños.

- $Q = 0$ : se produce una colisión elástica entre X y a, donde sólo hay intercambio de energías cinéticas.

### 2.8.2. Sección eficaz de reacción nuclear

En la reacción  $X + a \rightarrow Y + b$ , la probabilidad de que X y a reaccionen está relacionada con el concepto de sección eficaz de reacción nuclear ( $\sigma$ ). Teniendo en cuenta que el número de interacciones que se pueden producir es igual como máximo al número de partículas incidentes, una expresión cualitativa de esta probabilidad sería:

$$P = \frac{\text{Interacciones producidas por núcleo}}{\text{Número de partículas incidentes por núcleo}}$$

Se puede definir  $\sigma$  como la sección o superficie que presenta el núcleo blanco X a la partícula a que está incidiendo sobre él.  $\sigma$  incluye todo tipo de interacciones nucleares que puede haber entre X y a; es en realidad un sumatorio de secciones eficaces de todos los procesos que pueden darse:  $\sigma = \sigma_{\text{disp. elástica}} + \sigma_{x(a,b)y} + \dots$

Si consideramos que X es una esfera rígida y sólida de radio R, y las partículas a son puntuales:

$$\sigma = \pi \cdot R^2$$

De esta manera, la sección eficaz tiene unidades de área y está en el orden del cuadrado del radio nuclear. El diámetro nuclear típico es de unos  $10^{-12}$  cm. Por ello las secciones eficaces entre núcleos son del orden de  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>. La unidad utilizada normalmente es el barn:

$$1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$$

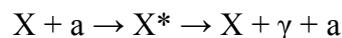
### 2.8.3. Tipos de reacciones nucleares

Vamos a clasificar las reacciones nucleares según el tipo de proceso físico que tiene lugar.

#### 1. Reacciones de dispersión:

La partícula bombardeante “a” no es captada por el núcleo. Se conserva X y se emite a. No hay reacción nuclear en sí. Puede existir:

- dispersión elástica. Se produce un choque elástico, en el que hay intercambio de la energía cinética. No hay modificación del estado interno de X. Ejemplo:  $^{26}\text{Mg}(p,p)^{26}\text{Mg}$ .
- dispersión inelástica. Parte de la energía cinética de la partícula a se invierte en excitar la partícula X, que vuelve al estado fundamental por emisión de radiación gamma.



Ejemplo:  $^{26}\text{M}(p,p)^{26}\text{Mg}^*$ .

#### 2. Reacciones de transmutación:

Se producen al bombardear el núcleo blanco con neutrones, protones u otras partículas de manera que la partícula bombardeante y saliente es distinta y hay variación del número de nucleones del núcleo blanco X.

- Reacciones de captura. En estas reacciones la partícula incidente es absorbida por el núcleo blanco X sin que se produzca ninguna partícula emergente, con la excepción de fotones gamma. Ejemplo:  $^{26}\text{Mg}(p,\gamma)^{27}\text{Al}$ .
- Reacciones de bombardeo con partículas  $\alpha$  de alta energía. Se produce una emisión de un gran número de nucleones, de manera que hay bastante destrucción del núcleo blanco.

- c) Reacciones de fragmentación. El núcleo blanco se rompe en diferentes fragmentos de distintos números másicos.
- d) Reacciones de fisión. En este tipo de reacción, un núcleo pesado se rompe en dos fragmentos cuyas masas son del mismo orden de magnitud, lo que va acompañado de una emisión de neutrones y radiación gamma, con la liberación de una gran cantidad de energía. Aunque existen casos de fisión espontánea o de fisión por captura de un fotón, la reacción se produce normalmente por la captura de un neutrón. Ejemplo:  $^{235}\text{U}(n,3n)^{134}\text{Te}^{99}\text{Zr}$ .

#### 2.8.4. Reacciones de fisión nuclear

Las características principales de las reacciones de fisión nuclear es que un núcleo pesado se fragmenta en dos nuevos núcleos, produciendo:

- gran cantidad extraordinariamente elevada de energía en forma de radiación y calor, lo que da lugar a aplicaciones importantes.
- dada la riqueza en neutrones del núcleo inicial, se produce una liberación de varios neutrones por cada núcleo, lo que da lugar a una reacción en cadena. Los núcleos resultantes son altamente inestables ya que se encuentran lejos de la banda de estabilidad, razón por la que inician cadenas radiactivas.

La reacción de fisión es una reacción nuclear exotérmica, y el balance energético  $Q$  es  $>0$ . La liberación de energía tiene su origen en la diferencia de masa entre reactivos y productos. Siempre es del orden de 200 MeV por núcleo fisionado. Cada núcleo puede fisionarse por diferentes vías, unas más probables que otras; cada vía emitirá aproximadamente 200 MeV por núcleo. La energía emitida por núcleo fisionado se reparte en la energía cinética ( $E_c$ ) de los diferentes fragmentos y partículas que se producen en la fisión:

- $E_c$  de los fragmentos grandes de fisión:  $\sim 166$  MeV
- $E_c$  de los neutrones:  $\sim 2-5$  MeV
- $E_c$  de los neutrinos:  $\sim 12$  MeV
- $E_c$  partículas  $\beta$ :  $\sim 5$  MeV
- $E_c$  fotones (radiación  $\gamma$ ):  $\sim 10$  MeV

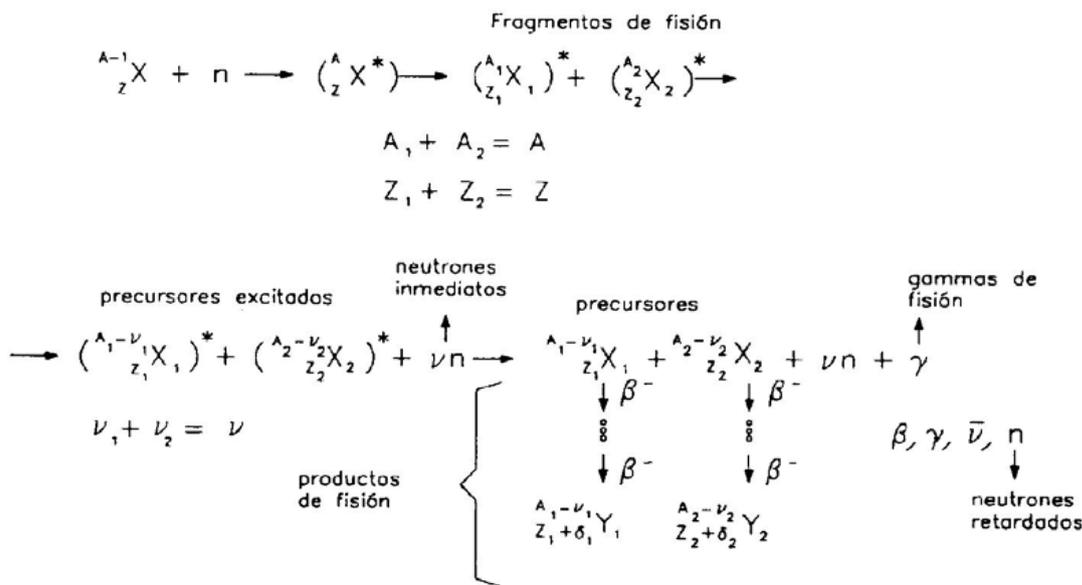
Sin embargo, aunque se emite energía, la reacción no es espontánea, ya que hay que superar una energía o potencial umbral para que se produzca (de hecho, la fisión espontánea de los uránidos es improbable). De manera resumida, el modelo de la gota líquida explica cómo en la fisión se produce una energía de excitación para el vencimiento de la barrera coulombiana, que en el caso de la fisión es debida a los dos núcleos resultantes. El modelo de la gota líquida se basa en que al bombardear un núcleo con un neutrón de energía adecuada, éste se liga (pero no se captura) al núcleo, de manera que el neutrón ligado le suministra energía de excitación al núcleo que le permita franquear la barrera de fisión; el núcleo queda en un estado excitado en el cual hay alta probabilidad de que se produzca la deformación del núcleo dando lugar a los dos núcleos resultantes.

Esquema de la reacción de fisión:

En primer lugar, el núcleo inicial liga un neutrón, produciéndose un núcleo de número másico  $A+1$  en estado excitado (figura 13). Este núcleo va a fisionarse en dos núcleos muy inestables ya que tienen un alto contenido en neutrones ( $N > Z$ ). Los fragmentos emiten neutrones (neutrones inmediatos), con lo que se consigue una reacción en cadena al interaccionar con otros núcleos blanco y, de paso, se convierten en precursores excitados. Estos emiten radiación gamma (fotones gamma inmediatos) y pasan a ser precursores.

Los precursores, al tener una relación  $N/Z$  que los alejan de la franja de estabilidad, van a producir cadenas radiactivas de tres y cuatro términos mediante emisiones beta, hasta que se convierten en nucleidos estables. De lo dicho se desprende que los precursores generan un conjunto de radionucleidos emisores beta que se conocen como productos de fisión. Algunos de ellos también presentan emisión espontánea de neutrones o neutrones retardados.

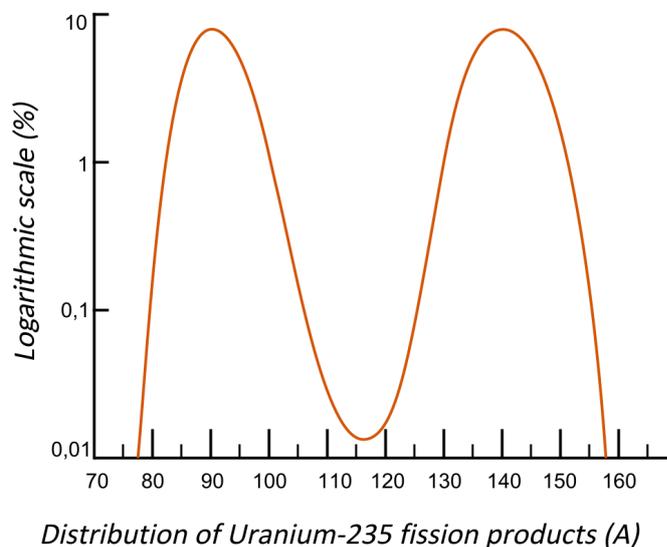
Dados los diversos modos en los que el núcleo inicial puede fragmentarse, se producen una gran variedad y cantidad de emisores beta en los reactores nucleares de fisión. Por ejemplo, la fisión del  $^{235}\text{U}$  por neutrones de muy baja energía se puede realizar de 30 maneras diferentes, dando lugar a unos 60 fragmentos de fisión distintos. Aunque se produce esta gran variedad de fragmentos de fisión, la masa de estos sigue una distribución asimétrica (figura 14): se produce un pico en  $x$  y en  $A-x$  (siendo  $A$  el número másico del núcleo inicial), y tiene un mínimo en  $x=A/2$ . En torno a ese mínimo la distribución es simétrica.



**Figura 13.** Mecanismo de la reacción de fisión. Obtenida de: Apuntes de la asignatura de Radioquímica de la Licenciatura en Química, Universidad de La Rioja.

Por otro lado, la sección eficaz de fisión inducida del  $^{235}\text{U}$  es mucho mayor para neutrones térmicos ( $E \approx 0.025$  MeV) que para neutrones rápidos ( $E \approx 0.1-10$  MeV). Los neutrones inmediatos producidos en la fisión tienen 2-5 MeV de energía, por lo que son

neutrones rápidos. Por lo tanto, los neutrones rápidos deberán ser moderados (perder energía) si han de ser utilizados en procesos de fisión en cadena. Normalmente se utilizan átomos ligeros (agua o deuterio) como moderadores; el uso del propio  $^{235}\text{U}$  en su reacción de fisión como moderador no es eficiente, ya que tiene una sección eficaz de captura para neutrones térmicos moderadamente alta. La moderación de los neutrones permite la fisión en cadena. En el caso del  $^{238}\text{U}$  sólo es posible la fisión utilizando neutrones rápidos. La diferencia en la fisionabilidad por neutrones térmicos o rápidos se encuentra en sus energías de excitación.



**Figura 14.** Distribución de las masas de los fragmentos de fisión del  $^{235}\text{U}$ .  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Uranium-235\\_fission\\_product-en.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Uranium-235_fission_product-en.svg).  
 Creative Commons.

### 2.8.5. Reactores de fisión

Los reactores nucleares son fuentes controladas de energía nuclear de fisión. El principio de funcionamiento de los reactores nucleares se basa en mantener una población de neutrones tal que el número de fisiones que tienen lugar por unidad de tiempo permanece constante. En este caso se dice que la reacción está controlada.

Las reacciones de fisión que tienen lugar en los reactores nucleares se producen al ser bombardeados con neutrones núcleos de átomos pesados:  $^{235}\text{U}$  ó  $^{239}\text{Pu}$ . El material utilizado debe ser muy rico en estos núcleos fisionables. El uranio, empleado como combustible de un reactor nuclear, aparece en forma natural con los isótopos  $^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$ . Mientras que en el  $^{235}\text{U}$  se producen cerca del 97% de todas las fisiones de un reactor con neutrones térmicos, el  $^{238}\text{U}$  puede producir  $^{239}\text{Pu}$  mediante reacciones de captura. Este elemento fisiona de forma similar al  $^{235}\text{U}$ . Al  $^{238}\text{U}$  se le denomina nucleido fértil, ya que puede producir núcleos fisionables por captura neutrónica.

Un reactor nuclear es, por tanto, una instalación capaz de iniciar, mantener y controlar las reacciones de fisión en cadena. Éstas tienen lugar en el núcleo del reactor, compuesto por el combustible a base de núcleos fértiles y fisionables, el refrigerante, los

elementos de control, materiales estructurales, y moderador en los reactores nucleares térmicos.

Los neutrones producidos en la fisión, al moverse en el núcleo del reactor, pueden producir nuevas fisiones, ser capturados en los materiales constituyentes o fugarse de los límites del núcleo. Así, si en un cierto instante existen  $n$  neutrones en el reactor como consecuencia de los procesos indicados, al cabo de un cierto tiempo han desaparecido todos, y dan lugar a una nueva generación de neutrones  $n'$  que aparecen por fisiones. Se denomina constante de multiplicación a la relación entre los neutrones de dos generaciones sucesivas:

$$K = \frac{n'}{n}$$

Esta relación puede tomar varios valores:

- $K=1$ , en cuyo caso se producen tantos neutrones como desaparecen, denominándose al reactor crítico.
- $K<1$ , en cuyo caso la reacción en cadena no se puede mantener, pues al producirse menos neutrones de los que desaparecen, al cabo de un cierto tiempo el número total de neutrones se anulará. Este estado del reactor es el denominado subcrítico.
- $K>1$ , en esta situación denominada supercrítica, la aparición de más neutrones que los que desaparecen dará lugar a un estado divergente.

La operación normal de un reactor deberá realizarse siempre en condiciones de criticidad, es decir con  $K=1$ ; salvo en los instantes de la puesta en marcha, y en las paradas, en los que será subcrítico. Solamente se podrán tener estados supercríticos durante breves instantes de tiempo, durante las subidas de potencia, provocando estados transitorios que nunca podrán dar situaciones divergentes con crecimiento de la potencia y de la población neutrónica. El tamaño crítico de un reactor se consigue mediante la óptima disposición del combustible y el resto de materiales del núcleo, entre los cuales la presencia de los absorbentes de neutrones en los materiales de control, permiten mantener la criticidad durante la operación, y los estados subcríticos de la parada y puesta en marcha.

Componentes de un reactor nuclear (figura 15):

- Núcleo:

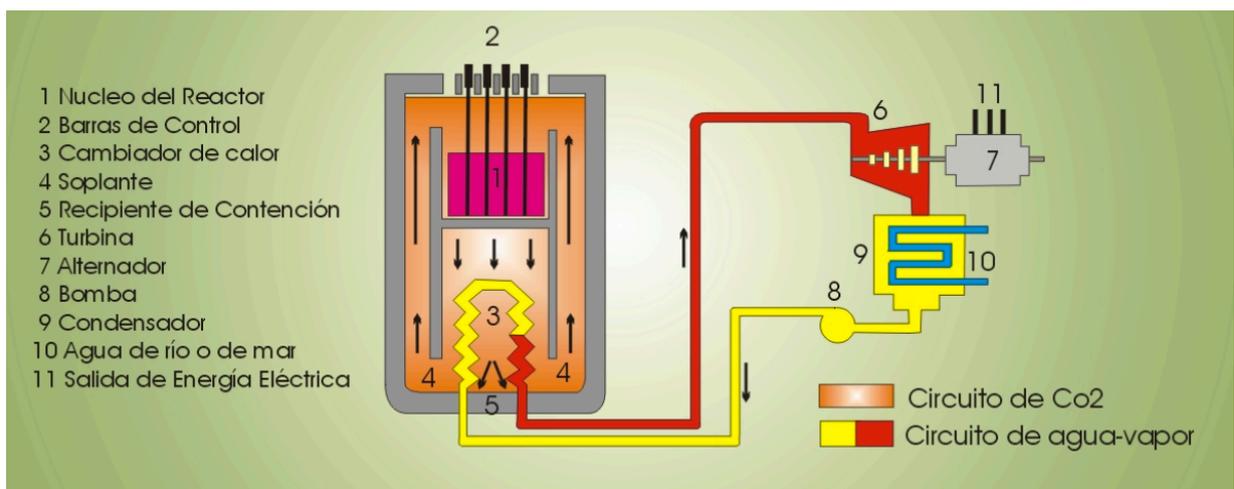
- Barras de combustión. Son tubos de Zr o acero inoxidable que contienen el material fisionable en forma de pastillas cerámicas y cilíndricas.
- Moderador. En cada barra de combustión se produce la fisión dando lugar a neutrones rápidos. El papel del moderador es, por tanto, disminuir la energía cinética del neutrón, mediante choques elásticos con un átomo de un material adecuado (núcleos de átomos ligeros). Entre los moderadores más utilizados se pueden citar, entre otros, el agua natural, también llamada ligera, el agua pesada y el carbono (grafito).
- Barras de control. Para que un reactor de fisión actúe con seguridad, es necesario controlar adecuadamente el factor  $K$ . Si la velocidad de reacción se acelera ( $K>1$ ), se introducen en el combustible las barras de control, que contienen material es con una

altísima probabilidad de captura neutrónica (Cd, B,..). Introduciendo o extrayendo gradualmente las barras de control, se controla el factor K.

- Refrigerante. Suele ser agua, y actúa como intercambiador de calor que extrae la energía producida por el núcleo en forma de calor. En el intercambiador de calor, el agua se convierte en vapor, que se emplea para mover una turbina generadora de electricidad. El vapor vuelve a condensarse posteriormente mediante refrigeración, que puede ser agua procedente de un río, mar o lago.

- Reflector. Es un material que rodea al núcleo del reactor. En una reacción nuclear en cadena un cierto número de neutrones tienden a escapar de la región donde aquélla se produce, con la consiguiente pérdida de los mismos. El reflector es el medio utilizado para cambiar la dirección de muchos neutrones que normalmente escaparían del reactor. Es un material de baja sección eficaz de captura que rodea al núcleo del reactor.

- Blindaje. En un reactor nuclear se producen todas las formas de radiación atómica. Los rayos  $\alpha$  y  $\beta$  emitidos tienen relativamente poco poder de penetración y no son causa de grandes problemas. Sin embargo, los rayos  $\gamma$  y los neutrones tienen un poder grande de penetración. Por ello es necesario colocar un blindaje biológico alrededor del reactor para interceptar las radiaciones  $\gamma$  y neutrónica. Los materiales más usados para construir un blindaje en un reactor son hormigón, el agua y el plomo.



**Figura 15.** Esquema de un reactor nuclear de fisión. Reproducido de: [https://www.cienciasfera.com/materiales/tecnologia/tecno01/tema02/4\\_centrales\\_nucleares.html](https://www.cienciasfera.com/materiales/tecnologia/tecno01/tema02/4_centrales_nucleares.html). Creative Commons

### **2.8.6. Problemática de los residuos radiactivos procedentes de los reactores nucleares**

Uno de los principales problemas del uso de la energía nuclear es la gestión de los residuos nucleares. Los residuos nucleares son residuos que contienen isótopos radiactivos que no tienen un propósito práctico. Los residuos nucleares no pueden ser gestionados como residuos convencionales. Dos características hacen especiales a los residuos radiactivos:

- Su gran peligrosidad. Cantidades muy pequeñas pueden originar dosis de radiación peligrosas para la salud humana.
- Su duración. Algunos de estos isótopos permanecerán emitiendo radiaciones miles y decenas de miles de años.

Los residuos nucleares se clasifican en función de sus características físicas (sólidos, líquidos o gas), y en función de su actividad (alta, media o baja).

- Residuos nucleares de alta actividad. Son los elementos del combustible gastado. Emiten altas dosis de radiación y tienen periodos de semidesintegración muy elevados. Los residuos de alta actividad requieren sistemas de gestión que garanticen su aislamiento y confinamiento durante largos periodos de tiempo. Las dos opciones que existen para su almacenamiento son el almacenamiento temporal prolongado y el almacenamiento definitivo a gran profundidad o almacenamiento geológico profundo. El almacenamiento temporal prolongado puede darse en piscinas de las propias centrales nucleares, construida de hormigón y paredes de acero inoxidable para crear una barrera a las radiaciones y evitar escapes, o en almacenes temporales centralizados (“cementeros nucleares”). Respecto a la segunda opción (el almacenamiento geológico profundo), los residuos que quedan se suelen vitrificar (fundir junto a una masa vítrea) e introducir en contenedores muy especiales capaces de resistir agentes muy corrosivos, el fuego, terremotos, grandes colisiones, etc. Estos contenedores se almacenarían en vertederos definitivos que deben estar contruidos a gran profundidad, en lugares muy estables geológicamente (depósitos de arcilla, sales o macizos graníticos). Sin embargo, aún ha de demostrarse que este almacenamiento sea efectivo para periodos extremadamente largos o al menos similares a los del almacenamiento temporal prolongado. Pese a no existir una regulación internacional específica al respecto, sí que hay consenso acerca de que el almacenamiento geológico profundo es la mejor opción una vez que la tecnología ofrezca totales garantías. El almacenamiento temporal centralizado, sin embargo, no ofrece una solución definitiva al problema, sino que queda pendiente para generaciones futuras. Se trata, por tanto, de una opción de gestión temporal, y no final.

- Residuos de media y baja actividad. Los residuos de media actividad son radionucleidos que se liberan en el proceso de la fisión. Mediante tratamiento en la propia central se separan los elementos radioactivos que contienen estos subproductos y los residuos resultantes se depositan en bidones de acero solidificándolos con alquitrán, resinas o cemento. Los residuos de baja intensidad son aquellos que han estado en contacto con el reactor (ropa, herramientas, material diverso...). Estos se prensan y se mezclan con hormigón formando un bloque sólido. Al igual que en el caso anterior, también se introducen en bidones de acero.

Los residuos de media y baja intensidad, a su vez, se clasifican en: a) residuos de vida corta, que contienen nucleidos cuyo periodo de semidesintegración es inferior o igual a 30 años, con una concentración limitada de radionucleidos alfa de vida larga; y b) en residuos de vida larga, con radionucleidos y emisores alfa de vida larga cuya concentración es superior a los límites aplicables a los residuos de vida corta.

Los residuos de media o baja actividad se introducen en contenedores especiales que se almacenan durante un tiempo en superficie hasta que se llevan a vertederos de seguridad. Los almacenes definitivos para estos residuos son, en general, subterráneos, asegurando que no sufrirán filtraciones de agua que pudieran arrastrar isótopos radiactivos fuera del vertedero.

### **2.8.7. Reacciones de fisión incontroladas**

La bomba atómica es el resultado de una fisión incontrolada de un elemento como el  $^{235}\text{U}$  o  $^{239}\text{Pu}$ . Las reacciones tendrán lugar, mediante neutrones rápidos, cuando el material esté muy enriquecido en uno de esos isótopos. La dificultad para construir una bomba reside en lo inaccesible de la materia prima. El uranio que puede encontrarse en la naturaleza no es un buen combustible nuclear ya que tiene demasiado poco  $^{235}\text{U}$ . Para que sirva, es necesario aumentar la concentración de este isótopo en una planta de enriquecimiento. Los detalles del diseño y procedimientos para la obtención del material fisible están clasificados.

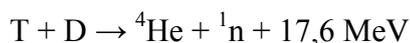
Otro factor importante es también el de la masa crítica. Aun consiguiendo unas condiciones muy enriquecidas de combustible, seguirá produciéndose la fuga de neutrones por la superficie del material. Para optimizar el proceso, se busca la figura geométrica con menor relación superficie/volumen, que es la esfera. El valor de la masa crítica, que engloba la riqueza del material y la relación superficie/volumen, es determinante para que se produzca la fisión. Por encima de la masa crítica, la cantidad de neutrones que escapan por las paredes ya no es suficiente para impedir la reacción en cadena. El mecanismo de la bomba atómica consiste en poner en contacto dos masas subcríticas de uranio enriquecido, de manera que en conjunto, supere la masa crítica; de esta manera, se producirá la reacción en cadena y la explosión. La bomba atómica se consigue manteniendo separadas dos masas subcríticas mediante un grueso tabique captador de neutrones, el cual, en el momento en que se tiene que provocar la explosión, se rompe mediante un explosivo químico y se produce una inyección de neutrones.

### **2.8.8. Reacciones de fusión**

La fusión nuclear es la unión de dos núcleos ligeros para dar lugar a otro núcleo más pesado, proceso acompañado de una enorme liberación de energía. Para que la unión suceda, los núcleos ligeros, con carga eléctrica positiva, deben aproximarse a distancias en las que entre en juego la fuerza nuclear. Para superar la repulsión de los núcleos, estos deben tener una elevada energía cinética, lo cual sólo se consigue a temperaturas muy altas. Esta temperatura de ignición es del orden de  $10^6$ - $10^8$  °C, temperatura a la cual los núcleos están en estado de plasma. En el centro del Sol, la temperatura es de varias decenas de millones de grados, lo que permite la fusión de

núcleos ligeros. En el Sol los núcleos de Hidrógeno se fusionan para dar Helio y positrones, generando una gran cantidad de energía.

La energía liberada en una reacción de fusión es menor que en una de fisión:



sin embargo, la energía por unidad de masa es mayor:  $17,6/5 = 3,52 \text{ MeV/nucleón}$ .

El principal problema de las reacciones de fusión experimentales es que el plasma debe tener una determinada densidad para que el número de fusiones que se generen sean rentables respecto al gasto de alcanzar la temperatura de ignición. Es decir, debe producirse un confinamiento del plasma durante un tiempo suficiente para que las reacciones puedan desarrollarse. En las estrellas, esto está resuelto por el enorme campo gravitacional. En un laboratorio, el confinamiento es muy complicado. Se puede realizar un confinamiento magnético, en el cual se emplea un campo magnético para confinar el plasma. También se ha desarrollado el confinamiento inercial. En éste, el D y T se mezclan en microsferas y se bombardean con haces de láser en impulsos cortos de  $10^{-8}$  s. Las esferas se contraen y se alcanzan  $T > 10^8 \text{ K}$ . La fusión se da en un tiempo muy breve (unos  $10^{-11}$  s).

La fusión todavía no se ha desarrollado como fuente de energía. Únicamente se ha conseguido de manera experimental el “punto de equilibrio” ( $E_{\text{liberada}} = E_{\text{consumida}}$ ).

## 2.9. Aplicaciones de la radiactividad

Las aplicaciones de la radiactividad hacen referencia a la multitud de usos que prestan las radiaciones emitidas por los isótopos radiactivos en su desintegración. Estas radiaciones son utilizadas en la resolución de diversos problemas de nuestra vida cotidiana, como el diagnóstico de enfermedades, la esterilización de productos de “usar y tirar”, la datación de restos arqueológicos, etc.

De acuerdo al tipo de aplicaciones a los que se destinen, los isótopos pueden ser preparados:

- como reactivos radiactivos, cuando sean utilizados para trazar los sistemas materiales objeto de investigación; en este tipo de aplicaciones, los isótopos tienen que estar formando parte del trazador, entendido éste como la molécula que representa (molécula marcada) a la sustancia clave del proceso; en ciencia básica, la preparación del trazador puede ser una tarea de gran dificultad, que a veces tienen que realizar los propios investigadores utilizando precursores marcados.
- como fuentes radiactivas encapsuladas, cuando lo que se pretende es sacar partido a las radiaciones que emiten los isótopos, bien porque nos proporcionen información sobre los sistemas materiales, como base para su control tecnológico; bien porque la utilización masiva de las radiaciones (irradiación a altas dosis), modifique la estructura de enlaces químicos de los materiales y, con ello, sus propiedades; los contenidos isotópicos (actividad) de las fuentes requeridas en cada caso pueden variar dentro de

una amplísima gama de valores, desde las que confinan cantidades del orden del microcurio (fuentes de calibración de instrumentos de medida), hasta las que acumulan millones de curios (conjuntos de fuentes de alta actividad específica de los irradiadores industriales).

**Tabla 2.** Clasificación de las aplicaciones por campos de actividad.

TIPO DE APLICACIÓN	CAMPOS					
	Investigación	Medicina	Industria	Agricultura	Minería	Medio Ambiente
Trazadores	Mecanismos de procesos	Diagnóstico radiofármacos. RIA.PET	Procesos dinámicos de mezcla	Eficacia uso abonos. Hidrología		Cadenas tróficas. Medida de caudales
Relojes	Geocronología. Fechado radiactivo			Tasa de Reposición de acuíferos		Datación arqueológica y variaciones climáticas
Haces/Transmisión		Radioterapia. Osteoporosis (densidad ósea)	Instrumentación de Control. Gammagrafia. Detectores de humo		Pesada en línea de materias primas	Meteorología en estaciones inaccesibles
Haces/Reflexión			Instrumentación de Control. Densidades	Hidrología. Humidímetros		
Haces/Fluorescencia			Control recubrimientos		Control de impurezas. Litología	
Irradiación	Química bajo Radiación	Braquiterapia. Paliativos cáncer. Esterilización. Vacunas	Polimerización. Curado de plásticos. Vulcanización	Esterilización. Pasteurización. Fitogenética		Abatimiento y destrucción de contaminantes
Miscelánea	Análisis por activación neutrónica		Detectores de humos. Luz fría. Productos de consumo		Asociación de la radiactividad natural con minerales valiosos	Conservación del patrimonio histórico

La multitud de aplicaciones de los isótopos radiactivos pueden agruparse según los siguientes tipos:

- Uso de los radioisótopos como trazadores. Ejemplos;  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{32}\text{P}$ , etc.
- Uso de los radioisótopos como relojes. Los relojes están basados en los radionucleidos primordiales, que se pusieron en marcha al crearse el Sistema Solar:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{87}\text{Rb}$  o  $^{40}\text{K}$ . Con estos relojes se ha determinado la edad de la Tierra, la edad de las rocas más antiguas, la aparición y extinción de las especies, etc. Hay otro tipo de relojes, basados en los radionucleidos cosmogénicos, que miden el tiempo en base a otro principio: la constancia de la tasa de formación de estos radionucleidos a lo largo de los tiempos; en los seres vivos, o materiales, alcanzaron una concentración de equilibrio con cada uno de estos radionucleidos. Con la muerte del ser vivo o con el aislamiento del estrato sedimentario, aquella concentración de equilibrio empezó a decrecer, hasta el momento presente, lo que permite ahora estimar el tiempo transcurrido. Ejemplos:  $^{14}\text{C}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{41}\text{Ca}$ .
- Otro tipo de aplicaciones se basan en la medida de los efectos de la radiación en la materia: transmisión, reflexión o fluorescencia. Las aplicaciones por transmisión

consisten en la atenuación de la intensidad de un haz de radiación gamma al atravesar un medio material. También puede determinarse la reflexión (o retrodispersión) de parte de un haz de fotones gamma o de neutrones al incidir sobre un medio material. Así mismo, la alteración de la energía de la radiación puede darse por ionización y excitación de átomos y moléculas; su manifestación principal es la transferencia de energía al medio, lo que da lugar a la magnitud dosis absorbida.

- Irradiación con fuentes radiactivas, como los emisores gamma  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  o  $^{192}\text{Ir}$ .

En la tabla 2 se recogen las principales aplicaciones en los campos de la Investigación, la Medicina, la Industria, la Agricultura y el Medio Ambiente, con indicación del tipo de aplicación al cual pertenecen.

### **3. REFERENCIA AL ÁMBITO DE LA FÍSICA Y LA QUÍMICA Y AL CONTEXTO DE LA EDUCACIÓN SECUNDARIA**

#### **3.1. Introducción. Descubrimiento de la radiactividad y su naturaleza**

El descubrimiento de la radiactividad por el físico francés Becquerel, en 1896, puede considerarse como el comienzo de lo que hoy conocemos como física nuclear.

Becquerel investigaba la fluorescencia de una sal de uranio. Un día guardó dicha sal, protegida de la luz solar, junto a una placa fotográfica envuelta en un papel negro y días más tarde comprobó que la película fotográfica estaba velada. La única explicación lógica para explicar este hecho, era que la sal de uranio debía emitir algún tipo de radiación capaz de atravesar el papel negro e impresionar la placa.

Más tarde comprobó que otros compuestos de uranio tenían el mismo comportamiento, por tanto, era el uranio el causante de esas radiaciones. Sin embargo, en 1898, el matrimonio de científicos María Sklodowska y Pierre Curie aislaron dos nuevos elementos, el polonio (Po) y el radio (Ra), que también manifestaban la emisión de radiaciones, pero con mayor intensidad que el uranio. A estos elementos que presentan la propiedad de emitir radiaciones en forma espontánea se les llamó radiactivos y al fenómeno radiactividad.

Posteriormente, el físico Ernest Rutherford encontró que la nueva radiación era producida por la desintegración espontánea de átomos y que estaba compuesta por tres tipos de emisiones, que denominó radiación alfa, beta y gamma:

- los rayos  $\alpha$  eran partículas con carga eléctrica positiva. Rutherford los identificó como átomos de helio, con dos cargas eléctricas positivas (es decir, dos protones y dos neutrones). Debido a una masa elevada, a su carga eléctrica y a que son emitidas a velocidades no muy altas, estas partículas tienen un poder de penetración pequeño (son frenados por unos centímetros de aire, y no son capaces de atravesar la piel de nuestro cuerpo), y son muy ionizantes (pueden arrancar electrones a otros átomos).

- los rayos  $\beta$  fueron identificados por Becquerel como electrones. Las partículas  $\beta$  se emiten a velocidades próximas a la de la luz, su masa es mucho menor que la de las partículas  $\alpha$ , por tanto tienen un mayor poder de penetración. Pueden penetrar el cuerpo humano, y son frenados por varios metros de aire o una lámina de metal. Son poco ionizantes.

- los rayos  $\gamma$  eran muy parecidos a los rayos X, pero de mayor energía. Por tanto, son ondas electromagnéticas con frecuencias muy altas. Las radiaciones  $\gamma$  tienen un poder de penetración mucho mayor las partículas  $\alpha$  y  $\beta$  (son frenados por 1 metro de hormigón), y no son ionizantes.

### 3.2. Composición del núcleo

En 1911, Rutherford propuso un modelo atómico nuclear, basándose en sus experimentos en los que bombardeaba una lámina muy fina de oro con radiación  $\alpha$ , proveniente de un elemento radiactivo. Según el modelo de Rutherford, el átomo está compuesto por un núcleo muy pequeño, en el que se encuentra casi toda la masa concentrada, y que contiene un número  $Z$  de cargas eléctricas positivas, o protones, llamado número atómico. Este modelo supone que los electrones con carga negativa giran en órbitas planetarias alrededor de los núcleos. Cuando los átomos están en estado eléctricamente neutro, el número de electrones coincide con el número de protones.

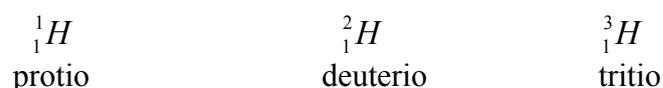
Rutherford y Bohr predijeron la existencia de otra partícula sin carga constituyente del núcleo, llamada neutrón, lo que fue comprobado por Chadwick en 1932.

El número másico  $A$  de un átomo viene dado por el número de nucleones (protones o neutrones) que posee. En consecuencia, el número de neutrones  $N$  es:

$$N = A - Z$$

Un nucleido es cada una de las posibles agrupaciones de nucleones (protones y neutrones), caracterizadas por un número másico  $A$ , un número atómico  $Z$  y un número  $N$  (neutrones). De esta manera, un nucleido se representa por el símbolo del elemento químico y en la parte inferior izquierda su  $Z$  y en la parte superior izquierda su  $A$ . Por ejemplo,  ${}^7_3\text{Li}$  es un núcleo de litio formado por 3 protones y cuatro neutrones.

Se denominan isótopos a los átomos de un mismo elemento con igual número de protones pero distinto número de neutrones. Es decir, los isótopos tienen el mismo número atómico y distinto número másico. Los tres isótopos del hidrógeno son:



Uno de los factores relacionados con la estabilidad nuclear es la relación favorable neutrones-protones. Para los elementos ligeros esta estabilidad se presenta en los núcleos con una relación cercana a un protón por cada neutrón. Según aumenta el número de protones, se necesita mayor número de neutrones para que los núcleos sean

estables porque con ello se reduce la repulsión entre protones. Los elementos inestables se transforman en estables por medio de cambios nucleares, que son la esencia de la radiactividad.

Un isótopo radiactivo no emite simultáneamente partículas alfa y beta, sino que por lo general, los rayos gamma se emiten con las partículas alfa o beta, debido a los ajustes de energía interna del núcleo del átomo.

### **3.3. Estabilidad de los núcleos. Energía de enlace nuclear**

#### **3.3.1. Fuerza nuclear fuerte**

En el núcleo de los átomos, los nucleones se agrupan de tal modo que la distancia entre ellos es del orden de  $10^{-15}$  m. A esta distancia tan pequeña, la fuerza eléctrica de repulsión entre los protones es muy grande. La fuerza gravitatoria atractiva entre los mismos protones es despreciable frente a la fuerza eléctrica, pues es unas  $10^{-36}$  veces más pequeña.

En consecuencia, debe existir una tercera fuerza, muy intensa, de corto alcance y atractiva que supere las fuerzas eléctricas de repulsión y mantenga unido el núcleo. Esta fuerza se denomina fuerza nuclear fuerte. Es una fuerza que sólo se manifiesta en el interior del núcleo y su valor parece ser el mismo entre dos protones, entre dos neutrones o entre un protón y un neutrón.

Resumiendo, las características de la fuerza nuclear fuerte son:

1. Es una fuerza atractiva muy intensa.
2. Actúa entre dos nucleones con independencia de su carga.
3. Es una fuerza de corto alcance, sólo se manifiesta en el interior del núcleo.

#### **3.3.2. Defecto de masa y energía de enlace**

Al determinar con precisión las masas de los núcleos de los átomos con el espectrógrafo de masas, se obtuvo un resultado sorprendente. El valor obtenido es siempre inferior a la suma de las masas de los nucleones que forman el núcleo. Es decir, la masa del núcleo es inferior a la suma de las masas de los protones y neutrones que lo forman. Esta diferencia se denomina defecto de masa ( $\Delta m$ ) y se calcula mediante la expresión:

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) m_n - M$$

Siendo  $m_p$  la masa del protón,  $m_n$  la masa del neutrón y  $M$  la masa experimental del núcleo.

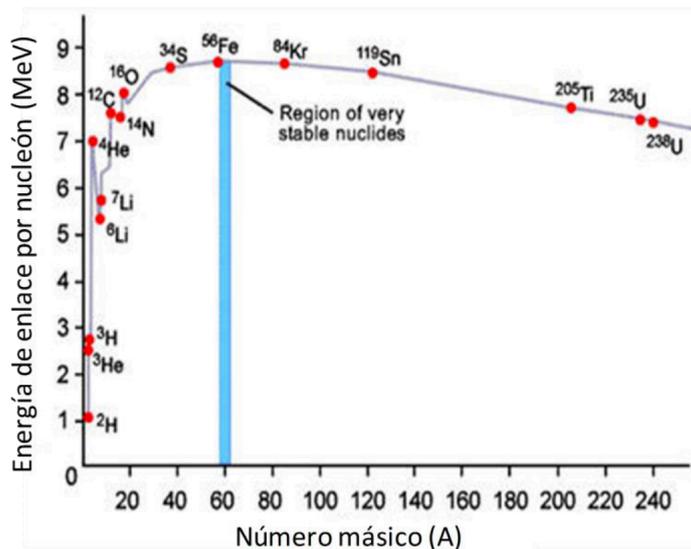
De acuerdo con la fórmula de Einstein, la energía equivalente a este defecto de masa es:

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

Esta energía se denomina energía de enlace o energía de ligadura del núcleo y es la energía que se libera al formarse el núcleo a partir de sus nucleones constituyentes. Por tanto, la energía equivalente al defecto de masa experimental de un núcleo, coincide con la energía de enlace que mantiene sus nucleones unidos.

Dividiendo la energía de enlace del núcleo ( $E$ ) entre el número de nucleones ( $A$ ) que contiene, se obtiene la energía de enlace por nucleón.

Si representamos la energía de enlace por nucleón frente al número másico para los elementos del sistema periódico, tenemos (figura 16):



**Figura 16.** Representación de la energía de enlace por nucleón para varios nucleidos. Reproducido de: <http://cuentos-cuanticos.com/2011/11/03/d-estrozando-nucleos-la-fision/>. Creative Commons CC BY-NC

Los núcleos más estables son los que tienen mayor energía por nucleón. El núcleo más estable es el del  $^{56}\text{Fe}$  (8,8 MeV/nucleón) y el menos estable en el deuterio (1,2 MeV /nucleón).

Si un núcleo pesado se divide en dos núcleos más ligeros (fisión nuclear), o si dos núcleos ligeros se unen para formar uno más pesado (fusión nuclear), se obtienen núcleos más estables, con mayor energía de enlace por nucleón, y se libera energía.

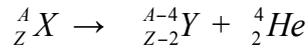
### 3.4. La desintegración radiactiva y sus leyes

#### 3.4.1. Leyes de los desplazamientos radiactivos

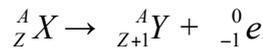
Después de los descubrimientos de los elementos radiactivos, se comprobó que el fenómeno de la radiactividad era debido a cambios producidos en los núcleos de los átomos, ya que las emisiones radiactivas no se veían afectadas por las reacciones químicas o por los cambios de temperatura o presión. También se pudo comprobar que había tres tipos de radiaciones radiactivas: radiación  $\alpha$ , radiación  $\beta$  y radiación  $\gamma$ . La radiactividad es una propiedad intrínseca de los átomos que proviene de la desintegración de los núcleos.

En 1913, el físico inglés F. Soddy enunció tres leyes, llamadas del desplazamiento radiactivo, relacionadas con los tres tipos de radiación  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ :

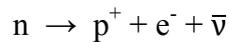
1. Cuando un núcleo X emite una partícula  $\alpha$  ( ${}^4_2\text{He}$ ), se obtiene un núcleo Y cuyo número atómico es dos unidades menor y su número másico es cuatro unidades menor.



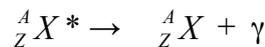
2. Cuando un núcleo X emite una partícula  $\beta$  ( ${}^0_{-1}e$ ), se obtiene un núcleo Y cuyo número atómico es una unidad mayor y no varía su número másico.



Dado que las partículas  $\beta$  son electrones acelerados, ¿cómo pueden estar en el núcleo? Cuando la relación neutrón/protón es demasiado grande, el núcleo es inestable y se estabiliza produciendo la desintegración de un neutrón en un protón y un electrón, y la emisión de una partícula sin carga y de pequeña masa llamada antineutrino ( $\bar{\nu}$ ):



3. Cuando un núcleo X emite radiación  $\gamma$ , altera su contenido energético pero no cambia el número de sus nucleones, por lo que no cambia el elemento. Los núcleos, al igual que la corteza de los átomos, también tienen niveles energéticos y el tránsito de unos a otros se realiza con la absorción o emisión de fotones. Estos fotones son de gran energía (2-3 MeV). Mediante esta emisión, los núcleos previamente excitados ( $X^*$ ) vuelven al estado fundamental.



### 3.4.2. Ley de la desintegración radiactiva

Los átomos de un elemento radiactivo son inestables y están condenados a transmutarse (transformarse) en otros elementos al emitir radiaciones  $\alpha$  o radiaciones  $\beta$ . Ahora bien, no es posible predecir cuándo un determinado átomo se desintegrará; de ahí que estos fenómenos hayan de estudiarse bajo un punto de vista estadístico, basando todas las deducciones en el cálculo de probabilidades.

Si  $N_0$  es el número de núcleos existentes en el inicio; N el número de núcleos que quedan sin desintegrar al cabo de un cierto tiempo t y  $\lambda$  una constante de proporcionalidad llamada constante de desintegración, se puede demostrar mediante el cálculo de probabilidades que:

$$N = N_0 e^{-\lambda \cdot t} \text{ (Ley de desintegración radiactiva)}$$

La constante de desintegración  $\lambda$  representa la probabilidad de que un determinado núcleo radiactivo se desintegre y tiene un valor característico para cada elemento radiactivo. En el Sistema Internacional de Unidades, su unidad es  $s^{-1}$ .

Por otro lado, la actividad (A) de una muestra radiactiva evalúa la proporción en la que sus núcleos se desintegran por unidad de tiempo, y es proporcional al número de núcleos presentes:

Actividad inicial:

$$A_0 = \lambda \cdot N_0$$

Actividad al cabo de un cierto tiempo t:

$$A = \lambda \cdot N$$

La relación entre estas actividades viene dada por:

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

Unidad de la actividad en el SI : 1 desintegración/s = 1 Becquerel = 1 Bq

Se llama período de semidesintegración ( $T_{1/2}$ ) al tiempo que debe transcurrir para que el número de núcleos presentes en una determinada muestra se reduzca a la mitad ( $N=N_0/2$ ). Luego:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{2} = e^{-\lambda \cdot T_{1/2}} \quad \rightarrow \quad 2 = e^{\lambda \cdot T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Otro concepto que se utiliza es la vida media ( $\tau$ ), que es el tiempo promedio de vida de los núcleos presentes, y que equivale a la inversa de  $\lambda$ :

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

### 3.5. Aplicaciones de la radiactividad

El comportamiento químico de los isótopos radiactivos es idéntico al de los isótopos estables del mismo elemento, pero son detectables localizando la radiación que emiten. Las numerosas aplicaciones de los isótopos radiactivos se deben a esta propiedad y a los efectos que las radiaciones producen en la materia. Entre estas aplicaciones se encuentran:

- Medicina. Diversos isótopos se utilizan para averiguar la localización de tumores y el tratamiento del cáncer destruyendo las células malignas. El sodio-24 se utiliza para seguir el recorrido de la sangre y localizar obstrucciones del sistema circulatorio.
- Determinación de la edad de restos fósiles. La edad de productos de origen orgánico se puede estimar con los núcleos de carbono-14, el cual se incorpora a los seres vivos mientras viven (cuando fallecen ya no lo incorporan). Por lo tanto, la actividad del carbono-14 es una medida del tiempo que ha pasado desde su muerte.

- Estudio de las reacciones químicas. Con el uso del tritio, carbono-14, oxígeno-18, sodio-24, fósforo-32 y azufre-35 y de contadores de Geiger se puede seguir la trayectoria de los átomos radiactivos a través de todos los pasos intermedios de un metabolismo o de la obtención de un producto.

- Esterilización. Se irradia a los machos con rayos gamma, los cuales alteran sus células reproductivas y se les esteriliza.

- Conservación de alimentos. La irradiación de algunos alimentos retrasa la germinación y permite almacenarlos durante largos periodos.

- Aplicaciones industriales. Se utilizan isótopos para medir el espesor del metal o papel, la cantidad de flujo de un gas o un líquido; para determinar las fugas de tuberías, el desgaste o estado físico de equipo de edificios; para obtener nuevos elementos, producción de energía eléctrica, etcétera.

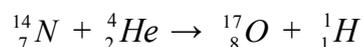
Para detectar las radiaciones se emplean distintos dispositivos como son: los contadores Geiger basados en la propiedad ionizante de las radiaciones y los contadores de centelleo que transforman los destellos luminosos producidos por las radiaciones en impulsos eléctricos.

### 3.6. Reacciones nucleares

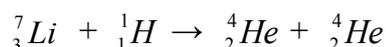
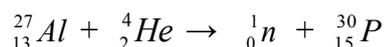
Las reacciones nucleares son reacciones en la que intervienen núcleos atómicos. Generalmente, se producen al bombardear un núcleo con otros de menor tamaño o con partículas subatómicas.

En estas reacciones nucleares, la suma de los números atómicos y la suma de los números másicos de los nucleidos iniciales y finales se mantienen constantes.

La primera reacción nuclear fue producida por Rutherford, en 1919, al bombardear  $^{14}\text{N}$  con partículas  $\alpha$ :



A continuación se indican algunos ejemplos de reacciones nucleares:

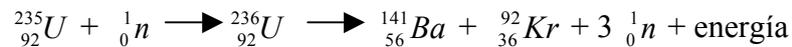


### 3.7. Fisión y fusión nuclear

#### 3.7.1. Fisión nuclear

La fisión nuclear consiste en la escisión de un núcleo, generalmente pesado ( $A > 230$ ), en dos más ligeros. Cuando un núcleo pesado se divide en dos núcleos más ligeros, éstos son más estables como ya vimos en la gráfica de energías de enlace por nucleón; tienen mayores energías de enlace y en el proceso se libera energía.

Los núcleos no se dividen fácilmente, pero se puede acelerar su división si los bombardeamos con neutrones (partículas sin carga eléctrica que penetran hasta el núcleo sin dificultad). Esto es lo que le ocurre a los núcleos del  ${}^{235}_{92}\text{U}$  cuando absorben un neutrón, en primer lugar se convierten en núcleos inestables de  ${}^{236}_{92}\text{U}$ , e inmediatamente se dividen en dos fragmentos de números atómicos  $Z$  comprendidos entre 34 y 57, y números másicos comprendidos entre 72 y 149, liberándose una gran cantidad de energía y nuevos neutrones. Por ejemplo:

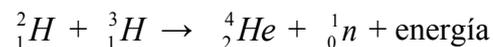


La energía liberada en este caso es de unos 200 MeV por átomo, millones de veces mayor que la energía que se desprende en una reacción química de combustión.

En el proceso de fisión del uranio-235 se liberan varios neutrones que hacen posible la fisión de otros núcleos. Éstos liberan neutrones y así sucesivamente, iniciando lo que se denomina una reacción en cadena, capaz de producir una enorme cantidad de energía.

#### 3.7.2. Fusión nuclear

La unión de núcleos ligeros para formar núcleos más pesados se llama fusión nuclear; es por tanto el proceso inverso al de fisión nuclear. Cuando se unen dos núcleos ligeros, se obtiene un núcleo más estable según la gráfica de energías de enlace por nucleón, con mayor energía de enlace, y se libera energía. Por ejemplo:



En esta reacción se libera aproximadamente 17,6 MeV por átomo. Si lo comparamos con la energía liberada en el proceso de fisión, tenemos:

$$235 / 5 = 47 \qquad 47 \cdot 17,6 \text{ MeV} = 827 \text{ MeV}$$

lo que nos indica que se libera mucha más energía en este proceso.

Las reacciones de fusión son muy difíciles de conseguir con la tecnología actual, ya que para unir dos núcleos hay que vencer las fuerzas eléctricas de repulsión que existen entre las cargas positivas de los protones y acercarlos a distancias en las que entren en juego las fuerzas nucleares. Para conseguirlo, los núcleos deben chocar entre sí a velocidades suficientemente altas para poder vencer las fuerzas de repulsión, lo que

requiere temperaturas de millones de grados. Esto sólo se consigue en el interior de las estrellas y mediante la explosión de una bomba atómica.

### **3.8. Reactores nucleares**

#### **3.8.1. Reactores nucleares de fisión**

Un reactor nuclear es un dispositivo donde se produce una reacción nuclear de fisión controlada. La energía que se obtiene de la reacción se utiliza para producir vapor de agua a presión que hace girar una turbina, que a su vez, hace funcionar un alternador para producir corriente eléctrica.

El uranio que se encuentra en la naturaleza contiene solamente un 0,7% de uranio-235 y un 99,3% de uranio-238 no fisible. El uranio que se usa en los reactores nucleares es uranio natural o uranio enriquecido que contiene del 3 al 5% de uranio-235. Debido a esta baja proporción de uranio-235, en un reactor nuclear no pueden producirse explosiones nucleares similares a una bomba atómica.

La explosión de una bomba atómica es una reacción en cadena instantánea e incontrolable. En un reactor nuclear ocurre una reacción similar que puede controlarse de tal manera que una fisión produce únicamente una nueva fisión y no existe posibilidad de explosión porque los combustibles de un reactor nuclear no tienen la composición ni la distribución tan compacta de una bomba. Además, se emplean barras de control que se introducen y se sacan en los espacios situados entre las barras de combustible.

Las barras de control, de cadmio o boro, van a regular la reacción en cadena ya que absorben neutrones. Se insertan entre las varillas que contienen el combustible nuclear. Cuando se insertan por completo detienen la reacción en cadena y paran el reactor.

Los neutrones emitidos en la fisión del uranio-235 son de los llamados “rápidos”, con energía entre 1-2 MeV, y son poco adecuados para producir fisión en otros núcleos. Es preciso termalizarlos o moderarlos a base de choques parcialmente elásticos con núcleos ligeros hasta conseguir neutrones de unos 0,03 MeV, llamados “térmicos”.

Para ello se utiliza un moderador, que a su vez hace funciones de refrigerador, que va a disminuir la velocidad de los neutrones. El moderador puede ser agua pesada, grafito o berilio.

#### **3.8.2. Reacciones de fisión incontroladas**

Los neutrones que se emiten en la fisión del uranio-235 hacen posible una reacción en cadena. Ahora bien, si los neutrones escapan o son absorbidos por otros materiales, la reacción se detiene. Si por el contrario, más de un neutrón emitido produce a su vez una nueva fisión, el número de éstas crece rápidamente, resultando en

una reacción incontrolada que produce una gran cantidad de energía; éste es el fundamento de la bomba atómica.

Para que los neutrones no escapen y puedan ser atrapados por los núcleos de uranio-235, debe de haber una cantidad suficiente de material fisionable. A esta cantidad mínima, necesaria para producir la reacción en cadena, se le denomina masa crítica.

La fabricación de bombas atómicas exige concentrar el uranio-235 hasta un 99%, lo que requiere que el uranio natural sea enriquecido en instalaciones muy costosas.

### **3.9. Riesgos de la energía nuclear. Problemática de los residuos**

#### **3.9.1. Los peligros de la radiactividad**

Las irradiaciones a que están sometidos los seres vivos proceden de la radiactividad natural, es decir, la que procede de la propia naturaleza, y la radiación artificial, procedente de las actividades humanas que producen núcleos radiactivos.

La radiactividad natural procede de las transformaciones radiactivas de ciertos elementos que componen la corteza terrestre y de las radiaciones que proceden del Sol (radiación cósmica). La radiación artificial procede de explosiones nucleares, reactores nucleares, usos médicos de fuentes radiactivas, etc.

Los riesgos de la radiactividad son debidos a la energía que transporta y a la posible asimilación por los seres vivos de sustancias radiactivas. Al producir la ionización de moléculas en los organismos vivos, puede provocar la destrucción de los tejidos y del código genético, lo que puede ocasionar tumores, malformaciones, etc.

Cuando se estudian los materiales radiactivos, la actividad se expresa en desintegraciones por segundo. La unidad de actividad en el SI es el becquerel (Bq), que corresponde a una desintegración por segundo.

Sin embargo, lo que realmente interesa son los efectos biológicos y físicos producidos por las radiaciones. La medida de la peligrosidad de la radiactividad se realiza evaluando su interacción con la materia. Para ello se mide la dosis de radiación recibida. La unidad en el SI de dosis de radiación es el sievert (Sv).

Un sievert equivale a 100 rem, que es una unidad muy utilizada anteriormente. Según la legislación española, los profesionales no deben estar expuestos a dosis superiores a 5 rem, y la población en general a dosis superiores a 0,5 rem.

#### **3.9.2. La problemática de los residuos radiactivos**

Se llama contaminación radiactiva a la presencia indeseable de sustancias radiactivas en el interior de cualquier material u organismo vivo. Los residuos

producidos por las centrales nucleares son radiactivos y pueden originar contaminación al aire, al agua o a las personas que los manipulan.

Los residuos radiactivos pueden ser de alta actividad y de baja actividad. Los residuos sólidos se suelen someter a un encapsulado en hormigón, y los líquidos primeramente se solidifican mediante vitrificación y posteriormente se encapsulan. Cada central nuclear almacena sus propios residuos para su posterior depósito en los llamados “cementeros nucleares”.

El problema de los residuos radiactivos, producidos fundamentalmente en las centrales nucleares, no tiene todavía una solución definitiva debido a la gran duración (hasta milenios) de su actividad radiactiva.

#### **4. PLANIFICACIÓN DE LA ENSEÑANZA-APRENDIZAJE**

En la primera sesión dedicada al tema de Física nuclear, el profesor empezará explicando el concepto de radiactividad y su descubrimiento (apartado 3.1), así como los conceptos sobre la composición del núcleo (3.2) y la fuerza nuclear fuerte (3.3) por la que se explica la radiactividad. Con estas indicaciones teóricas, el profesor pasará a explicar, en la siguiente sesión, la práctica de la detección casera de radiactividad. A continuación, se llevará a cabo en el laboratorio de Física. La realización de este experimento sencillo persigue demostrar la existencia de la radiactividad en nuestro entorno, lo que puede cambiar la concepción de los alumnos sobre la radiactividad, dejando de ser algo abstracto y puramente teórico.

Después de la toma de contacto experimental con la radiactividad, el profesor pasará a explicar las leyes de los desplazamientos radiactivos y la ley de desintegración radiactiva, es decir, la fundamentación teórica con la cual, más adelante, deberán resolverse actividades y problemas. Con la realización de la práctica experimental, previa a este desarrollo teórico, se trata de motivar al alumno, estimular su interés y curiosidad, y proporcionar un contexto sobre el cual facilitar el aprendizaje de la base teórica de la radiactividad.

Siguiendo en la línea de fomentar el interés y curiosidad de los alumnos, a continuación se tratarán las aplicaciones de la radiactividad. En concreto, en primer lugar, se hablará sobre una aplicación de la radiactividad muy conocida, la determinación de la antigüedad de una muestra por  $^{14}\text{C}$ , que además nos va a permitir trabajar el concepto teórico del decaimiento radiactivo. De esta manera, utilizamos la resolución de problemas auténticos para promover un aprendizaje significativo basado en una enseñanza situada.

El profesor pasará a proponer dos actividades sobre las aplicaciones de la radiactividad:

- Determinación de la antigüedad de una muestra por  $^{14}\text{C}$
- seguimiento del curso de una reacción bioquímica

Los alumnos se agruparán de dos en dos. La mitad de los grupos recibe la actividad sobre  $^{14}\text{C}$  y la otra mitad la actividad sobre la reacción bioquímica. Los alumnos

resuelven por parejas el problema, y a continuación, se las intercambian con otra pareja para corregir la actividad que no hayan hecho. Una vez corregidas, los alumnos podrán discutir sobre la realización y corrección de sus actividades, resolviendo sus dudas. El trabajo colaborativo, y la resolución de dudas de igual a igual favorece el aprendizaje para aquellos que tienen más dificultades para seguir las explicaciones del profesor; además, el esfuerzo por explicar lo aprendido a otros, ayuda a un mejor entendimiento y asentamiento de los conceptos.

Una vez resueltas las actividades, el profesor propondrá una actividad para casa. En grupos de 3 o 4 alumnos, deben hacer una búsqueda sobre 2 o 3 aplicaciones de la radiactividad propuestas por el profesor (enumeradas en el apartado 3.4). Las fuentes pueden ser libros de texto o internet. Al día siguiente, cada grupo de alumnos expondrá en no más de 3 minutos sus averiguaciones al resto de la clase. Si bien se repetirán aplicaciones, esto no es un inconveniente, puesto que se completará la información de cada una de ellas. Con esta actividad se pretende fomentar la iniciativa, el trabajo en grupo y el aprendizaje autónomo orientado por el profesor.

**Tabla 3.** Temporalización de la unidad didáctica

<b>Nº Sesión</b>	<b>Contenidos / actividades</b>
1	Aula. Explicar: descubrimiento de la radiactividad y su naturaleza (3.1), composición del núcleo (3.2) y estabilidad de los núcleos y energía de enlace nuclear (3.3).
2	Laboratorio de Física. Explicar la práctica experimental de detección de la radiactividad, y llevarla a cabo.
3	Aula. La mitad de la sesión: explicar las leyes de los desplazamientos radiactivos y ley de la desintegración radiactiva (3.4), y la determinación de la antigüedad de una muestra por $^{14}\text{C}$ . La otra mitad de la sesión: realizar las dos actividades propuestas. Pedir la actividad para casa sobre las aplicaciones de la radiactividad.
4	Aula. Los grupos de 3-4 alumnos realizan las exposiciones sobre las aplicaciones (7 exposiciones, 5 minutos cada una). El profesor resume y concreta lo más importante sobre las aplicaciones. Realizar las correcciones de las actividades si no dio tiempo la sesión anterior.
5	Aula. Explicar: reacciones nucleares (3.6), fisión y fusión nuclear (3.7), reactores nucleares (3.8) y riesgos de la energía nuclear y problemática de los residuos (3.9). Introducir debate.
6	Aula. Realizar el debate (aproximadamente 20 minutos). Repaso de conceptos y resolución de dudas. Realización de algún ejercicio de evaluación.
7	Aula. Realización de la evaluación con el cuestionario propuesto.

A continuación, siguiendo con los contenidos de la unidad didáctica, el profesor explicará las reacciones nucleares, la fisión y fusión nuclear y los reactores de fisión. Para estos dos últimos puntos usaremos de nuevo situaciones de la vida real. El profesor utilizará el esquema del reactor de Fukushima para explicar los reactores de fisión. Los alumnos posiblemente recordarán el accidente nuclear de 2011. El profesor mostrará las consecuencias del accidente nuclear mediante imágenes, así como la devastación causada por las bombas nucleares de la segunda Guerra Mundial, con la intención de suscitar reflexión y debate. El profesor hablará sobre el último punto de los contenidos (riesgos de la energía nuclear) y se propondrá un debate en clase acerca del uso de la energía nuclear, el problema de los residuos radiactivos, y las consecuencias negativas que ha tenido para la humanidad un descubrimiento científico, la radiactividad, tan relevante y con tantas aplicaciones beneficiosas.

El número total de sesiones dedicadas serán 7. Para asignar este número de horas, se ha tomado como orientación la Programación General Anual de 2º Bachillerato de Física del IES Práxedes Mateo Sagasta. En la tabla 3 se muestra de manera esquemática la temporalización de la unidad didáctica.

## **5. METODOLOGÍA Y ESTRATEGIAS DE ENSEÑANZA**

La estrategia de enseñanza aplicada es la enseñanza situada. La enseñanza situada destaca la importancia de la actividad y el contexto para el aprendizaje. Para la enseñanza situada, aprender y hacer son acciones inseparables, por lo que los alumnos han de aprender haciendo dentro del contexto pertinente. Así mismo, destaca la importancia del aprendizaje cooperativo y el análisis de problemas de manera colaborativa.

Siguiendo la estrategia de la enseñanza situada, hemos establecido como punto de partida la realización de una experiencia práctica para detectar la radiactividad ambiental, con la que vamos a establecer un contexto, al demostrar que la radiactividad no es un fenómeno abstracto y lejos de nuestra experiencia, a la vez que fomentamos la motivación por el estudio del tema. Además, contribuimos a crear ese contexto hablando de las aplicaciones de la radiactividad en la vida real, y haciendo reflexionar a los alumnos sobre el uso de la energía nuclear y sus riesgos, problemas que atañen a nuestra sociedad.

Para “aprender haciendo” se han propuesto actividades de trabajo autónomo y cooperativo entre los alumnos, trabajando sobre aplicaciones prácticas en la vida real de la radiactividad. El trabajo en grupo, la resolución de dudas de igual a igual, y el análisis del trabajo de los demás no sólo ayuda a un mejor aprendizaje, sino que es una buena herramienta de motivación.

Con la aplicación de esta metodología, se pretende que los alumnos consigan un aprendizaje significativo. El aprendizaje significativo es aquel aprendizaje en el que el docente crea un entorno de instrucción en el que los alumnos entienden lo que están aprendiendo. Este aprendizaje sirve para utilizar lo aprendido en nuevas situaciones, en un contexto diferente, por lo que más que memorizar, hay que comprender. El

aprendizaje significativo ocurre cuando una nueva información "se conecta" con un concepto relevante pre-existente en la estructura cognitiva. El aprendizaje significativo es un aprendizaje relacional. El sentido lo da la relación del nuevo conocimiento con conocimientos anteriores, con situaciones cotidianas, con la propia experiencia, con situaciones reales, etc.

## **6. DISEÑO DE RECURSOS Y MATERIALES DIDÁCTICOS**

Para realizar las explicaciones sobre los contenidos del tema, desarrollados en el apartado 3, el profesor realizará una exposición hablada, utilizando la pizarra y el libro de texto como apoyo, realizando una exposición lo más interactiva posible con los alumnos, realizando preguntas y promoviendo la participación de los alumnos en el desarrollo de la teoría. También utilizará como apoyo un proyector o pizarra digital para mostrar las figuras relevantes (como la figura 16, u otras que pueda extraer del libro de texto), para centrar la atención del alumno y realizar una explicación sobre la figura en cuestión. Así mismo, también se proyectarán las figuras que se detallarán a continuación en este apartado (figuras 19, 20, 21, 22 y 23).

A continuación se describirán las actividades y prácticas a llevar a cabo: práctica de laboratorio, actividad de determinación de la antigüedad de una muestra por  $^{14}\text{C}$ , actividad de seguimiento del curso de una reacción bioquímica, recopilación de esquemas e información del reactor de Fukushima, recopilación de imágenes sobre el accidente de Fukushima y las bombas nucleares, y elaboración de un esquema para el debate.

### **6.1. Preparación de la práctica de laboratorio**

El trabajo con radiactividad en un aula-laboratorio de un instituto de educación secundaria plantea toda una serie de dificultades técnicas y legales. Es por ello que esta práctica consiste en la realización de un método casero para la detección de la radiactividad ambiental. La práctica podría mejorarse, sobre todo en términos de mejora de la sensibilidad de las medidas, si el instituto contara con un contador Geiger. Sin embargo, no es común que los institutos de educación secundaria estén equipados con este tipo de aparatos. Por ello, planteamos que el profesor construya un aparato de forma casera para la medida de la radiactividad ambiental. El profesor deberá preparar con antelación tanto este aparato, como la muestra a medir.

- Preparación de un electroscopio casero:

La preparación de un electroscopio casero se ha basado en el artículo de Vadym Pazyi, Oscar Rodríguez y José Luis Contreras González, "Midiendo la Radioactividad con un Electroscopio casero."

El electroscopio es un dispositivo que sirve para demostrar la presencia de cargas eléctricas y para determinar su signo (figura 17). Cuando cargamos la bolita de la parte superior de la figura, por ejemplo, con una barrita cargada por frotamiento, observamos que las láminas que se encuentran dentro del matraz se separan debido a

que en ellas se acumulan cargas de igual signo, que se repelen por fuerzas electrostáticas. Sin embargo, ya Coulomb observó que al cabo de cierto tiempo la carga escapaba de las láminas, ya que éstas volvían a acercarse. Este efecto se producía aunque la botella que contenía las láminas estuviera herméticamente cerrada y se denominó corriente oscura. El origen de la corriente oscura se atribuyó a la ionización del aire. Si existe un cierto grado de ionización en el aire, éste es capaz de conducir la electricidad desde las placas del electroscopio. La ionización del aire debe ser producida por una radiación ionizante; a principios del siglo XX se descubrió que la radiación ionizante responsable provenía de la radioactividad de origen terrestre y de fuentes extraterrestres, lo que dio lugar al descubrimiento de los rayos cósmicos.



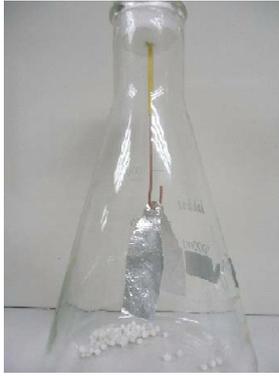
**Figura 17.** Ejemplo de un electroscopio. Reproducido de: Vadym Pazyi, Oscar Rodríguez y José Luis Contreras González. “Midiendo la Radioactividad con un Electroscopio casero.”

La conductividad eléctrica del aire, producida por los iones que contiene, es responsable de la pérdida de carga del electroscopio cargado y, por tanto, del acercamiento de las láminas metálicas. El ritmo con el que se descarga un electroscopio puede ser utilizado para medir la densidad de iones en el aire dentro del matraz, los cuáles han sido producidos por alguna fuente de radiación ionizante. Este hecho es la base del experimento.

Para construir el espectroscopio necesitamos un matraz con un cuello recto y estrecho. Como tapón utilizamos corcho blanco (poliestireno expandido) un material blando y no conductor. Con un alambre de cobre perforamos el tapón de tal forma que el extremo superior quede fuera del matraz, mientras que la parte interior incluya dos láminas de papel de aluminio, obtenidas de doblar una tira larga. En la figura 18 podemos ver un ejemplo de un electroscopio casero. En la parte derecha del matraz, a media altura, practicamos un orificio de unos 2 cm de diámetro. Esto nos servirá para acercar las fuentes radioactivas, pero sin llegar a introducirlas en el matraz. Este orificio es necesario, ya que las partículas alfa son muy poco penetrantes (unos centímetros en el aire) y la pared de vidrio del matraz bastaría para pararlas.

- Preparación de una muestra de polvo, fuente natural de Rn:

El radón es un gas radiactivo natural que proviene de la desintegración del uranio en la corteza terrestre. La concentración de radón en el aire es bastante irregular y depende del contenido en uranio y/o radio de las rocas de donde proviene y, en general, de la geología.



**Figura 18.** Ejemplo de un electroscopio casero. Las láminas de aluminio están separadas, puesto que han sido cargadas previamente con una varilla. Reproducido de: Vadym Pazyi, Oscar Rodríguez y José Luis Contreras González. “Midiendo la Radioactividad con un Electroscopio casero.”

Durante el decaimiento radiactivo del  $^{222}\text{Rn}$ , éste emite partículas alfa, dando  $^{218}\text{Po}$ , el cual es a su vez radiactivo, emitiendo partículas alfa para dar  $^{214}\text{Pb}$ . Esta secuencia de eventos continúa hasta dar lugar al nucleido estable  $^{206}\text{Pb}$ .  $^{218}\text{Po}$  y  $^{214}\text{Pb}$  tienen periodos de semidesintegración muy cortos (menos de 20 minutos) y ambos son emisores de partículas alfa. Estos dos nucleidos están presentes en el aire conjuntamente con el radón. Sin embargo, su comportamiento difiere del radón en que estos son invariablemente iónicos, lo que significa que tienden a adherirse como aerosoles a partículas del aire, y tienden a adherirse a superficies como paredes, pantallas, techos... El polvo de una habitación o sótano poco ventilado, o de las pantallas de televisión, contendrán los nucleidos radiactivos procedentes de la desintegración del radón.

- Una posibilidad consiste en recoger en un trapo polvo radioactivo presente en un sótano poco ventilado; para ello se puede utilizar una aspiradora, tapando la boquilla con el trapo y aspirando un tiempo suficiente. El trapo se dobla y en el interior conservamos el polvo. A la hora de hacer las mediciones, desdoblamos el trapo y exponemos el polvo recogido.
- Se puede realizar un procedimiento similar, utilizando un papel de cocina y recogiendo polvo de varias pantallas de ordenadores o televisiones, hasta tener una capa sustancial de polvo.

- Explicación de la práctica a los alumnos:

Antes de comenzar con la práctica en sí, explicaremos a los alumnos la fundamentación del electroscopio (explicado más arriba), y la posibilidad de medir la radiactividad ambiental: en el ambiente existen radiaciones provenientes de diversas fuentes: los rayos cósmicos, radionucleidos presentes en la atmósfera o en la superficie terrestre, bien naturales, como el mineral de uralita en la corteza terrestre, o artificiales procedentes de diversas sustancias químicas, como algunos fertilizantes. El radón es un gas que procede de la descomposición del uranio presente en la corteza terrestre, y constituye una de las principales radiaciones naturales a las que estamos expuestos. El radón está presente en nuestro ambiente y en nuestras casas. Podemos encontrar productos de descomposición del radón, a su vez radiactivos, en el polvo de nuestras casas, que será lo que utilizemos como muestra para medir la radiactividad.

- Desarrollo de la práctica:

La radioactividad ambiental es capaz de ionizar el aire y producir el acercamiento de las láminas cargadas del electroscopio. Sin embargo, este efecto es muy débil. Si construimos un electroscopio y lo cargamos, las láminas, inicialmente separadas, se acabarán juntando pero muy lentamente. Por ello, se intentará en primer lugar demostrar la radiactividad del ambiente. Ya que esperamos un efecto muy débil, se utilizará después la muestra de polvo, que estará más enriquecida en radiactividad que el propio aire ambiental. Observaremos que el ritmo de descarga del electroscopio (acercamiento de las láminas) es mayor utilizando la fuente natural de Rn, ya que va a producir una mayor densidad de iones en el aire dentro del matraz. Para observar diferencias con el efecto de la radiactividad ambiental, deberemos tener una sustancial muestra de polvo. Un experimento similar es sugerido en la siguiente página web, en la que se muestran recursos para la enseñanza de la Física a alumnos de 16 a 19 años: “Teaching advanced Physics, episode 509: Radioactive background and detectors” y “episode 509-3: Radiation in dust”. En este experimento se encontraron diferencias entre las medidas de la radiactividad ambiental y las procedentes de una muestra de polvo de tres pantallas de ordenador.

El desarrollo del experimento es muy sencillo:

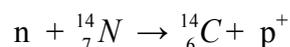
1. Se presenta el electroscopio y se explica su funcionamiento.
2. Se carga el electroscopio utilizando una varilla de vidrio frotada con un papel y se observa que las láminas se separan.
3. En la primera medida, para detectar la radiactividad ambiental, simplemente observamos y medimos el tiempo que tardan las láminas en juntarse.
4. En la segunda medida, acercamos la fuente de polvo al orificio del matraz y observamos si las láminas se juntan más rápido que en el caso anterior.

## 6.2. Descripción de la actividad de determinación de la antigüedad de una muestra por $^{14}\text{C}$

**a) Se realizará una presentación Power Point en el aula para explicar el fundamento de la datación por  $^{14}\text{C}$  (figura 19):**

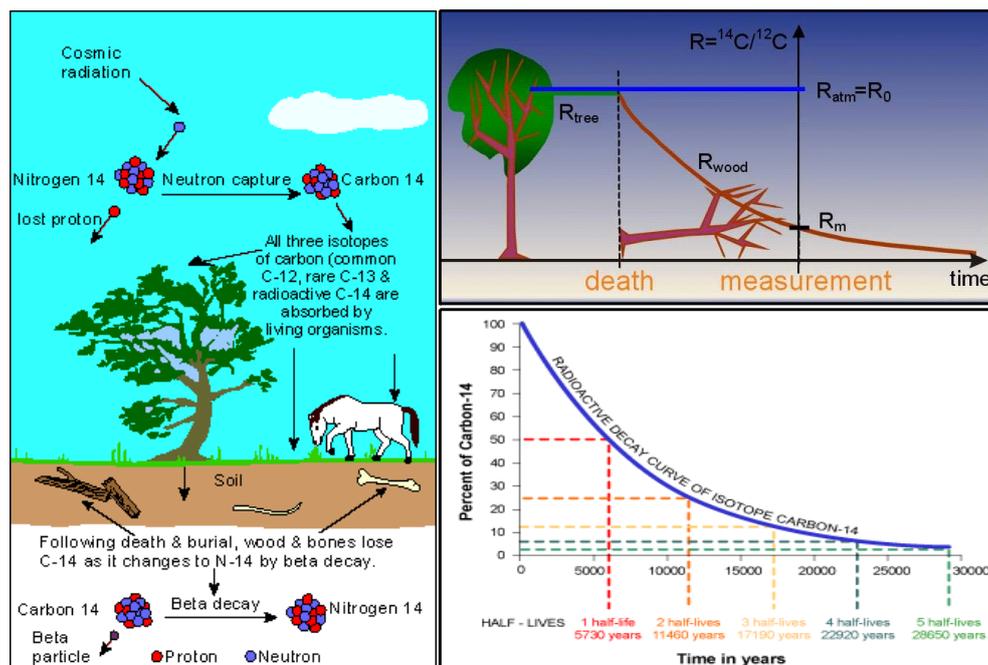
La datación por  $^{14}\text{C}$  se basa en los siguientes principios:

- Los rayos cósmicos colisionan con los átomos de  $^{14}\text{N}$  de la atmósfera y los convierte en  $^{14}\text{C}$  radioactivo, que se combina con el oxígeno para formar  $\text{CO}_2$  radioactivo.



- Los seres vivos se encuentran en equilibrio con la atmósfera y el  $\text{CO}_2$  radioactivo es absorbido y utilizado por las plantas. Así entra en la cadena alimenticia y en el ciclo vital del carbono.
- Todos los seres vivos contienen una proporción  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  constante (uno por cada billón).

- Al morir, cesa la incorporación de  $^{14}\text{C}$  y los átomos de  $^{14}\text{C}$  que contenga el organismo empiezan a transformarse en  $^{14}\text{N}$  sin ser reemplazado por nuevos átomos de  $^{14}\text{C}$ .
- El fundamento para datar un fósil se basa en el cambio producido en la proporción  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ .
- La vida media del  $^{14}\text{C}$  es tan corta (5730 años) que este método sólo se puede aplicar a materiales biológicos que tengan una antigüedad menor de 60.000 años. Se usa mucho en Arqueología. Sirve para datar la época del Pleistoceno (Edad de Hielo).
- Se supone que la tasa de producción de  $^{14}\text{C}$  (es decir, de la cantidad de rayos cósmicos que llegan a la Tierra) ha sido constante durante los últimos 60.000 años.



**Figura 19.** Esquemas para la presentación Power Point sobre la datación por  $^{14}\text{C}$ .  
 Reproducido de <http://www.ehu.es/biomoleculas/isotopos/carbono14.htm>

**b) Se propondrá la realización del siguiente ejercicio:**

**-Un yacimiento celtíbero**

La actividad del carbono concentrado en seres vivos es de 0,070 mCi/kg debido a la presencia de carbono-14. En el poblado celtíbero de Sorbán, en las proximidades de Calahorra, se ha encontrado huesos cuya actividad es de 0,048 mCi/kg. El periodo de semidesintegración del carbono-14 es de 5760 años. Calcula el año en que murieron los moradores del poblado.

Utilizando la ley de decaimiento radiactivo:  $A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$   
 $A=0,048 \text{ mCi/kg}$ ;  $A_0=0,070 \text{ mCi/kg}$

Y sabiendo que 
$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}} \rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

Obtenemos que los moradores del poblado murieron hace 3135 años.

### **-A orillas del Iregua**

En una excavación realizada en la ribera del río Iregua con motivo de las obras del Hospital de Logroño, se encontró un objeto de madera. Para determinar el tiempo transcurrido desde que fue manufacturado, se tomó una muestra y se observó, mediante un contador, que 1,00 g de carbono-14 se desintegra a razón de 350 núcleos cada 30 min. Se sabe que en 1,00 g de carbono-14, contenido en la celulosa de un árbol vivo o recién cortado, se desintegran 18 núcleos por minuto. El periodo de semidesintegración del carbono-14 es de 5760 años. Calcula la edad del objeto de madera.

Utilizando la ley de decaimiento radiactivo:  $A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$   
 $A = 11,67$  núcleos/min;  $A_0 = 18$  núcleos/min

Y sabiendo que 
$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}} \rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

Obtenemos que la edad del objeto de madera es de 3601 años

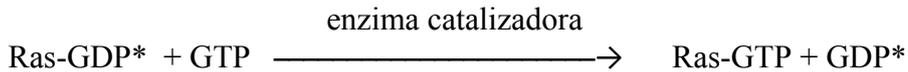
### **6.3. Descripción de la actividad de seguimiento del curso de una reacción bioquímica**

#### **a) En primer lugar, se hará una introducción a esta actividad:**

Una de las aplicaciones de la radiactividad es el estudio de las reacciones bioquímicas. Con el uso de isótopos como el tritio, carbono-14, fósforo-32, o azufre-35, y de detectores de radiación como contadores Geiger, o contadores de centelleo, se puede seguir la trayectoria de los átomos radiactivos a través de todos los pasos intermedios de un metabolismo, o se puede calcular el rendimiento o estequiometría de una reacción bioquímica. Los isótopos radiactivos pueden ser utilizados como reactivos, de manera que van a “marcar” las moléculas deseadas a estudiar. El tritio produce emisiones beta de baja energía y su detección se realiza mediante contadores de centelleo.

#### **b) Se propondrá la realización del siguiente ejercicio:**

Un estudiante quiere averiguar el rendimiento de intercambio GTP/GDP de la GTPasa Ras. Este mecanismo regula el ciclo celular, por tanto su estudio es muy importante en enfermedades como el cáncer. La reacción bioquímica a estudiar es la siguiente:



La molécula de GDP contiene átomos de  $^3\text{H}$ , por lo que está marcada radiactivamente (\*). Al inicio de la reacción, tenemos 1 mol de proteína Ras unida a GDP radiactivo. La enzima catalizadora desliga el GDP y lo sustituye por GTP. Utilizamos un contador de centelleo para medir la actividad de la proteína Ras al inicio y al final de la reacción. Las medidas se hicieron por triplicado:

Actividad inicial (Bq):	217151,1	Actividad final (Bq):	74288,2
	166760,6		84344,4
	207905,4		50305,5

¿Qué cantidad de GTP se ha ligado a la proteína Ras? El periodo de semidesintegración del  $^3\text{H}$  es 12,32 años (147,84 meses). Si guardamos el reactivo GDP\* en el congelador para repetir el experimento dentro de 1 mes, ¿cuánto habrá caído la actividad de la molécula GDP\*? (dar un porcentaje).

1. Actividad inicial media: 197272 Bq; actividad final media: 69646 Bq. La actividad se ha reducido un 64,7%, por tanto, ese es el porcentaje de Ras-GDP\* que ha desaparecido para dar Ras-GTP. Han reaccionado 0,647 moles de Ras-GDP\* con 0,647 moles de GTP. Se ha incorporado 0,647 moles de GTP.

2. Utilizando la ley de decaimiento radiactivo:  $A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$

Sabemos que  $\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}} \rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$

Tomando la actividad inicial como 100,  $T_{1/2}=147,84$  meses (de donde sacamos  $\lambda$ ), y  $t=1$  mes, obtenemos que  $A = A_0 \cdot 99,5$

Luego la actividad se ha reducido tan sólo un 0,05%.

#### 6.4. Reactor de Fukushima y problemática de la energía nuclear

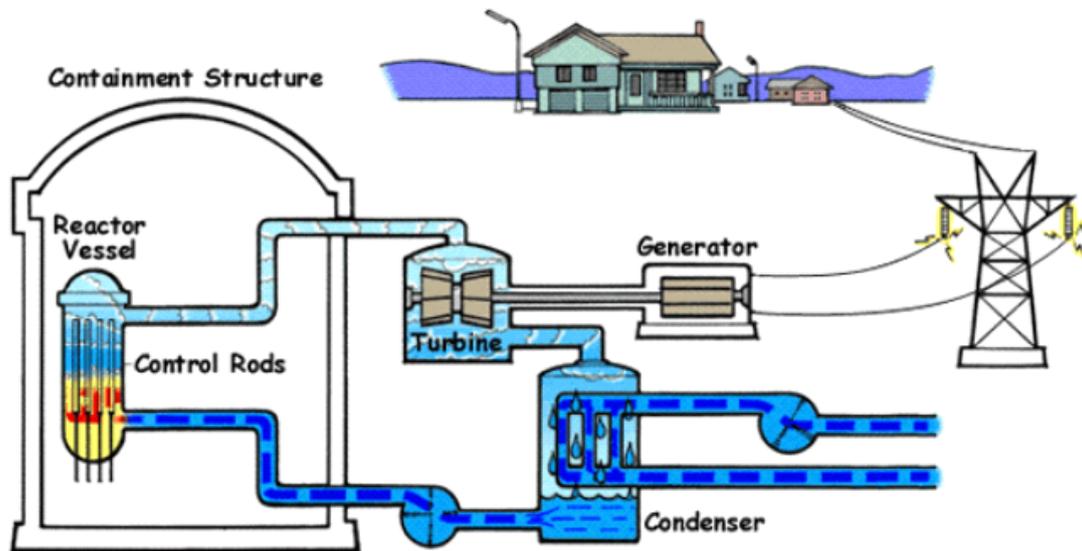
1. Recopilación de información sobre el reactor de Fukushima y el accidente nuclear de 2011.

Utilizaremos un esquema del reactor de Fukushima (reactor de agua a presión) para explicar el funcionamiento de un reactor (figura 20).

Explicaremos, basándonos en el esquema, cómo sucedió el accidente nuclear:

Cuando ocurrió el terremoto, los sistemas de alerta temprana de Fukushima bajaron las varillas de circonio para moderar la reacción. Sin embargo, el problema fue que fallaron los sistemas de alimentación eléctrica de emergencia debido al terremoto, y el agua dejó de circular. Dentro de tres reactores de la zona, el agua estancada empezó a recalentarse, convirtiendo el núcleo de estos en una caldera con mezcla de líquido y vapor a alta presión, superando en un 50% la presión de diseño.

Los reactores están rodeados de paredes de dos metros de espesor, que pueden aguantar el impacto de un avión, pero eso no significa que sean infinitamente fuertes. Si la mezcla líquido-vapor del interior supera una determinada presión, efectivamente podría destruir las paredes, constituyendo una catástrofe (lo que llamamos una fusión del núcleo, como ocurrió en Chernobyl).



**Figura 20.** Esquema del reactor de Fukushima (reactor de agua a presión).  
Wikimedia commons

Sin embargo, antes de que eso ocurriera, los operadores procedieron a liberar parte de la mezcla líquido-vapor, como ocurre al purgar una olla a presión. Este vapor es radioactivo, pero no tiene componentes realmente peligrosos. Cuando se abrió el reactor 3 en Fukushima para aliviar la presión, no sólo salió vapor de agua con isótopos levemente radioactivos, sino que salió mucho hidrógeno (altamente inflamable), por la descomposición del agua a las altas temperaturas generadas. La liberación de presión en el núcleo del reactor fue tan violenta, que generó una gran explosión. Las explosiones destruyeron el revestimiento superior de los edificios que albergaban los reactores 1,3 y 4 y el tanque de contención en el interior del reactor 2. Los tres reactores activos en el momento de la catástrofe sufrieron la fusión del núcleo: por el calentamiento, el combustible pasa de sólido a líquido, y consecuentemente puede expulsar gran cantidad de materiales radiactivos al medio ambiente o filtrarse al subsuelo, así como producir la destrucción del reactor.

Mediante presentación Power Point, se mostrarán imágenes del accidente nuclear de Fukushima y los efectos de otros accidentes y guerras nucleares (figuras 21, 22 y 23).



**Figura 21.** Imagen de Satélite el 16 de marzo de 2011, 5 días después del terremoto, de los cuatro edificios del reactor dañado. Reproducido de: [http://es.wikipedia.org/wiki/Accidente\\_nuclear\\_de\\_Fukushima\\_I](http://es.wikipedia.org/wiki/Accidente_nuclear_de_Fukushima_I). Creative Commons CC BY-SA 3.0



**Figura 22.** Planta de Fukushima tras el terremoto y tsunami. Reproducido de: <https://www.agenciasinc.es/Entrevistas/El-accidente-nuclear-de-Fukushima-no-tendra-repercusiones-para-la-salud-fuera-de-esa-region>. Creative commons



**Figura 23.** Imagen que muestra como quedó la ciudad de Hiroshima tras la bomba nuclear de 1945 lanzada por Estados Unidos. Reproducido de: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=25617>

## 2. Elaboración de un esquema para el debate

- discutir las ventajas de la energía nuclear frente a otras fuentes de energía, renovables o no renovables.
- discutir qué medidas podrían tomarse para hacer más segura la energía nuclear.
- discutir si merece la pena “asumir el riesgo” de la energía nuclear, o debería desaparecer por el peligro de los accidentes nucleares.
- discutir los avances tecnológicos y científicos que ha permitido la radiactividad, en contraposición con la amenaza que supone su uso como arma. ¿Qué medidas podrían tomarse para evitar su uso con fines bélicos?

## 7. EVALUACIÓN DE LA ENSEÑANZA Y DEL APRENDIZAJE DE LOS ALUMNOS

A la hora de evaluar, podemos tener en cuenta diferentes áreas de evaluación:

1. Cómo ha sido la participación de los alumnos y su actitud hacia las prácticas y actividades propuestas (han mostrado compromiso, iniciativa, colaboración...). Esta valoración se realizará mediante observación de los alumnos, y es la parte más subjetiva, por lo que no tendrá mucho peso para la calificación final del alumno, pero servirá al profesor para indagar sobre la idoneidad de los métodos propuestos.

2. Analizar la comprensión e integración de conceptos, el pensamiento crítico, y si los alumnos son capaces de aplicar los conocimientos adquiridos. Para ello se realizará, al final del tema, un cuestionario sobre conceptos básicos, y con actividades realizadas en clase.

- Naturaleza de la radiactividad:

- Supón que alguien te da tres galletas radiactivas: una que emite rayos alfa, otra que emite rayos beta y otra que emite rayos gamma. ¿Qué galleta te comerías, cuál sostendrías en la mano y cuál guardarías en el bolsillo? Se supone que pretendes minimizar la cantidad de radiación que recibes.

- Composición del núcleo, defecto de masa y energía de enlace:

- El deuterio es un isótopo del hidrógeno de masa atómica igual a 2,0136 u. Su núcleo está formado por un protón y un neutrón.

- a) Indica el número atómico ( $Z$ ) y el número másico ( $A$ ) del deuterio.

- b) Calcula el defecto de masa del núcleo de deuterio.

- c) Calcula la energía media de enlace (expresada en MeV) por nucleón del deuterio.

Datos: Masa del protón  $m_p=1.0073$  u; Masa del neutrón  $m_n=1.0087$  u; Unidad de masa atómica  $u = 1.67 \cdot 10^{-27}$  kg.

- Calcula la energía de enlace por nucleón del  $^3\text{He}$  y del  $^4\text{He}$ , cuyas masas atómicas son 3,016030 u y 4,002603 u, respectivamente. El número atómico del helio es  $Z = 2$ . ¿Cuál es la energía de enlace del último neutrón del  $^4\text{He}$ ?

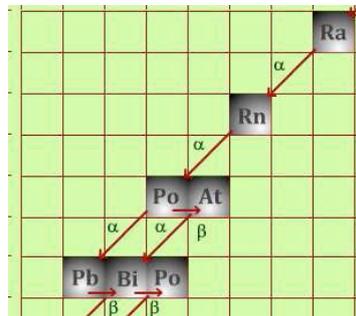
Datos: Masa del protón  $m_p = 1.0073$  u; Masa del neutrón  $m_n = 1.0087$ ;  $(1 \text{ u}) \cdot c^2 = 931,5$  MeV.

• Leyes de los desplazamientos radiactivos:

- a) ¿Qué le ocurre al número atómico de un átomo cuando el núcleo emite una partícula alfa? ¿Y al número másico?

b) ¿Qué le ocurre al número atómico de un átomo cuando el núcleo emite una partícula beta? ¿Y al número másico?

- El radio-226 ( $^{226}_{88}\text{Ra}$ ) se utiliza como agente terapéutico en el tratamiento del cáncer. Pero el radio en sí mismo no es la fuente que produce la radiación útil en este proceso. En realidad son los rayos provenientes del plomo-214 ( $^{214}_{82}\text{Pb}$ ) y del bismuto-214 ( $^{214}_{83}\text{Bi}$ ) los que tienen valor terapéutico. Escribe las reacciones nucleares que van del radio-226 al bismuto-214.



• Ley decaimiento radiactivo:

- El periodo de semidesintegración del polonio-210 es de 138 días.

a) Halla el porcentaje de una muestra de polonio-210 que queda sin desintegrarse al cabo de 199 días.

b) ¿Cuánto tiempo debe transcurrir para que se desintegre el 90% de una muestra de polonio-210?

- En el análisis del agua de un río se ha encontrado que contiene  $1,25 \cdot 10^{17}$  átomos de hidrógeno ordinario por cada átomo de tritio,  $^3_1\text{H}$ . El tritio se descompone radiactivamente con un periodo de semidesintegración de 12,5 años.

a) ¿Cuál será la relación entre los átomos de hidrógeno y los de tritio 50 años después de que se haya tomado la muestra, suponiendo que no se han formado átomos de tritio adicionales?

b) ¿Cuántos átomos de tritio contendrán 10,0 g de agua 25 años después de tomada la muestra?

- Una muestra de un isótopo radiactivo, inmediatamente después de ser extraída del reactor donde se formó, posee una actividad de 230 Bq. Su actividad 1h 45min después resulta ser de 170 Bq.

- a) Calcula la constante de desintegración y el periodo de semidesintegración de la muestra.
- b) ¿Cuántos núcleos radiactivos existían inicialmente en la muestra?

## **8. CONCLUSIONES**

- Las características de la Física nuclear, un tema abstracto y alejado de la experiencia de los alumnos, hacen necesario el desarrollo de estrategias metodológicas para su aprendizaje en el aula de bachillerato.
- La relevancia en nuestras vidas de la Física nuclear, y de la radiactividad en particular, siendo el fundamento de multitud de aplicaciones técnicas y científicas, nos da pie a utilizar este hecho para crear un aprendizaje situado y basado en el contexto.
- Es responsabilidad del docente desarrollar los métodos y estrategias adecuadas para facilitar el aprendizaje autónomo y significativo por parte de los alumnos

## **9. RECOMENDACIONES Y PROPUESTAS DE MEJORA DE LA PROPUESTA PRÁCTICA DESARROLLADA**

- La práctica de detección de la radiactividad podría mejorarse, sobre todo en cuestión de sensibilidad y cuantificación, si el instituto contara con un contador Geiger. Sin embargo, esta no es una situación habitual, y su adquisición representa un problema, ya que estos aparatos son de coste elevado. En la Comunidad Autónoma de La Rioja, la consejería de Educación concede pequeñas subvenciones económicas a los centros que presentan y llevan a cabo proyectos de innovación educativa, que podría utilizarse para adquirir un contador Geiger. La propuesta desarrollada en este trabajo podría ser fundamento de un proyecto de innovación. La propuesta práctica podría llevarse a cabo durante un curso lectivo, tras el cual el profesor puede describir los resultados y conclusiones de su realización, e incluirlos en un proyecto de innovación.
- Un buen complemento para la formación de los alumnos sería organizar una visita a la facultad de Física de la universidad, en colaboración con algún docente de la universidad, que organice una visita a laboratorios donde los alumnos puedan ver mediciones de radiactividad de isótopos radiactivos.

## **10. REFLEXIÓN**

Una de las principales aportaciones del Máster es, desde mi punto de vista, el aprendizaje y la reflexión sobre la innovación educativa.

La innovación educativa engloba todas las actuaciones llevadas a cabo por el docente, y por la institución educativa en su conjunto, que persiguen la mejora de la

educación, lo que debe traducirse en una mejor formación integral de los alumnos. La innovación se basa en la construcción, por parte del docente, de modelos y métodos didácticos, en la identificación de las prácticas más formativas, y en el trabajo colaborativo por parte de los docentes para crear un clima de innovación en la escuela.

Sin embargo, la innovación educativa y la investigación docente no deben entenderse como algo meramente teórico y sobre el papel. Ambas, innovación e investigación, son inherentes a la función y al trabajo de un docente. El profesor debe, como parte de su trabajo, identificar en cada momento los problemas que plantea la enseñanza de los contenidos en cada grupo en particular, y utilizar todo tipo de recursos didácticos para mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje; analizar los resultados, y trabajar en la búsqueda y creación de nuevos recursos.

La propuesta de trabajo presentada en este Trabajo Fin de Máster es una representación de lo que consiste el trabajo docente y la innovación educativa, inherente a éste. En primer lugar, el profesor debe manejar los contenidos y conocimientos a un nivel mucho más superior que el nivel de bachillerato; sólo así se consiguen los recursos y soltura necesarios para explicar los contenidos a ese nivel, y sin duda otorga un liderazgo al profesor, clave para establecer un adecuado clima en el aula. En segundo lugar, el profesor debe, en todo momento, adaptar los conocimientos que maneja a nivel superior, al nivel que debe impartir en el aula. En tercer lugar, debe identificar los problemas que puede acarrear el aprendizaje de esos contenidos, y desarrollar soluciones y propuestas para mejorar el proceso de aprendizaje. Este Trabajo Fin de Máster ha consistido, en síntesis, en el desarrollo de todos estos puntos.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- Díaz Barriga, F. (2003). Cognición situada y estrategias para el aprendizaje significativo. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 5 (2).

-Falk, J. H., & Dierking, L. D. (1992) *The museum experience*. Washington, DC: Whalesback Books.

-Falk, J. H., & Dierking, L. D. (2000). *Learning from museums: Visitor experiences and the making of meaning*. Walnut Creek, CA: AltaMira.

- ronalypsicooi.wikispaces.com/file/view/Bandura-situado.doc

### • **Fundamentos teóricos a nivel universitario:**

- Asignatura de Radioquímica de la Licenciatura en Química (curso 2003/04). Departamento de Química, área de Química Física. Universidad de La Rioja.

- M. Alonso y E.J. Finn, “Física, Vol III (Fundamentos Cuánticos y Estadísticos)”, Fondo Educativo Interamericano (Barcelona, 1971).

- W.E. Burcham, “Física nuclear”, Ed. Reverté S.A. (Madrid, 1974).

- W.D. Ehmann and D.E. Vance, “Radiochemistry and nuclear methods of analysis”, John Wiley & Sons, Inc. (New York, 1991).

- G. Friedlander, J.W. Kennedy, E.S. Macías and J.M. Miller, “Nuclear and Radiochemistry”, John Wiley & Sons, Inc. (New York, 1981).

- H. Semat, “Física atómica y nuclear”, Ed. Aguilar (Madrid, 1971).

- J. Stein, “Isótopos radiactivos”, Ed. Alhambra (Madrid, 1973)

### Webgrafía:

- <http://www.escritoscientificos.es/trab1a20/carpetas/nuclear/nu03.htm>

- <https://fisica2spp.wikispaces.com/UNIDAD+VII>

- [www.cin.edu.uy/archivos/CBMRI/nucleo\\_atómico\\_y\\_modos\\_de\\_decaimiento.ppt](http://www.cin.edu.uy/archivos/CBMRI/nucleo_atómico_y_modos_de_decaimiento.ppt)

- [http://www.uco.es/~fa1orgim/fisica/archivos/Radiaciones/ER\\$G02.pdf](http://www.uco.es/~fa1orgim/fisica/archivos/Radiaciones/ER$G02.pdf)

- [http://www.uco.es/~fa1orgim/fisica/archivos/Radiaciones/ER\\$G03.pdf](http://www.uco.es/~fa1orgim/fisica/archivos/Radiaciones/ER$G03.pdf)

- [http://www2.fisica.unlp.edu.ar/~pasquevi/Home/Teaching/El\\_nucleo\\_y\\_sus\\_radiaciones\\_2011/Clase\\_11-2011/Clase\\_11.pdf](http://www2.fisica.unlp.edu.ar/~pasquevi/Home/Teaching/El_nucleo_y_sus_radiaciones_2011/Clase_11-2011/Clase_11.pdf)

- <http://www.foronuclear.org/es/tags/reacci%C3%B3n-nuclear>

- <http://nuclear.fis.ucm.es/FNYP-C/fision-fusion.pdf>
- <http://www.eweb.unex.es/eweb/fisteor/vicente/fisicaII/tema7bis.pdf>

**• Referencia al ámbito de la Física y la Química y al contexto de la Educación Secundaria:**

- C. Lara, J. Puente, N. Romo, “Física 2º Bachillerato”, Ed. SM (Madrid 1997)
- A. Peña y J.A. García, “Física 2 Bachillerato”, Ed Mac Graw Hill (Madrid 2009)
- Real Decreto 1467/2007 por el que se establece la estructura del bachillerato y se fijan sus enseñanzas mínimas. BOE 266 (6 Noviembre 2007): 45381-45477.
- Decreto 45/2008 por el que se establece el currículo de bachillerato de la Comunidad Autónoma de La Rioja. BOR 88 (3 Julio 2008): 4699
- Programación General Anual de Física y Química (Bachillerato) del IES Práxedes Mateo Sagasta de Logroño. [http://www.iessagasta.edurioja.org/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=77](http://www.iessagasta.edurioja.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=77)

**Webgrafía:**

- <http://cuentos-cuanticos.com/2011/11/03/destrozando-nucleos-la-fision>
- <http://cuentos-cuanticos.com/2011/11/03/entendiendo-el-nucleo-atomico>
- Colegio de Bachilleres. Química II. <http://www.cobachsonora.net/materiales/s1/quimica1/pdf/QUIMICA%202.pdf>

**• Planificación de la enseñanza-aprendizaje, metodología y estrategias, diseño de recursos y materiales, evaluación:**

- Vadym Pazyi, Oscar Rodríguez y José Luis Contreras González. “Midiendo la Radioactividad con un Electroscopio casero.” <http://www.i-cpan.es/concurso/ganadores/71MidiendoRadioactividad.pdf>
- Francisco Barradas-Solas. “La cámara de niebla: Partículas de verdad”. <http://www.i-cpan.es/concurso/ganadores/55CamaraNiebla.pdf>
- Darwish Al-Azmi *et al* (2012). “Radon adsorbed in activated charcoal—a simple and safe radiation source for teaching practical radioactivity in schools and colleges.” *Phys. Educ.* 47 471 doi:10.1088/0031-9120/47/4/471.

Webgrafia:

- Física de partículas en el instituto. Una guía práctica. <http://www.educa2.madrid.org/web/fbarradas/en-el-laboratorio>
- Teaching advanced Physics. Episode 509: Radioactive background and detectors. Episode 509-3: Radiation in dust. [http://tap.iop.org/atoms/radioactivity/509/page\\_47071.html](http://tap.iop.org/atoms/radioactivity/509/page_47071.html).
- Surveys of measuring radioactivity with Tastrak. <http://www.camplin.talktalk.net/Tastrak/TNotes/Chap4.htm>
- <http://www.veoverde.com/2011/03/como-funciona-un-reactor-nuclear-y-que-pasa-en-fukushima/>
- <http://www.ehu.es/biomoleculas/isotopos/carbono14.htm>
- <http://www.scienceinschool.org/2010/issue14/radon/spanish>