

# ÍNDICE

<i>Prólogo</i> .....	13
<b>Tema 1. Radiactividad. Introducción histórica</b> .....	15
Introducción .....	17
1.1. Descubrimiento de la radiactividad .....	17
1.2. Caracterización de la radiación .....	19
1.3. Teoría de las transformaciones radiactivas .....	22
1.4. Elementos estables e inestables. La radiactividad en la naturaleza .....	23
<i>Ejercicios de autoevaluación</i> .....	25
<b>Tema 2. El núcleo atómico. Estabilidad nuclear</b> .....	27
Introducción .....	29
2.1. El núcleo atómico .....	29
2.2. Composición del núcleo .....	30
2.3. Propiedades del núcleo atómico .....	32
2.3.1. Masa nuclear .....	32
2.3.2. Radio .....	33
2.3.3. Carga .....	34
2.3.4. Momento angular .....	35
2.3.5. Momento magnético .....	35
2.3.6. Momento cuadripolar .....	36
2.3.7. Desintegración radiactiva .....	36
2.4. Núclidos y sus clases .....	37
2.5. Isótopos y tablas de núclidos .....	37
2.6. Abundancia isotópica .....	39
2.7. Métodos de separación de isótopos .....	39
2.7.1. Factor de separación .....	40
2.7.2. Difusión gaseosa .....	40
2.7.3. Separación electromagnética .....	41
2.7.4. Intercambio químico .....	41

2.8. Estabilidad nuclear .....	42
2.9. Energía de enlace nuclear .....	45
2.10. Modelos nucleares .....	48
2.10.1. Modelo de la gota líquida .....	49
2.10.2. Modelo nuclear de capas .....	51
2.10.3. Modelo colectivo .....	51
2.10.4. Modelo unificado .....	52
<i>Ejercicios de autoevaluación</i> .....	53
<b>Tema 3. Desintegración radiactiva</b> .....	55
Introducción .....	57
3.1. Ley de la desintegración radiactiva .....	57
3.2. Periodo de semidesintegración .....	59
3.2.1. Determinación gráfica de periodos .....	60
3.3. Vida media .....	61
3.4. Actividad y actividad específica .....	62
3.4.1. Actividad absoluta y relativa .....	63
3.4.2. Unidades de actividad .....	64
3.5. Desintegración de una mezcla de radionúclidos .....	66
3.5.1. Mezcla de radionúclidos sin relación genética .....	66
3.5.2. Mezcla de radionúclidos con relación genética. Equilibrio radiactivo .....	67
3.6. Desintegración ramificada .....	74
3.7. Desintegraciones sucesivas .....	74
<i>Ejercicios de autoevaluación</i> .....	76
<b>Tema 4. Formas de desintegración</b> .....	77
Introducción .....	79
4.1. Formas de desintegración radiactiva .....	79
4.1.1. Esquema de desintegración .....	80
4.2. Desintegración alfa .....	81
4.3. Desintegración beta y captura electrónica .....	83
4.4. Emisión de radiación gamma .....	85
4.5. Curvas de estabilidad $\beta$ .....	86
<i>Ejercicios de autoevaluación</i> .....	89

<b>Tema 5. Radiactividad natural y artificial</b> .....	91
Introducción .....	93
5.1. Radiactividad natural y artificial .....	93
5.2. Radionúclidos cosmogénicos .....	94
5.3. Radionúclidos primordiales .....	97
5.3.1. Series radiactivas naturales.....	97
5.3.2. Radionúclidos naturales que no forman series .....	102
5.4. Radiactividad artificial.....	103
<i>Ejercicios de autoevaluación</i> .....	105
<b>Tema 6. La radiación y la materia</b> .....	107
Introducción .....	109
6.1. La radiación y la materia.....	109
6.1.1. Ionización .....	110
6.1.2. Excitación .....	111
6.1.3. Radiación de frenado .....	111
6.1.4. Poder de frenado y alcance .....	112
6.2. Interacción de las partículas alfa con la materia .....	113
6.2.1. Ionización .....	113
6.2.2. Alcance .....	114
6.2.3. Poder de frenado .....	117
6.2.4. Autoabsorción .....	117
6.3. Interacción de las partículas beta con la materia .....	118
6.3.1. Ionización .....	118
6.3.2. Alcance .....	118
6.3.3. Poder de frenado .....	120
6.3.4. Autoabsorción.....	121
6.3.5. Retrodispersión .....	121
6.3.6. Aniquilamiento del positrón .....	122
6.3.7. Radiación de Cerenkov .....	122
6.4. Interacción de la radiación gamma con la materia.....	123
6.4.1. Efecto fotoeléctrico .....	123
6.4.2. Efecto Compton .....	124
6.4.3. Producción de pares electrón-positrón .....	126
6.4.4. Ley exponencial de atenuación. Espesor de semirreducción ...	127
<i>Ejercicios de autoevaluación</i> .....	130

<b>Tema 7. Reacciones nucleares</b> .....	131
Introducción .....	133
7.1. Generalidades .....	134
7.1.1. Tipos de reacciones nucleares .....	136
7.2. Ley de conservación de la energía, balance energético .....	138
7.3. Introducción al concepto de sección eficaz en reacciones nucleares ..	140
7.4. Reacciones nucleares .....	142
7.5. Reacciones nucleares con partículas cargadas .....	143
7.5.1. Reacciones con partículas alfa .....	144
7.5.2. Reacciones con protones y deuterones .....	146
7.6. Reacciones con neutrones .....	149
7.7. Fisión nuclear .....	153
7.7.1. Reacciones de fisión nuclear .....	153
7.7.2. Productos de fisión .....	156
7.7.3. Neutrones de fisión .....	157
7.7.4. Energía liberada en la fisión .....	159
7.7.5. Reacción en cadena .....	162
7.7.6. El reactor nuclear .....	164
7.8. Fusión nuclear .....	165
<i>Ejercicios de autoevaluación</i> .....	169
<b>Tema 8. Técnicas para la detección y medida de las radiaciones</b> .....	171
Introducción .....	173
8.1. Detectores de las radiaciones nucleares .....	173
8.2. Detectores de huellas nucleares .....	174
8.2.1. Emulsiones fotográficas .....	175
8.2.2. Cámara de niebla .....	175
8.2.3. Cámara de burbujas .....	176
8.2.4. Detectores de huellas nucleares en sólidos .....	176
8.3. Detectores de ionización gaseosa .....	177
8.3.1. Cámara de ionización .....	179
8.3.2. Contadores proporcionales .....	180
8.3.3. Contadores Geiger-Müller .....	181
8.4. Detectores de centelleo .....	182
8.5. Detectores de semiconductor .....	184
8.6. Medida de la radiactividad de una muestra .....	186

8.6.1. Medida de la actividad de una muestra radiactiva .....	186
8.6.2. Equipo de medida .....	187
8.6.3. Factores que afectan a la medida de la actividad .....	189
8.7. Error estadístico en las medidas en radiactividad .....	190
<i>Ejercicios de autoevaluación</i> .....	195
<b>Tema 9. Magnitudes y unidades radiológicas. Protección radiológica ...</b>	<b>197</b>
Introducción .....	199
9.1. Dosimetría de la radiación. Unidades .....	200
9.1.1. Dosis absorbida .....	200
9.1.2. Dosis equivalente y factor de ponderación .....	201
9.1.3. Dosis efectiva .....	202
9.2. Protección radiológica. Límites de dosis .....	202
9.3. Técnicas de protección radiológica .....	204
9.3.1. Técnicas de protección contra la radiación externa .....	205
9.3.2. Protección contra la radiación interna .....	207
9.4. Recomendaciones de seguridad. Control de la contaminación en el laboratorio .....	209
9.5. Dosímetros y monitores .....	212
9.6. Residuos radiactivos .....	213
9.6.1. Clasificación de los residuos radiactivos .....	215
9.6.2. Gestión de los residuos radiactivos .....	216
<i>Ejercicios de autoevaluación</i> .....	219
<b>Tema 10. Aplicaciones de los radioisótopos .....</b>	<b>221</b>
Introducción .....	223
10.1. Generalidades .....	223
10.2. Aplicaciones en la industria .....	225
10.2.1. Aplicaciones basadas en la interacción de la materia sobre la radiación .....	226
10.2.2. Aplicaciones basadas en la interacción de las radiaciones sobre la materia .....	231
10.2.3. Aplicaciones basadas en el uso de los radioisótopos como trazadores .....	233
10.3. Aplicaciones en la agricultura .....	236
10.4. Aplicaciones en la arqueología y geología .....	241

10.5. Aplicaciones en la metalurgia .....	247
10.6. Aplicaciones en medicina .....	248
10.6.1. Aplicaciones diagnósticas .....	249
10.6.2. Aplicaciones terapéuticas .....	252
10.7. Aplicaciones en química .....	254
10.7.1. Estudios cinéticos .....	255
10.7.2. Mecanismos de reacción .....	256
10.7.3. Otras aplicaciones .....	257
<i>Ejercicios de autoevaluación</i> .....	258
<b>Anexo I:</b> Respuestas a los ejercicios de autoevaluación .....	259
<b>Anexo II</b> Principales constantes fundamentales.....	273
Prefijos del Sistema Internacional .....	274
<b>Anexo III:</b> Unidades básicas del Sistema Internacional.....	275
Unidades más utilizadas y equivalencias con el Sistema Internacional .....	275
<b>Anexo IV:</b> Series de desintegración del Torio, $A = 4n$ .....	277
Series de desintegración del Uranio, $A = 4n + 2$ .....	278
Series de desintegración del Actinio, $A = 4n + 3$ .....	279
Series de desintegración del Neptunio, $A = 4n + 1$ .....	280
<b>Anexo V:</b> Características de algunos radionúclidos de interés por sus aplicaciones .....	281
<b>Bibliografía</b> .....	283
<b>Webgrafía</b> .....	285
<b>Glosario</b> .....	289
<b>Índice analítico</b> .....	295
<b>Tabla de masas atómicas</b> .....	307
<b>Tabla periódica</b> .....	309

Tema 1  
**Radiactividad.**  
Introducción histórica

Introducción

- 1.1. Descubrimiento de la radiactividad
- 1.2. Caracterización de la radiación
- 1.3. Teoría de las transformaciones radiactivas
- 1.4. Elementos estables e inestables. La radiactividad en la naturaleza

Ejercicios de autoevaluación

## **Objetivos**

- Conocer cómo se descubrió la radiactividad.
- Definir el fenómeno de la radiactividad.
- Conocer la composición de la radiación.
- Deducir las propiedades de las distintas radiaciones.
- Exponer las leyes que rigen las transformaciones radiactivas.
- Conocer las sustancias radiactivas que se encuentran en la tierra y en la atmósfera.



## INTRODUCCIÓN

En este primer tema del programa de la asignatura se hace una breve reseña histórica sobre cómo tuvo lugar el descubrimiento de la radiactividad y el proceso de caracterización de la radiación, así como de las propiedades de los distintos componentes de la misma.

A continuación se expone la teoría que explica el fenómeno de la radiactividad y se presentan algunas sustancias radiactivas que se encuentran en la naturaleza.

En temas posteriores se profundizará en el conocimiento de los distintos tipos de radiación, sus propiedades y las leyes que rigen los procesos de las transformaciones radiactivas.

### 1.1. DESCUBRIMIENTO DE LA RADIATIVIDAD

En 1896, H. Becquerel, Figura 1.1, estaba estudiando la fluorescencia de unas sales de uranio, para ver si existía alguna relación entre los rayos X, descubiertos el año anterior, y la fluorescencia de las mencionadas sales cuando se exponían a la luz solar. H. Becquerel colocó unos cristales de una sal doble de sulfato de uranilo y potasio [ $\text{K}_2\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ], sobre unas placas fotográficas envueltas en papel negro, exponiéndolas a continuación a la luz solar, encontrando, al revelar las placas, unas manchas oscuras poco intensas, lo que quería decir que la sal de uranio, al someterse a los rayos del sol, emitía una radiación capaz de atravesar el papel negro, y pensó que se trataba de rayos X. Sin embargo, cuando se disponía a repetir el experimento, al ver que estaba nublado, metió las sales de uranio sobre las placas, envueltas en papel negro como antes, en un cajón, encontrando al cabo de tres días, al comprobar el estado de las placas, que éstas habían sufrido un ennegrecimiento intenso, que al

producirse en ausencia de luz, le llevó a deducir que las sales de uranio habían producido espontáneamente una radiación. Esta radiación se llamó primero rayos de uranio o rayos Becquerel, pero posteriormente se llamó radiación radiactiva o simplemente radiactividad. Dicha radiación podía descargar un electroscopio, por lo que concluyó que era similar a los rayos X.

Después del descubrimiento de H. Becquerel de la radiactividad natural, Marie Curie, Figura 1.2, una estudiante de su laboratorio, probó que la intensidad de la radiación emitida, por unidad de masa, era proporcional al porcentaje de uranio presente en el compuesto, demostrando que los compuestos de uranio y de torio, independientemente de la composición química de sus sales, producían radiación ionizante.



**Figura 1.1.** Henri Becquerel.



**Figura 1.2.** Marie Curie.

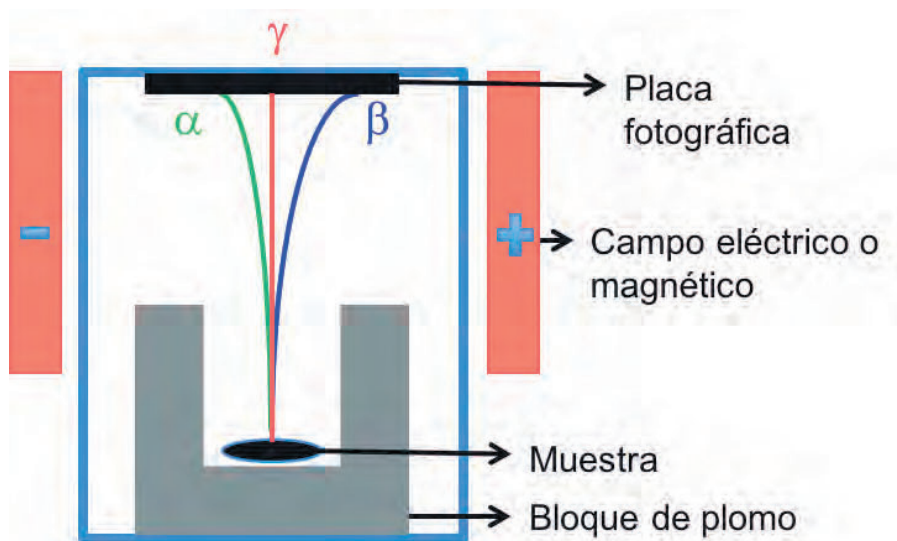
La conclusión de Pierre y Marie Curie fue que la radiación del uranio, y del torio, era un fenómeno característico de estos elementos, y no estaba relacionado con su estado físico o químico, introduciendo el término *radiactividad* para denominarlo.

Posteriormente, los esposos Curie en 1898, estudiando el mineral de uranio llamado pechblenda ( $U_3O_8$ ), encontraron que producía más radiación que los compuestos de uranio puro, por lo que supusieron que debía contener elementos más activos que el uranio. Tratando pechblenda lograron aislar primero una sustancia con una actividad 400 veces superior a la del uranio, a la que dieron el nombre de polonio, y posteriormente, en el mismo año, junto con G. Bémont, aislaron otra sustancia radiactiva que llamaron radio.

Hay que tener en cuenta que la pechblenda contiene, aproximadamente, 0,2 g de radio y  $4 \cdot 10^{-5}$  g de polonio por tonelada. Los Curie, para probar que el polonio y el radio eran dos elementos nuevos, trataron más de una tonelada de pechblenda para llegar a separar finalmente, en 1902, 0,1 g de cloruro de radio puro.

## 1.2. CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN

En 1899 E. Rutherford inició el estudio de las propiedades de la radiación emitida por sustancias radiactivas. Midiendo su absorción por hojas metálicas, y sometiéndola a la acción de campos eléctricos y magnéticos, encontró que estaba formada por tres componentes que se denominaron: radiación  $\alpha$ , radiación  $\beta$  y radiación  $\gamma$ . En la Figura 1.3 se muestra el experimento para identificar los tres tipos de radiación.



**Figura 1.3.** Radiaciones emitidas por una sustancia radiactiva.

El experimento consiste en colocar una pequeña cantidad de una sustancia radiactiva en el hueco realizado en un bloque de plomo situado dentro de una cámara en la que se ha hecho el vacío. La radiación emitida por la sustancia radiactiva, al ser sometida a un campo magnético perpendicular a la dirección de propagación, se desdobla, produciéndose la impresión de una placa fotográfica situada a cierta distancia del bloque de plomo. De esta forma se confirmó que la radiación estaba forma-

da por tres tipos diferentes de radiación. La radiación desviada hacia la izquierda, constituida por partículas con carga positiva, se llamó radiación  $\alpha$ ; la radiación que resulta desviada hacia la derecha, formada por cargas negativas, se llamó radiación  $\beta$  y la radiación que no se desvía, se llamó radiación  $\gamma$ , de naturaleza eléctrica neutra.

La **radiación  $\alpha$**  está formada por partículas que son fácilmente absorbibles, por ejemplo por una hoja de papel, o por una lámina muy delgada de aluminio, de unas 10 micras. Estas partículas son desviadas muy ligeramente a la izquierda por campos magnéticos, indicando la dirección de la desviación, que se trata de una carga positiva. Efectivamente, se comprobó que la radiación  $\alpha$  consta de núcleos de helio con dos protones y dos neutrones  ${}^4_2\text{He}$ .

La **radiación  $\beta$**  está formada por partículas de masa mucho más pequeña que las partículas  $\alpha$  que se absorben por espesores mayores de láminas de aluminio, aproximadamente cien veces mayor, que en el caso de la radiación  $\alpha$ . Estas partículas son desviadas fácilmente a la derecha por un campo magnético en una dirección que indica que se trata de cargas negativas. Los rayos  $\beta$  están formados por electrones. En la Figura 1.4 se representa las diferentes formas de detener los distintos tipos de radiaciones.

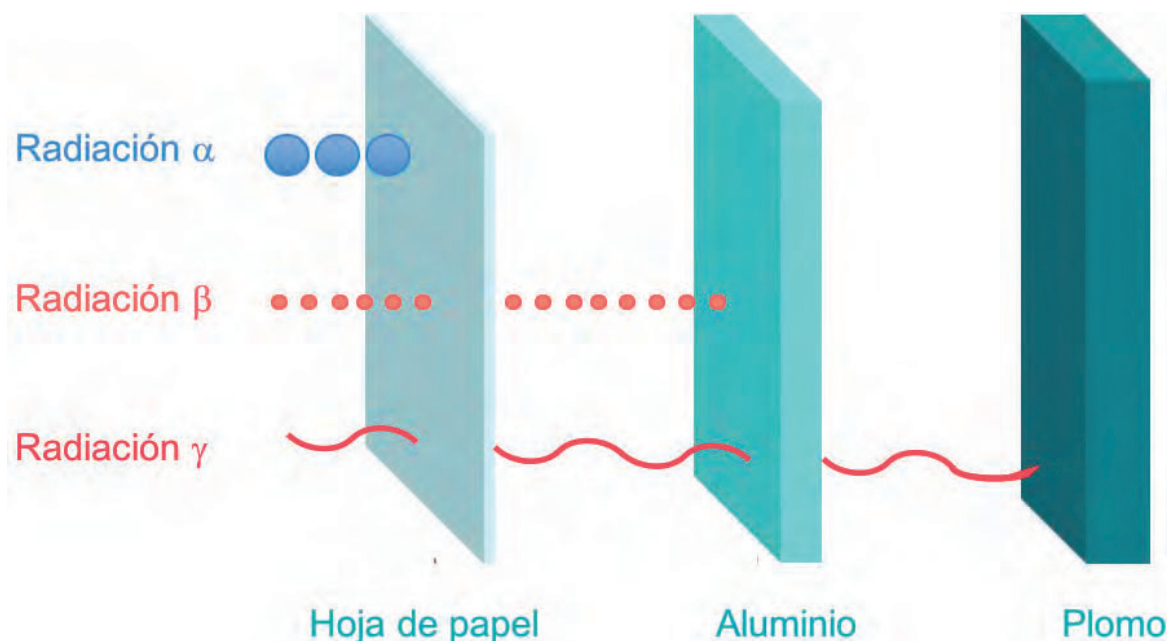


Figura 1.4. Penetración de las radiaciones  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .