

# Índice General

<b>Introducción</b>	<b>11</b>
<b>I Estructura nuclear</b>	<b>17</b>
<b>1 El núcleo atómico. Propiedades físicas</b>	<b>19</b>
Objetivos didácticos específicos . . . . .	20
1.1 Introducción: El núcleo atómico . . . . .	21
1.1.1 Experimentos históricos . . . . .	23
1.2 Tamaño y distribución de carga nuclear. Medida del radio de los núcleos . . . . .	25
1.2.1 Medida del radio de carga de los núcleos . . . . .	27
1.2.2 Distribución de materia (masa) nuclear . . . . .	35
1.3 Masa y abundancia de núclidos . . . . .	35
1.3.1 Unidad de masa atómica . . . . .	36
1.3.2 Medida de masas de núcleos . . . . .	36
1.3.3 Abundancia de núcleos . . . . .	43
1.3.4 Energía de ligadura . . . . .	44
1.3.5 El valle de la estabilidad . . . . .	47
1.3.6 Energía de separación nucleónica . . . . .	48
1.3.7 Fórmula semiempírica de la masa . . . . .	49
1.4 Estabilidad nuclear. Parábola de masas . . . . .	52
1.5 Espín, paridad y momentos electromagnéticos nucleares . . . . .	55
1.5.1 Espín y Paridad nucleares . . . . .	55
1.5.2 Espín isotópico del núcleo . . . . .	57
1.5.3 Momentos electromagnéticos nucleares . . . . .	58
1.6 Estructura de niveles energéticos nucleares . . . . .	62
Glosario de términos clave . . . . .	65
Resumen . . . . .	67

Ejercicios de auto comprobación . . . . .	69
Soluciones a los ejercicios de auto comprobación . . . . .	70
<b>2 La fuerza nuclear: El deuterón. Interacción <math>N - N</math></b>	<b>73</b>
Objetivos didácticos específicos . . . . .	74
2.1 Introducción . . . . .	75
2.2 El deuterón: Propiedades y función de ondas . . . . .	75
2.2.1 Momento dipolar magnético del deuterón . . . . .	78
2.2.2 Momento cuadrupolar eléctrico del deuterón . . . . .	80
2.2.3 Función de ondas radial del deuterón . . . . .	83
2.3 Difusión $N - N$ . Defasajes . . . . .	86
2.3.1 Desarrollo en ondas parciales . . . . .	86
2.3.2 Relación entre defasaje y potencial $V$ . . . . .	87
2.3.3 Aproximación de alcance efectivo . . . . .	88
2.4 Potencial de Yukawa . . . . .	90
2.5 Potencial $N - N$ . . . . .	94
2.5.1 Potencial OPEP . . . . .	96
Glosario de términos clave . . . . .	98
Resumen . . . . .	99
Ejercicios de auto comprobación . . . . .	101
Soluciones a los ejercicios de auto comprobación . . . . .	102
<b>3 Modelos nucleares</b>	<b>105</b>
Objetivos didácticos específicos . . . . .	106
3.1 Introducción . . . . .	107
3.2 Modelos de partícula individual . . . . .	109
3.2.1 Propiedades de los núcleos con $A$ <b>impar</b> . . . . .	109
3.2.2 Modelo de capas . . . . .	109
3.2.3 Modelo de capas esférico . . . . .	111
3.3 Modelos colectivos . . . . .	125
3.3.1 Modelo del gas de Fermi . . . . .	126
3.3.2 Modelo de la gota líquida . . . . .	128
3.3.3 Propiedades colectivas de los núcleos <b>par-par</b> . . . . .	129
3.3.4 Modelo vibracional . . . . .	131
3.3.5 Modelo rotacional . . . . .	138
3.4 Modelo unificado . . . . .	144
3.4.1 Modelo de capas en núcleos deformados . . . . .	144
Glosario de términos clave . . . . .	147

Resumen . . . . .	148
Ejercicios de autocomprobación . . . . .	150
Soluciones a los ejercicios de autocomprobación . . . . .	151

**II Desintegraciones nucleares y radiactividad 155**

**4 Radiactividad y desintegración nuclear 157**

Objetivos didácticos específicos . . . . .	158
4.1 Introducción . . . . .	159
4.1.1 Generalidades . . . . .	159
4.2 Ley de desintegración radiactiva . . . . .	161
4.2.1 Periodos de semidesintegración parciales . . . . .	163
4.3 Teoría cuántica de la desintegración radiactiva . . . . .	166
4.4 Tipos de desintegraciones nucleares. Fuentes radiactivas más comunes . . . . .	167
4.4.1 Desintegración alfa . . . . .	170
4.4.2 Desintegración beta . . . . .	170
4.4.3 Desintegración gamma . . . . .	172
4.4.4 Fisión espontánea . . . . .	173
4.4.5 Emisión de nucleones . . . . .	173
4.5 Series naturales de elementos radiactivos . . . . .	174
4.6 Cadenas radiactivas. Ecuaciones de Bateman . . . . .	174
4.6.1 Aplicaciones del equilibrio radiactivo . . . . .	177
4.7 Radiactividad artificial . . . . .	178
4.8 Datación radiactiva . . . . .	181
4.8.1 Datación por $^{14}\text{C}$ . . . . .	181
4.8.2 Datación geológica . . . . .	181
Glosario de términos clave . . . . .	184
Resumen . . . . .	186
Ejercicios de autocomprobación . . . . .	188
Soluciones a los ejercicios de autocomprobación . . . . .	189

**5 Teoría de la desintegración alfa 195**

Objetivos didácticos específicos . . . . .	196
5.1 Propiedades generales de la desintegración alfa . . . . .	197
5.1.1 Balance energético . . . . .	198
5.1.2 Predicción de $Q$ por la fórmula semiempírica . . . . .	199

5.1.3	Regla de Geiger-Nuttal . . . . .	200
5.2	Modelo de Gamow de la desintegración alfa . . . . .	202
5.2.1	Probabilidad de desintegración alfa . . . . .	204
5.2.2	Emisión de otras partículas o núcleos . . . . .	208
5.3	Espectroscopía alfa y estructura nuclear . . . . .	209
5.4	Reglas de selección: Momento angular y Paridad . . . . .	210
	Glosario de términos clave . . . . .	213
	Resumen . . . . .	214
	Ejercicios de auto comprobación . . . . .	216
	Soluciones a los ejercicios de auto comprobación . . . . .	217
<b>6</b>	<b>Teoría de las desintegraciones beta</b>	<b>221</b>
	Objetivos didácticos específicos . . . . .	222
6.1	Introducción . . . . .	223
6.1.1	Balance energético . . . . .	225
6.2	Teoría de Fermi de la desintegración beta . . . . .	228
6.2.1	Probabilidad de transición . . . . .	228
6.2.2	** Elemento de matriz en la teoría V-A . . . . .	229
6.2.3	Densidad de estados finales . . . . .	232
6.3	Forma del espectro beta . . . . .	234
6.3.1	Predicción de la masa del neutrino . . . . .	234
6.4	** Periodo comparativo y transiciones prohibidas . . . . .	237
6.4.1	Tipos de transiciones y reglas de selección en la desintegración beta nuclear . . . . .	240
6.5	Experimento de Reines y Cowan . . . . .	246
6.6	Violación de la Paridad en la desintegración beta . . . . .	248
6.7	Desintegración doble-beta . . . . .	249
	Glosario de términos clave . . . . .	251
	Resumen . . . . .	252
	Ejercicios de auto comprobación . . . . .	254
	Soluciones a los ejercicios de auto comprobación . . . . .	255
<b>7</b>	<b>Teoría de la desintegración gamma</b>	<b>259</b>
	Objetivos didácticos específicos . . . . .	260
7.1	Introducción . . . . .	261
7.1.1	Desarrollo multipolar . . . . .	263
7.2	Conservación de la energía en las desintegraciones gamma . . . . .	264
7.3	Vidas medias . . . . .	266

7.3.1	Ordenes de magnitud de transiciones gamma multipo- lares . . . . .	266
7.3.2	Regla dorada de Fermi . . . . .	267
7.3.3	Estimadores de Weisskopf . . . . .	269
7.4	Reglas de selección . . . . .	272
7.4.1	Conversión interna . . . . .	275
7.5	Espectroscopia gamma . . . . .	278
7.6	Efecto Mössbauer . . . . .	278
7.6.1	Emisión y absorción de gammas . . . . .	278
7.6.2	Aplicaciones del efecto Mössbauer . . . . .	284
	Glosario de términos clave . . . . .	286
	Resumen . . . . .	287
	Ejercicios de auto comprobación . . . . .	288
	Soluciones a los ejercicios de auto comprobación . . . . .	290

**III Reacciones nucleares 295**

**8 Reacciones Nucleares 297**

	Objetivos didácticos específicos . . . . .	298
8.1	Introducción . . . . .	299
8.2	Leyes de conservación . . . . .	300
8.2.1	Conservación de la energía-momento . . . . .	301
8.2.2	Otras leyes de conservación . . . . .	305
8.3	Secciones eficaces de reacción . . . . .	305
8.4	Tipos de reacciones . . . . .	308
8.4.1	Difusión y absorción nuclear . . . . .	310
8.4.2	Reacciones de núcleo compuesto . . . . .	313
8.4.3	Reacciones directas . . . . .	314
8.5	Modelo óptico . . . . .	316
	Glosario de términos clave . . . . .	318
	Resumen . . . . .	319
	Ejercicios de auto comprobación . . . . .	321
	Soluciones a los ejercicios de auto comprobación . . . . .	322

**9 Procesos de fisión y fusión 325**

	Objetivos didácticos específicos . . . . .	326
9.1	Introducción . . . . .	327

9.2	Fisión Nuclear . . . . .	327
9.2.1	Antecedentes . . . . .	327
9.2.2	Energética . . . . .	328
9.2.3	Modelo de la gota líquida para la fisión . . . . .	329
9.2.4	Características de la reacción de fisión inducida . . . . .	331
9.3	Reacción de fisión controlada . . . . .	335
9.3.1	Tamaño crítico y constante de tiempo . . . . .	339
9.4	Reactores de Fisión . . . . .	341
9.5	Fusión Nuclear . . . . .	343
9.5.1	Procesos básicos de fusión nuclear . . . . .	343
9.5.2	Características de la fusión nuclear . . . . .	345
9.6	Reactores de fusión . . . . .	348
9.6.1	Reacción de fusión controlada. Criterio de Lawson . . . . .	350
9.7	Fusión solar y neutrinos solares . . . . .	351
9.7.1	El Big-Bang. Nucleosíntesis estelar . . . . .	351
9.7.2	Los procesos de fusión en el Sol . . . . .	354
9.7.3	** Los neutrinos solares . . . . .	358
	Glosario de términos clave . . . . .	362
	Resumen . . . . .	363
	Ejercicios de auto comprobación . . . . .	364
	Soluciones a los ejercicios de auto comprobación . . . . .	365

## **IV Interacción de la radiación con la materia 369**

<b>10</b>	<b>Interacción de la Radiación con la Materia</b>	<b>371</b>
	Objetivos didácticos específicos . . . . .	372
10.1	Introducción . . . . .	373
10.2	Interacción de partículas cargadas . . . . .	375
10.2.1	Pérdida de energía por ionización. Fórmula de Bethe-Bloch . . . . .	375
10.2.2	Consecuencias de la fórmula de Bethe-Bloch . . . . .	380
10.2.3	Difusión múltiple o culombiana. Fórmula de Rutherford . . . . .	383
10.3	Interacción de electrones y positrones con la materia . . . . .	385
10.3.1	Pérdida de energía por colisión . . . . .	386
10.3.2	Radiación de frenado . . . . .	386
10.3.3	Aniquilación de positrones . . . . .	390

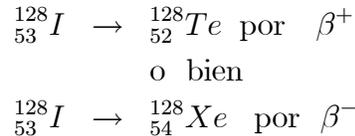
10.3.4	Retrodifusión. Albedo . . . . .	391
10.4	Interacción de fotones con la materia. Fenómenos de Radiación	392
10.4.1	Efecto fotoeléctrico . . . . .	392
10.4.2	Efecto Compton . . . . .	393
10.4.3	Creación de pares . . . . .	396
10.4.4	Atenuación de fotones . . . . .	397
10.5	Efecto Cerenkov . . . . .	399
	Glosario de términos clave . . . . .	401
	Resumen . . . . .	403
	Ejercicios de autocomprobación . . . . .	404
	Soluciones a los ejercicios de autocomprobación . . . . .	405
<b>11</b>	<b>Detectores de Radiaciones Nucleares</b>	<b>409</b>
	Objetivos didácticos específicos . . . . .	410
11.1	Introducción . . . . .	411
11.1.1	Clasificación de los detectores . . . . .	411
11.2	Magnitudes características de los detectores . . . . .	413
11.2.1	Sensibilidad . . . . .	413
11.2.2	Respuesta . . . . .	413
11.2.3	Resolución energética . . . . .	416
11.2.4	Eficiencia . . . . .	418
11.2.5	Tiempo muerto . . . . .	421
11.3	Detectores gaseosos . . . . .	422
11.3.1	** Movimiento de cargas en gases . . . . .	427
11.3.2	** Avalancha . . . . .	427
11.3.3	** Forma del pulso electrónico . . . . .	428
11.4	Detectores de centelleo . . . . .	429
11.4.1	Características generales . . . . .	430
11.4.2	** Tipos de materiales centelleadores . . . . .	431
11.4.3	Respuesta luminosa . . . . .	432
11.4.4	Eficiencia en el transporte de luz . . . . .	432
11.4.5	Fotomultiplicadores (PM) . . . . .	433
11.5	Detectores de estado sólido . . . . .	436
11.5.1	Semiconductores . . . . .	436
11.5.2	La unión $p - n$ como detector . . . . .	437
11.5.3	Potencial de polarización . . . . .	438
11.5.4	Particularidades . . . . .	439
11.6	Detección de partículas neutras . . . . .	439

11.6.1 Detección de Neutrones por Interacción Fuerte . . . . .	440
Glosario de términos clave . . . . .	441
Resumen . . . . .	443
Ejercicios de auto comprobación . . . . .	444
Soluciones a los ejercicios de auto comprobación . . . . .	445
<b>12 Introducción a la Protección Radiológica</b>	<b>447</b>
Objetivos didácticos específicos . . . . .	448
12.1 Introducción . . . . .	449
12.1.1 Bases biológicas . . . . .	450
12.2 Unidades . . . . .	451
12.2.1 Actividad ( $A$ ) . . . . .	451
12.2.2 Exposición $X$ . . . . .	452
12.2.3 Dosis absorbida, $D$ . . . . .	454
12.2.4 El kerma, $K$ . . . . .	455
12.2.5 Dosis equivalente, $H$ . . . . .	456
12.2.6 Tasa de dosis . . . . .	457
12.2.7 Dosis equivalente efectiva . . . . .	458
12.3 Sistema de limitación de dosis . . . . .	459
12.3.1 Justificación . . . . .	459
12.3.2 Optimización . . . . .	460
12.3.3 Limitación de dosis individual . . . . .	461
12.4 Medidas de protección . . . . .	463
12.4.1 Blindajes . . . . .	465
12.5 Ejemplos de dosis . . . . .	467
12.5.1 Radiactividad natural nociva. El radón . . . . .	468
Glosario de términos clave . . . . .	470
Resumen . . . . .	471
Ejercicios de auto comprobación . . . . .	472
Soluciones a los ejercicios de auto comprobación . . . . .	473
<b>Unidades</b>	<b>477</b>
<b>Constantes</b>	<b>478</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>479</b>

11.6.1 Detección de Neutrones por Interacción Fuerte . . . . .	440
Glosario de términos clave . . . . .	441
Resumen . . . . .	443
Ejercicios de autocomprobación . . . . .	444
Soluciones a los ejercicios de autocomprobación . . . . .	445
<b>12 Introducción a la Protección Radiológica</b>	<b>447</b>
Objetivos didácticos específicos . . . . .	448
12.1 Introducción . . . . .	449
12.1.1 Bases biológicas . . . . .	450
12.2 Unidades . . . . .	451
12.2.1 Actividad ( $A$ ) . . . . .	451
12.2.2 Exposición $X$ . . . . .	452
12.2.3 Dosis absorbida, $D$ . . . . .	454
12.2.4 El kerma, $K$ . . . . .	455
12.2.5 Dosis equivalente, $H$ . . . . .	456
12.2.6 Tasa de dosis . . . . .	457
12.2.7 Dosis equivalente efectiva . . . . .	458
12.3 Sistema de limitación de dosis . . . . .	459
12.3.1 Justificación . . . . .	459
12.3.2 Optimización . . . . .	460
12.3.3 Limitación de dosis individual . . . . .	461
12.4 Medidas de protección . . . . .	463
12.4.1 Blindajes . . . . .	465
12.5 Ejemplos de dosis . . . . .	467
12.5.1 Radiactividad natural nociva. El radón . . . . .	468
Glosario de términos clave . . . . .	470
Resumen . . . . .	471
Ejercicios de autocomprobación . . . . .	472
Soluciones a los ejercicios de autocomprobación . . . . .	473
<b>Unidades</b>	<b>477</b>
<b>Constantes</b>	<b>478</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>479</b>

La conclusión más importante es que para los núcleos con  $A$  par pueden darse dos fenómenos que no pueden darse para  $A$  impar:

1. Un mismo núcleo puede desintegrarse de dos formas distintas. Por ejemplo



2. Puede darse el fenómeno de desintegración *doble beta*, es decir, por ejemplo  ${}_{52}^{128}Te \rightarrow {}_{54}^{128}Xe + 2\beta^-$ . La importancia de este proceso es que permite obtener información sobre la naturaleza del neutrino. Para ello, se investiga si existe desintegración doble  $\beta$  con o sin neutrinos, lo que implicaría que los neutrinos son de tipo Dirac o de tipo Majorana, respectivamente.

A la vista de las dos parábolas para los núcleos con  $A$  par, se entiende por qué no existen casi núcleos estables de tipo impar-impar, siempre existen núcleos más estables de tipo par-par y con menor masa.

Para núcleos con  $A$  *par* suele haber 2 isóbaros estables y en ciertos casos hasta 3 (por ejemplo para los núcleos con  $A = 40, 96, 124, 130, 136, 176, 180$ ).

Para núcleos con  $A$  *impar* sólo existe un núcleo estable, que no tendrá desintegración beta (ejemplo, el  ${}_{44}^{101}Ru$ ); pero sucede que si la diferencia de masas es pequeña, la desintegración  $\beta$  es poco probable (ej:  ${}_{49}^{113}In, Cd$ ;  ${}_{50}^{115}Sn, In$ ;  ${}_{51}^{123}Sb, Te$ ).

Se verá más adelante también que para núcleos con  $Z$  elevado, la inestabilidad nuclear es debida a la fuerte repulsión coulombiana. Esto da lugar a la desintegración  $\alpha$ ; además, si  $Z \geq 90$  puede existir fisión espontánea, lo que es explicable por la variación de  $E_B$  con la deformación nuclear.

## 1.5 Espín, paridad y momentos electromagnéticos nucleares

### 1.5.1 Espín y Paridad nucleares

Los núcleos son sistemas cuánticos complejos, compuestos por nucleones (protones y neutrones). Por lo tanto los núcleos tienen espín-paridad  $J^P$  bien

definidos. Si además se supone que los nucleones se mueven en un potencial central, tendrán un momento angular orbital  $\vec{\ell}_i$ ; también habrá que tener en cuenta su espín (o sea, el momento angular intrínseco),  $\vec{s}_i$ , y por lo tanto el momento angular total de cada nucleón será  $\vec{j}_i = \vec{\ell}_i + \vec{s}_i$ . El espín nuclear será la suma

$$\vec{J} = \sum_{i=1}^A \vec{j}_i \quad (1.76)$$

Se cumple por lo tanto que si  $A$  es par,  $\vec{J}$  es entero, y si  $A$  es impar,  $\vec{J}$  es semi-entero.

Todos los estados nucleares (incluyendo el estado fundamental) tienen un momento angular finito. Para especificarlo, se utiliza un vector cuantizado  $\vec{J}$ , que tiene por módulo

$$|J| = \sqrt{J(J+1)}\hbar \quad (1.77)$$

en donde  $J$  es el denominado **espín nuclear** y es un buen número cuántico; es decir, es un número que se conserva en todos los procesos nucleares. Según el principio de incertidumbre,  $J$  es inobservable, pero su componente según un eje de cuantización puede medirse, dando  $m_J\hbar$ , en donde  $m_J$  puede tomar uno de los  $2J+1$  valores comprendidos en el intervalo  $J \geq m_J \geq -J$ .

La paridad  $\mathcal{P}$ , es un operador que transforma la función de ondas (espacial) de un núcleo

$$\mathcal{P}\psi(r_1, r_2, \dots) = \psi(-r_1, -r_2, \dots), \quad (1.78)$$

siendo  $\vec{r}_i$  las coordenadas espaciales de los nucleones. Tiene dos valores propios:  $\pm 1$  ya que  $\mathcal{P}^2 = I$ , es la identidad. Es extremadamente difícil de determinar la paridad de un núcleo a partir de las paridades de los constituyentes. Pero puede obtenerse a partir de las reacciones nucleares en las que intervenga el núcleo, ya que la paridad es un número cuántico que se conserva en las interacciones fuertes ( $[\mathcal{P}, H] = 0$ ). La paridad también se conserva en las interacciones electromagnéticas.

Como el movimiento de un nucleón en un potencial queda caracterizado por un armónico esférico  $Y_{\ell,m}$ , la paridad valdrá  $\mathcal{P} = (-1)^\ell$  ya que

$$Y_{\ell,m}(\theta, \phi) = (-1)^\ell Y_{\ell,m}(\pi - \theta, \phi + \pi) \quad (1.79)$$

que es la operación equivalente a la reflexión espacial:  $\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$ .

Las partículas y núcleos tienen paridad **intrínseca**. Se toma por convenio que la paridad intrínseca del protón y del neutrón son  $\mathcal{P} = +1$ . La paridad

El isospín refleja los estados de carga del sistema. La relación entre el ordinal de carga  $Q$  y la tercera componente del isospín viene dada por la fórmula de Gell-Mann-Nishijima, que fue inicialmente propuesta para las partículas elementales. En el caso de núcleos con  $A$  nucleones se tiene que

$$Q = T_3 + \frac{A}{2} \quad (1.81)$$

que también es válida para los nucleones simplemente escribiendo  $A = 1$ . En física de partículas  $A$  se sustituye por la hipercarga  $Y = B + S$ , suma de dos cargas:  $B$ , el número bariónico, que vale  $B = 1$  para los nucleones y  $S$  la extrañeza, que vale  $S = 0$  para el protón y el neutrón.

### 1.5.3 Momentos electromagnéticos nucleares

Informan sobre la distribución de carga y magnetismo nuclear originado por el movimiento de los constituyentes nucleares en el campo nuclear.

Los momentos electromagnéticos (carga, momento dipolar, etc...) son importantes porque determinan el comportamiento del núcleo (sistema de cargas y espines) en presencia de un campo eléctrico y/o magnético. Se describe a continuación el caso eléctrico.

Sea una distribución de carga  $\rho(r, \theta, \phi)$  en un campo eléctrico  $\mathcal{E}$  no uniforme (según el eje  $z$ ) que deriva de un potencial, cuya forma será (desarrollándola en serie):

$$V = V_0 + (\mathcal{E}_z)_0 z + \frac{1}{4} \left( \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial z} \right) (3z^2 - r^2) + \dots \quad (1.82)$$

La energía  $U$ , debida a la interacción de la distribución de carga con el campo exterior será

$$U = \int \rho V d\tau = V_0 q + (\mathcal{E}_z)_0 d_z + \frac{1}{4} \left( \frac{\partial \mathcal{E}_z}{\partial z} \right) eQ + \dots \quad (1.83)$$

con las definiciones clásicas y sus equivalencias cuánticas siguientes:

	<u>Clásica</u>	<u>Cuántica</u>
Carga	$q = \int \rho d\tau$	$\rightarrow q = Ze$
Momento dipolar	$d_z = \int \rho z d\tau$	$\rightarrow d_z = 0$
Momento cuadrupolar	$eQ = \int \rho (3z^2 - r^2) d\tau$	$\rightarrow eQ = \sum_i \int \Psi^* q_i (3z^2 - r^2) \Psi d\tau$