Partículas elementales

Una vía hacia el cosmos



RAMÓN FERNÁNDEZ ÁLVAREZ-ESTRADA
MARINA RAMÓN MEDRANO

Colaborador:
FELIPE J. LLANES ESTRADA

PIRÁMIDE

Partículas elementales

Una vía hacia el cosmos

RAMÓN FERNÁNDEZ ÁLVAREZ-ESTRADA
MARINA RAMÓN MEDRANO

Colaborador:
FELIPE J. LLANES ESTRADA

Partículas elementales

Una vía hacia el cosmos



EDICIONES PIRÁMIDE

COLECCIÓN «CIENCIA HOY»

Edición en versión digital

Está prohibida la reproducción total o parcial de este libro electrónico, su transmisión, su descarga, su descompilación, su tratamiento informático, su almacenamiento o introducción en cualquier sistema de repositorio y recuperación, en cualquier forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, conocido o por inventar, sin el permiso expreso escrito de los titulares del copyright.

© Ramón Fernández Álvarez-Estrada, Marina Ramón Medrano y Felipe J. Llanes Estrada, 2021
© Primera edición electrónica publicada por Ediciones Pirámide (Grupo Anaya, S. A.), 2021
Para cualquier información pueden dirigirse a piramide_legal@anaya.es
Juan Ignacio Luca de Tena, 15. 28027 Madrid
Teléfono: 91 393 89 89
www.edicionespiramide.es
ISBN digital: 978-84-368-4453-5

ÍNDICE

Prólogo 13

Los símbolos y sus significados 17

1. Aspectos generales de las partículas elementales 19

1.1. Partícula elemental 19
1.1.1. Masa 20
1.1.2. Carga eléctrica 21
1.2. Descubrimientos del electrón, protón y neutrón 21
1.2.1. Electrón (e^-) 22
1.2.2. Protón (p) 23
1.2.3. Neutrón (n) 24
1.3. Fotón y dualidad onda-corpúsculo para la radiación electromagnética 25
1.3.1. Efecto fotoeléctrico 26
1.3.2. Efecto Compton 27
1.3.3. Fotón (γ) y dualidad onda-corpúsculo 27
1.3.4. Interpretación de los efectos fotoeléctrico y Compton como descubrimiento del fotón 28
1.4. Partículas inestables: vida media 29
1.5. Rayos cósmicos: generalidades 31
1.6. Descubrimiento de nuevas partículas en rayos cósmicos 33
1.6.1. Positrón (e^+) 33
1.6.2. Muones (μ^-, μ^+) 34
1.6.3. Piones (π^+, π^-) 34
1.7. Spin 35
1.8. Partículas idénticas: fermiones y bosones 38
1.8.1. Conexión spin-estadística 39
1.9. Antipartículas 39
1.9.1. Antiprotón ($\overline{p}$) y antineutrón ($\overline{n}$) 40

2. Interacciones entre partículas elementales 43

2.1. Interacciones electromagnéticas: el fotón como mediador 43
2.2. Interacciones fuertes 44
2.2.1. Ideas generales 44
2.2.2. Teoría de Yukawa: el pión como mediador 45
2.2.3. Resonancias 47
2.2.4. Partículas extrañas 48
2.3. Interacciones débiles 49
2.3.1. Desintegración β del neutrón: el neutrino 49
2.3.2. Otros procesos de desintegración por interacción débil 51
2.4. Hadrones y leptones 53

3. Fuentes y aceleradores de partículas 55

3.1. Fuentes de partículas para aceleradores 55
3.1.1. Electrones 55
3.1.2. Positrones 55
3.1.3. Protones 56
3.1.4. Antiprotones 56
3.2. Producción de haces de partículas neutras o inestables 56
3.2.1. Neutrones 57
3.2.2. Piones cargados y «fábricas» de piones 58
3.2.3. Kaones 58
3.2.4. Muones 59
3.2.5. Neutrinos 59
3.3. Aceleradores 59
3.3.1. Ciclotrón 60
3.3.2. Aceleradores lineales 62
3.3.3. Sincrotrón 64
3.3.4. Anillos de colisiones y de almacenamiento 65
3.3.5. El LHC del CERN 70

4. La detección de partículas elementales 75

4.1. Detección de partículas cargadas 76
4.1.1. La cámara de niebla 76
4.1.2. La cámara de burbujas 77
4.1.3. Cámaras de chispas, de hilos y de deriva 78
4.1.4. Emulsiones fotográficas nucleares 80
4.1.5. Detector de Cerenkov 80
4.1.6. Detector de centelleo (con tubo fotomultiplicador) 82
4.1.7. Tubo Geiger-Müller 82
4.2. Detección de partículas neutras 83
4.2.1. Detección de fotones 83
4.2.2. Detección de neutrones 85

4.2.3. Detección de neutrinos 85
4.3. Complementos sobre detectores 87

5. Algunas aplicaciones de las partículas elementales a la medicina 91

5.1. Introducción a la radioterapia con partículas elementales 93
5.2. Radiaciones en medios biológicos: algunos conceptos 95
5.3. Efectos de las radiaciones en medios biológicos: algunos resultados importantes 96
5.4. Análisis comparativo de las diversas radiaciones 97
5.5. Radioterapia con protones: otros aspectos 99
5.6. Técnicas para diagnóstico médico. PET (la tomografía de emisión de positrones) 100

6. Leyes de conservación 105

6.1. Leyes de conservación espacio-temporales 106
6.1.1. Energía y momento 106
6.1.2. Momento angular total 107
6.2. Ley de conservación de la carga eléctrica 108
6.3. Simetrías bajo inversiones temporales y espaciales 108
6.3.1. Inversión temporal (T) 108
6.3.2. Paridad (P) y su violación 109
6.4. Isospín 111
6.5. Números cuánticos internos aditivos 112
6.5.1. Número bariónico 113
6.5.2. Números leptónicos 113
6.5.3. Extrañeza 114
6.5.4. Relación de Gell-Mann y Nishijima 114
6.6. Conjugación de carga (C) y simetría CPT 115
6.7. Simetría CP 115
6.8. Kaones neutros: violación de extrañeza y CP 117

7. Estructura de las partículas: las familias 119

7.1. Los quarks 119
7.1.1. Estructuras puntuales dentro del protón: partones o quarks 119
7.1.2. Clasificación de hadrones según su contenido en quarks 121
7.1.3. Octetes y decupletes 124
7.2. El color 127
7.3. El cuarto quark: el encanto 130
7.4. El quinto quark: la belleza 133
7.5. El leptón pesado τ: las tres familias leptónicas 134
7.6. El sexto quark: las tres familias hadrónicas 136
7.7. Generalización de la relación de Gell-Mann y Nishijima 137
7.8. El confinamiento y los gluones 137

8. Modelos teóricos para las interacciones fundamentales entre partículas 141

8.1. Electrodinámica cuántica 141
8.1.1. Diagramas de Feynman y poder predictivo de la electrodinámica cuántica 141
8.1.2. La invariancia *gauge* en la electrodinámica cuántica 145
8.2. Interacciones débiles y electromagnética. Modelo de Weinberg-Salam 146
8.2.1. Aspectos generales: dobletes y los cuantos W^+ y W^- 146
8.2.2. Interacciones débiles y electromagnéticas como teoría *gauge*. El cuanto Z^0 148
8.2.3. Corrientes neutras 153
8.3. Interacciones fuertes: cromodinámica cuántica 156
8.4. Modelo estándar 160
8.5. Violación de la simetría CP en la teoría de Weinberg-Salam 162
8.6. El descubrimiento del bosón de Higgs (H) en el LHC 166
8.7. Más allá del modelo estándar 167

9. Unificación de las interacciones fundamentales 169

9.1. Teorías de Gran Unificación (GUT) 170
9.2. Supersimetría: nexo entre bosones y fermiones 175
9.3. Interacción gravitatoria 178
9.4. Supergravedad 179

10. Las partículas elementales y el Universo 181

10.1. Descripción del Universo en la época actual 181
10.1.1. Nuestro Sistema Solar y nuestra galaxia 181
10.1.2. Las otras galaxias y el Universo 183
10.1.3. Algunas propiedades del Universo a gran escala 183
10.1.4. La expansión del Universo en la época actual 185
10.2. Los fondos cósmicos de radiación en el Universo en la época actual 188
10.2.1. El fondo cósmico de radiación de microondas 188
10.2.2. Otros fondos cósmicos de radiación 190
10.2.3. Ondas gravitacionales 191
10.3. La evolución del Universo 195
10.3.1. Yendo hacia atrás en el tiempo desde la época actual: la Gran Explosión (Big Bang) 195
10.3.2. Las partículas elementales y sus interacciones en la evolución del Universo 196
10.3.3. Las sucesivas etapas en la evolución del Universo hasta la formación de las galaxias 196

10.4. Rayos cósmicos: otros aspectos 200
10.4.1. Los neutrinos y sus fuentes 202
10.4.2. Neutrinos procedentes de reactores y aceleradores 207

11. Introducción a la teoría de cuerdas y branas 209

11.1. Las cuerdas y sus interacciones 210
11.2. Branas y teoría M 216

12. La oscilación de los neutrinos 219

12.1. La oscilación de los neutrinos activos 219
12.2. La oscilación de neutrinos y los experimentos 225
12.2.1. Oscilación de neutrinos solares 226
12.2.2. Oscilación de neutrinos cósmicos y atmosféricos 228
12.2.3. Oscilación de neutrinos procedentes de reactores y aceleradores 228
12.2.4. Resultados experimentales 230
12.3. Neutrinos estériles 231
12.3.1. Materia oscura y neutrinos estériles 231
12.3.2. Detección de neutrinos estériles 235

13. Otras investigaciones y avances recientes 239

13.1. Los neutrinos y sus velocidades 239
13.2. Detección directa de antimateria en llamaradas solares 240
13.3. Detección directa de la violación de la inversión temporal y nueva verificación experimental de la invariancia CPT 241
13.3.1. Momentos dipolares eléctricos 241
13.4. Colisiones de iones pesados a muy altas energías 243
13.4.1. La propuesta del plasma de quarks y gluones (QGP) 243
13.4.2. Hacia el QGP: colisiones de iones pesados 245
13.4.3. Posibles señales del QGP en colisiones de iones pesados 246
13.4.4. Resumen de resultados experimentales 247
13.5. Rayos cósmicos primarios cargados: detección en el espacio mediante el instrumento AMS-02 247
13.6. Producción de antimateria en el laboratorio 249
13.7. Átomos muónicos 249
13.7.1. Producción del átomo 249
13.7.2. El muón como sonda del núcleo atómico 250
13.7.3. El problema del radio del protón 251

Apéndices

A. Cinemática 253
B. Conservación de energía y momento totales en colisiones y desintegraciones 254

C. Las partículas energéticas como «exploradoras» de distancias cortas... 255
D. Sistemas de referencia: sistema de centro de masas 256
E. Momento angular orbital 257
F. Renormalización de la masa: concepto en un caso simple 258
G. La noción de rotura espontánea de la simetría en un sistema ferromagnético 261
H. Rotura espontánea de la simetría electrodébil: mecanismo y bosón de Higgs 262
I. Mezcla de quarks en interacciones débiles (Matriz de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa) 265
J. Rotura espontánea de la simetría quiral en cromodinámica cuántica 266
K. Sección eficaz total 268

Tablas 271

Cuadros 275

Glosario (breve diccionario de las partículas y el cosmos) 279

Bibliografía 289

Índice analítico 293

Relación de fotografías (cortesía del Servicio de Información Científica del CERN) 299

Prólogo

El propósito de este libro es guiar al lector a través del mundo microscópico de las partículas elementales, de sus interacciones fundamentales y de la relación de su estudio con la formación y evolución del cosmos. El carácter de la obra es introductorio, tratando de adoptar un tono divulgador en la medida de lo posible, por lo que el nivel matemático es mínimo. A lo largo del libro, los conocimientos se van introduciendo paulatinamente, de forma que el lector pueda pasar de los primeros ejemplos de partículas elementales hasta las teorías más actuales y sofisticadas, y a los fenómenos físicos más actuales.

En las últimas décadas hay tres aspectos señalados. El primero, la puesta en marcha de grandes aceleradores y detectores que han descubierto, y ampliado, áreas esenciales de las partículas elementales. El segundo, la observación del Universo, no solo desde telescopios en la Tierra sino también desde el espacio, que está permitiendo un conocimiento del Cosmos sin parangón respecto a décadas anteriores. El tercero, la constatación de que ambas visiones, microscópica y macroscópica, están íntimamente ligadas. En otras palabras, las partículas elementales y la evolución del Universo requieren un estudio casi simultáneo.

La importancia de la Física actual ha trascendido con regularidad a los periódicos. Ejemplos de ello son: el bosón de Higgs (llamada la «partícula de Dios» por motivos publicitarios), la oscilación de los neutrinos, la radiación de fondo de microondas, la llamada materia oscura en el Universo y las ondas gravitacionales.

Nuestro objetivo, desde el principio, ha sido escribir un libro de extensión razonable, que proporcione una perspectiva amplia de la materia a un nivel comprensible. En aras de la filosofía básica del libro, se han omitido conceptos superiores en el texto principal, como, por ejemplo, el de sección eficaz (véase

Apéndice K); gracias a ello se ha aligerado el texto de formalismos y ecuaciones.

Los cuatro primeros capítulos tienen un carácter descriptivo de las partículas —previo a la introducción del concepto de simetría—, de los constituyentes elementales de la materia y de las teorías de las interacciones fundamentales. El lector observará que este libro, aunque tiene como uno de sus hilos conductores el desarrollo cronológico de los descubrimientos y la correspondiente evolución conceptual, no presenta aspectos biográficos ni anecdóticos relativos al mundo de la física.

En el capítulo 1 se analizan características fundamentales (masa, spin, carga) de las partículas, introduciendo, como ejemplos, las que primero se encontraron históricamente, como el electrón, protón o neutrón, de forma que el lector se familiarice con estos objetos microscópicos. Se señalará que el concepto de partícula elemental no es sencillo de definir, pues muchas de ellas (por ejemplo, el protón) están constituidas por objetos más elementales (el protón por tres quarks).

En el capítulo 2 se presentará una primera introducción, puramente fenomenológica, de las interacciones (fundamentales) electromagnética, fuertes y débiles entre las partículas elementales.

En el capítulo 3 veremos cómo podemos «producir» partículas elementales y acelerarlas en los laboratorios. Ello permite no solo estudiar las ya conocidas, sino «obtener» otras nuevas.

El capítulo 4 enlaza de manera natural con el anterior, pues trata de cómo detectar individualmente partículas procedentes de rayos cósmicos o producidas en los laboratorios. Confiamos que, tras su comprensión, el lector interesado no tendrá dificultad en adentrarse, por sí mismo, en la discusión de los más modernos y complejos detectores en física de altas energías.

El capítulo 5 versa exclusivamente sobre aplicaciones de las partículas en el campo de la medicina, poniéndose de manifiesto que la investigación pura influye y sirve en la vida práctica. En relación a ello, se ha requerido la utilización modernizada y optimizada de aceleradores pequeños, comparados con los grandes aceleradores para partículas a altas energías, que ha conllevado inversiones no solo públicas sino privadas.

El capítulo 6 enlaza con el capítulo 2, y pueden ser leídos consecutivamente. En él se introduce el concepto de simetría, y se estudian las leyes de conservación, en los procesos entre partículas elementales, imprescindibles para el análisis y la predicción de fenómenos.

En el capítulo 7 retomamos el concepto de «elemental», e introducimos los que, hasta ahora, se creen constituyentes últimos de la materia (leptones y quarks).

En el capítulo 8 se introducen, progresivamente, los modelos teóricos para las interacciones electromagnética, fuerte y débil. Se concluye con el modelo estándar de las partículas elementales, y con una sección dedicada a la partícula Higgs descubierta en 2012.

El capítulo 9 versará acerca de los modelos que tratan de unificar todas las interacciones fundamentales, incluyendo la gravedad. La introducción de esta última planteará graves problemas, que obligarán a un salto cualitativo del mismo concepto de objeto elemental. Se introduce también el importante concepto teórico de Supersimetría.

En el capítulo 10 se introduce el apasionante estudio de las partículas elementales y del Universo que nos rodea, mostrando la conexión entre partículas, y sus interacciones, con la evolución del Universo, prueba de que el mundo microscópico y el macroscópico están interrelacionados.

Los capítulos 11, 12 y 13 son de un nivel superior al promedio del resto de la obra.

En el capítulo 11 se considera la teoría de cuerdas, que unifica la gravitación con las otras tres interacciones fundamentales. Los objetos elementales no serán puntuales, sino de pequeñísimo tamaño (cuerdas y branas).

El capítulo 12 trata de la oscilación de los neutrinos, que ha abierto una nueva ventana de la física, tanto por su importancia en el mundo de las partículas elementales como en el de sus consecuencias cosmológicas. Los neutrinos constituyen uno de los temas con mayor futuro en la física del siglo xxi. Asimismo, se considera el problema de la materia oscura y se proponen los neutrinos estériles como uno de los posibles candidatos a ella.

El capítulo 13 recapitula nuevas perspectivas de la física de partículas, a través de experimentos en curso.

Como ayuda para la comprensión del texto principal, se han incluido una serie de apéndices, tablas, cuadros y un Glosario (conteniendo también términos cosmológicos) y bibliografía; esta última, limitada por el carácter del libro, se ordena por el nivel de divulgación o de especialización (incluida para completar, pero de un nivel superior al texto presentado). En cuanto a los apéndices, en particular los denominados H y J, son de un nivel superior, dada la materia tratada.

Finalmente, se ha de señalar la inclusión inevitable de algunos comentarios u observaciones de nivel algo superior al del texto, que aparecen en recua-

dros sombreados, y que pueden ser omitidos por el lector no interesado en ellos, sin menoscabo de sentido en el texto principal.

R. F. Álvarez-Estrada agradece al Proyecto FIS2012-35719-C02-01 y al FIS2015-65078-C2-1-P(Ministerio de Economía, España) por su apoyo económico.

Por conversaciones científicas, relacionadas con este libro, R. F. Álvarez-Estrada agradece a los profesores Antonio Dobado, Angel Gómez Nicola, Pedro Ladrón de Guevara, Antonio López Maroto, Fernando Ruiz y José Alberto Ruiz Cembranos (Universidad Complutense de Madrid, España); y M. Ramón Medrano a los profesores Gabriel Álvarez Galindo (Universidad Complutense de Madrid, España), y Norma G. Sánchez y Héctor de Vega (†) (Observatoire de París, y École Internationale d'Astrophysique Daniel Chalonge-Héctor de Vega, Francia). También queremos agradecer a los profesores Antonio Fernández Rañada y Rafael Llosá (†) por su apoyo en los comienzos de esta obra.

Asimismo, los autores expresan su reconocimiento a D. David Fernández por su colaboración en diversos aspectos informáticos, y a los Departamentos de Física Teórica de la Universidad Complutense (Madrid, España) por su ambiente científico y humano.

F. J. Llanes agradece el apoyo de los proyectos de investigación FPA2014-53375-C2-1-P y FPA2016-75654-C2-1-P del MINECO, así como el 910309 de la Universidad Complutense.

Finalmente, estamos muy agradecidos al Servicio de Información Científica del CERN por permitirnos reproducir las fotografías de este texto.

Los símbolos y sus significados

$\simeq$: aproximadamente igual.
$|x|$: valor absoluto o magnitud de la cantidad física *x*.
Ejemplo: $|-5| = 5$.
x: vector, formado por sus tres componentes x_1, x_2, x_3.
Ejemplos: **v** (velocidad), **p** (momento).
$|\mathbf{x}|$: módulo del vector **x**, dado por $(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)^{1/2}$.
A > B: A mayor que B.
A < B: A menor que B.

Nota: los decimales se indican con un punto —ej. 1.6— en vez de con una coma —ej. 1,6—, a fin de facilitar al lector la consulta y lectura de las tablas de partículas existentes en la literatura científica y en la red.

1

Aspectos generales de las partículas elementales

1.1 Partícula elemental

Una definición de objeto elemental es la de ser el último constituyente indivisible de la materia. La respuesta a la pregunta: ¿cuál es ese objeto? ha variado históricamente.

A grandes rasgos, en los siglos IV y V a. C. la teoría griega del atomismo —cuyos máximos exponentes fueron Leucipo y su discípulo Demócrito— introducía, sin base experimental, objetos idénticos e indivisibles llamados átomos. En los siglos XVIII y XIX, con el desarrollo de la química, tenemos que para John Dalton existen 20 elementos formados por «átomos». En 1897, J. J. Thomson encuentra experimentalmente el electrón. En 1911, E. Rutherford, en un experimento crucial, descubre que la carga positiva del átomo neutro está concentrada en el núcleo, en torno al cual se mueven los electrones (véase Glosario). En 1932 queda establecido que el núcleo está constituido por protones y neutrones (véase Glosario). En la década de 1960 a 1970 se acepta que estos protones y neutrones dejen de ser elementales y estén constituidos por quarks (capítulo 7).

Imaginemos que contemplamos una tetera china, a una distancia tal que distinguimos su forma; si nos aproximamos lo suficiente, notamos que su superficie está constituida, primorosamente (¡con paciencia oriental!), por finas fibras de bambú colocadas unas junto a otras; si ahora recurrimos a la ayuda de una lupa, comenzaremos a reconocer una estructura en las fibras, y así sucesivamente con un microscopio, etc. En resumen, la búsqueda gradual de lo que es verdaderamente elemental exige progresivamente mayores esfuer-

zos, o energías, que nos permitan «ver», cada vez, a distancias más pequeñas (véase apéndice C). Así, a una distancia de 10^{-8} cm (1/100 000 000 de un centímetro, unidad llamada un angström = 1 Å) «vemos» que el átomo está constituido por los electrones y el núcleo, en el que no distinguimos sus constituyentes; a una distancia de 10^{-13} cm (unidad denominada un fermi = 1 fm) reconocemos en el núcleo protones y neutrones; a una distancia de 10^{-17} cm discernimos los quarks como sus constituyentes elementales.

Resumiendo la situación en un pequeño cuadro de distancias y energías, y las áreas correspondientes de la física, tenemos (tabla 1.1):

TABLA 1.1

Distancias exploradas y energías

Energías	Física	Distancias
eV	Atómica	10^{-8} cm = 1 Å
MeV (10^6 eV)	Nuclear	10^{-13} cm = 1 fm
GeV (10^9 eV)	Altas energías	10^{-16} cm
TeV (10^{12} eV)	Nuevos aceleradores	10^{-19} cm

donde el electrón-voltio (1 eV) es la energía adquirida por un electrón sometido a la diferencia de potencial de un voltio (1 eV = 1.6×10^{-19} julios); un megaelectronvoltio (1 MeV) es igual a 10^6 eV; un gigaelectronvoltio (1 GeV) es igual a 10^9 eV. La relación entre distancias, exploradas, y energías, requeridas para verlas, viene dada por la relación de Broglie (véase apéndice C).

1.1.1. Masa

La primera propiedad de las partículas elementales será la de la masa, más precisamente la de su masa en reposo (véase apéndice A). Debido a la pequeñez (del orden de 10^{-13} cm – 10^{-16} cm) de estos objetos físicos, sus masas son también extraordinariamente pequeñas —por ejemplo, la masa del electrón es igual a 9.1091×10^{-31} kg— y es necesario introducir otras unidades de masa distintas de las de gramos o kilogramos (kg).

Según la cinemática relativista (véase apéndice A), la energía *en reposo* es igual al producto de la masa por el cuadrado de la velocidad de la luz en el vacío ($E = mc^2$): la masa, por tanto, podrá medirse en unidades de energía

(dividida por c^2). Por idénticas razones de pequeñez, la unidad de energía más conveniente es el electronvoltio (eV), cuya relación con las más tradicionales unidades de ergios y julios (sistemas cegesimal y MKS) es:

$$1 \text{ eV} = 1.6021 \times 10^{-12} \text{ ergios} = 1.6021 \times 10^{-19} \text{ julios.}$$

Una unidad, aún más práctica, será un megaelectronvoltio, igual a un millón de electronvoltios (1 MeV = 10^6 eV). La energía en reposo del electrón, en esta nueva unidad, será por tanto:

$$E = mc^2 = 9.1091 \times 10^{-31} \text{ kg} \times [2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}]^2 =$$
$$81.9628 \times 10^{-15} \text{ julios} = 51.1596 \times 10^4 \text{ eV} \simeq 0.512 \text{ MeV}$$

(c = 2.9979 × 10^8 m/s), donde *m* y *s* denotan un metro y un segundo. Así pues, la masa en reposo del electrón vendrá dada en las tablas por:

$$m_e = 0.512 \text{ MeV}/c^2.$$

1.1.2. Carga eléctrica

Las partículas elementales poseen cargas eléctricas de *magnitud* exactamente igual a la del electrón, $|e|$ (§ 1.2.1.), con igual signo o con el opuesto, o bien son eléctricamente neutras (véanse tablas 1-7 tras los apéndices). Recuérdese que los núcleos atómicos poseen cargas eléctricas positivas, que son múltiplos enteros de $|e|$. Hasta el presente no se ha detectado ninguna partícula elemental con carga eléctrica fraccionaria (tomando $|e|$ como unidad) suficientemente separada o aislada de otras partículas: es decir, con carga $(n_1/n_2)\ |e|$, donde n_1/n_2 designa una fracción, por ejemplo: 3/4 (compárese con la discusión acerca de los quarks en el capítulo 7).

1.2 DESCUBRIMIENTOS DEL ELECTRÓN, PROTÓN Y NEUTRÓN

Describiremos someramente en qué condiciones fueron descubiertas algunas de las partículas elementales más conocidas, tales como el electrón, el protón y el neutrón, y cómo fueron medidas algunas de sus propiedades.

1.2.1. Electrón (e^-)

En la última parte del siglo XIX se efectuaron numerosas investigaciones sobre descargas eléctricas entre dos placas (cátodo y ánodo), entre las que se había establecido una elevada diferencia de potencial (miles de voltios). Dichas placas estaban colocadas en el interior de un recipiente o tubo, que contenía, además, un gas enrarecido a baja presión (figura 1.1).

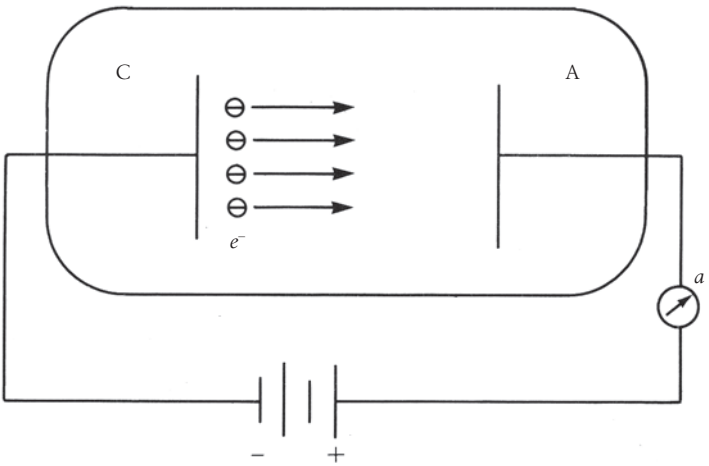


Figura 1.1.—Tubo de rayos catódicos, conteniendo un gas enrarecido. C: cátodo; A: ánodo; e^-: rayos catódicos (electrones); *a*: amperímetro.

Investigaciones debidas a J. J. Thomson (1897) probaron que las descargas eléctricas producidas eran debidas al paso —desde el cátodo (conectado al polo negativo del generador) hasta el ánodo (conectado al positivo)— de un número enorme de partículas microscópicas («rayos catódicos») con carga eléctrica negativa e y masa m_e, que hoy llamamos electrones (y se representan con el símbolo e^-). Extrayendo adecuadamente un haz de tales rayos catódicos del interior del tubo, haciéndolos pasar a través de un campo eléctrico (entre las placas de un condensador) y otro magnético, y determinando las desviaciones sufridas por dicho haz, fue posible hallar el cociente carga/masa del electrón:

$$|e| / m_e = 1.76 \times 10^{11} \text{ culombios/kg}$$

(culombio: unidad, del sistema internacional de unidades, para la carga eléctrica). La magnitud, $|e|$, de la carga eléctrica del electrón fue determinada experimentalmente por R. A. Millikan entre 1909 y 1913 de la siguiente forma: minúsculas gotas de aceite —cada una cargada eléctricamente con electrones— fueron sometidas a un campo eléctrico vertical (entre las placas de un condensador); cuando sobre cada gota se compensaban, exactamente, el empuje del aire y la fuerza eléctrica (ambas hacia arriba) con la fuerza de la gravedad (hacia abajo), dicha gota quedaba inmovilizada en el espacio. A partir de estas situaciones de equilibrio, para un elevado número de gotas, Millikan obtuvo que:

$$|e| = 1.60 \times 10^{-19} \text{ culombios.}$$

Combinando este resultado con el valor obtenido para $|e|/m_e$, la masa del electrón es $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg (= 0.51 MeV/c^2).

J. J. Thomson y R. A. Millikan recibieron el Premio Nobel de Física en 1906 y 1923, respectivamente.

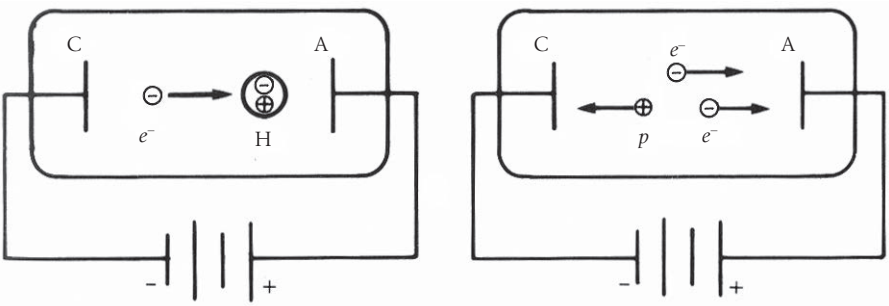
1.2.2. Protón (p)

Los experimentos realizados en tubos de rayos catódicos condujeron a nuevos y fructíferos descubrimientos. En efecto, cuando el tubo contenía gas hidrógeno (enrarecido) y se producía la descarga eléctrica mediada por rayos catódicos (electrones), según comentamos previamente, se detectó, además, la existencia de una nueva radiación en el interior del tubo, hacia el cátodo (distinta por tanto de la de los electrones hacia el ánodo).

Diversos análisis, siguiendo la pauta de los ya descritos para los electrones, mostraron que estas nuevas radiaciones correspondían a cargas eléctricas positivas, pues sufrían desviaciones, en campos eléctricos externos, en sentido opuesto a las de los electrones. Se estableció que las nuevas radiaciones estaban constituidas por un gran número de minúsculas partículas, con carga eléctrica $|e|$ (positiva y de igual magnitud que la del electrón) y con masa $m_p = 1.67 \times 10^{-27}$ kg (= 938.3 MeV/c^2). Estas partículas reciben el nombre de protones (p).

La interpretación de la nueva radiación es la siguiente: dichos protones son los núcleos de los átomos de hidrógeno contenidos en el tubo, los cuales se han separado de sus respectivos electrones al paso de la corriente eléctrica

(rayos catódicos) hacia el ánodo, y han sido atraídos por el cátodo debido a su carga eléctrica positiva (figura 1.2).



a) *b*)

Figura 1.2.—Descubrimiento del protón en un tubo de rayos catódicos que contiene gas hidrógeno. *a*) Un electrón (e^-) incide sobre un átomo de hidrógeno (H). *b*) Tras la ionización del átomo, los electrones (e^-) son atraídos por el ánodo (A), y los protones (p) por el cátodo (C).

1.2.3. Neutrón (n)

Experimentos realizados en Alemania y Francia en torno a 1930 mostraron que si un haz de partículas α (véase Glosario) —de alta velocidad— bombardeaba una muestra de berilio (Be), este emitía una radiación de carácter desconocido hasta entonces. Dicha radiación tenía las propiedades siguientes: *a)* alto poder de penetración; *b)* las posibles entidades que la constituían no estaban cargadas eléctricamente (pues no se desviaban en campos eléctricos o magnéticos), y *c)* al someter un bloque de material absorbente (parafina, por ejemplo) a dicha radiación, se originaba un nuevo haz, esta vez de protones (figura 1.3).

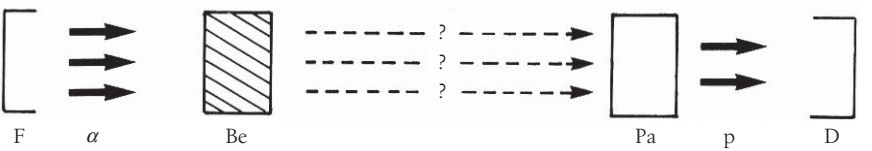


Figura 1.3.—Esquema de los experimentos que condujeron al descubrimiento del neutrón. F: fuente radiactiva; Be: berilio; Pa: Parafina; D: detector; p: protones; α: partículas α (núcleos de helio).

Se estudió, temporalmente, la sugerencia de que esa radiación fuese electromagnética. Experimentos posteriores de J. Chadwick (1932) en Inglaterra

descartaron esta última posibilidad. Chadwick mostró que todas las características de dicha radiación podían interpretarse si se suponía que esta estaba constituida por partículas materiales eléctricamente neutras y con masa m_n, aproximadamente igual pero algo superior a la del protón. Estas nuevas partículas recibieron el nombre de neutrones (n), y correspondían, por sus propiedades, a las conjeturadas por E. Rutherford en 1920. En efecto, este físico había sugerido que los núcleos atómicos podrían estar constituidos por protones y otras partículas neutras, de masa ligeramente superior a la de los primeros. Chadwick interpretó, correctamente, que cada neutrón se produce en la interacción de una partícula $\alpha(^4_2\mathrm{He})$ con un núcleo de berilio, según la reacción nuclear:

$$^4_2\mathrm{He} + {}^9_4\mathrm{Be} \rightarrow {}^{12}_6\mathrm{C} + \mathrm{n} \qquad [1.1]$$

donde $^{12}_6$C es un núcleo de carbono (véase núcleo atómico en el Glosario).

E. Rutherford recibió el Premio Nobel de Química en 1908 y J. Chadwick el de Física en 1935.

1.3 Fotón y dualidad onda-corpúsculo para la radiación electromagnética

El tubo de rayos catódicos dio lugar a otro descubrimiento trascendental: los rayos X (W. C. Roëntgen, 1895, Premio Nobel de Física en 1901). Cuando los electrones, procedentes del cátodo, chocan con el ánodo, se genera un nuevo tipo de radiación, que posee las propiedades siguientes: *a)* ennegrece placas fotográficas; *b)* produce quemaduras en la piel; *c)* no es desviada por campos eléctricos o magnéticos; *d)* es fuertemente absorbida por materiales de alta densidad (hierro, plomo); y *e)* produce sombras de objetos densos en placas fluorescentes (y, por tanto, se propaga en línea recta). Estas radiaciones no eran de carácter material, sino ondas electromagnéticas de naturaleza análoga a la de la luz. Tienen la misma velocidad ($c = 2.998 \times 10^8$ m/s), pero frecuencia ν más alta (mayor o igual que 10^{16} Hz; 1 Hz = 1 ciclo/s) y longitud de onda $\lambda = c/\nu$ más corta (menor o igual que 5×10^{-8} m).

Radiaciones electromagnéticas de frecuencia alta, tales como la luz ultravioleta (véase Glosario) o los rayos X, producen fenómenos que no pueden

interpretarse en el marco de la teoría electromagnética clásica. Dos de estos fenómenos se exponen a continuación.

1.3.1. Efecto fotoeléctrico

Consideremos dos placas metálicas separadas (cátodo y ánodo), situadas (en vacío) dentro de un tubo, y unidas a los extremos de una pila que mantiene una diferencia de potencial. En principio, no existe corriente eléctrica en el circuito. Si se ilumina el cátodo con luz ultravioleta, este emite electrones que, atraídos por el ánodo, generan de manera prácticamente instantánea una corriente eléctrica en el circuito (véase figura 1.4).

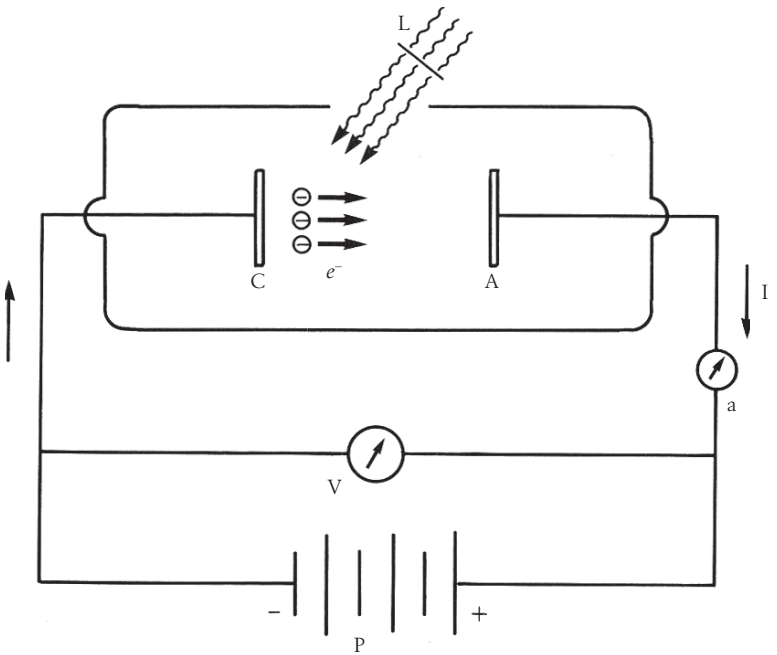


Figura 1.4.—Efecto fotoeléctrico. L: luz ultravioleta; C: cátodo; A: ánodo; I: corriente eléctrica; a: amperímetro; e^-: electrones; V: voltímetro; P: pila.

Este fenómeno, que solo se produce si la luz ultravioleta tiene una frecuencia ν superior a una mínima ν_0 (aunque la intensidad del haz sea elevada), se conoce como efecto fotoeléctrico.

La teoría electromagnética clásica —según la cual la energía del haz ultravioleta estaría distribuida de forma continua sobre este haz— encontró dificultades

serias para interpretar el fenómeno. En efecto: *a)* para que un electrón del cátodo pudiera absorber energía de la luz incidente, y así irse de aquel, se requeriría un cierto tiempo que sería medible, y *b)* dicho electrón podría absorber la energía necesaria de la luz ultravioleta —aunque esta tuviese una frecuencia muy baja— a condición de que la intensidad incidente fuese alta. Claramente, estas consecuencias de la teoría clásica contradicen las observaciones experimentales.

1.3.2. Efecto Compton

Un haz de rayos X con frecuencia ν, y dirección bien determinada, incide sobre un material sólido (carbono, por ejemplo). Se analizan los rayos X, reemitidos y dispersados por el material en diferentes direcciones, que forman ángulos θ con la dirección de los rayos X incidentes.

Los resultados experimentales, cuyo conjunto constituye el llamado efecto Compton, son: los rayos X reemitidos en la misma dirección que los incidentes ($\theta = 0$) tienen la misma frecuencia que estos, pero los dispersados en una dirección θ arbitraria poseen frecuencias ν distintas, que varían con θ.

¿Cómo se interpretan estos resultados? Un análisis con base en el electromagnetismo clásico, y en ideas generales sobre la estructura de la materia, implicaría lo siguiente: cada electrón, moviéndose periódicamente en torno a cada núcleo, actúa —al recibir los rayos X incidentes— como un oscilador clásico, que reemite estos últimos *con la misma frecuencia en todas las direcciones* θ. Una vez más, la conclusión de la teoría clásica está en contradicción con los resultados experimentales.

1.3.3. Fotón (γ) y dualidad onda-corpúsculo

Los resultados experimentales, correspondientes a ambos efectos (así como a otros fenómenos que no mencionaremos), se interpretan de forma completa aceptando que las radiaciones electromagnéticas, además de comportarse como ondas, tienen también carácter corpuscular (dualidad onda-corpúsculo). Específicamente, la comunidad científica ha aceptado, tras A. Einstein (1905) y A. H. Compton (1921-1923), que toda radiación electromagnética —con frecuencia ν, longitud de onda λ y velocidad $c = \lambda\nu$— lleva su energía concentrada en un gran número de minúsculos «paquetes», llamados fotones, cada uno de los cuales tiene, como características corpusculares, una energía E y un mo-

mento o impulso mecánico **p** de magnitud $|\mathbf{p}|$ (véase el apéndice A). Estas características están relacionadas con las magnitudes ondulatorias mediante:

$$E = h\nu \qquad |\mathbf{p}| = h/\lambda \qquad [1.2]$$

donde $h = 6.626 \times 10^{-34}$ julios·s es la constante de Planck (véase Glosario). En los fenómenos relativos a la radiación electromagnética cuya frecuencia ν no es alta, como ocurre con la gran mayoría de los de la luz *visible* en que ν varía entre 5×10^{14} Hz, y 7×10^{14} Hz, la energía de cada fotón no llega a ser suficiente para producir fenómenos apreciables como los que nos ocupan (salvo en casos excepcionales como el sodio). En estos casos la distribución de energía de la radiación se describe, con razonable aproximación, como una densidad continua de energía por unidad de volumen (sin especificar que esta es el producto de un número elevadísimo de fotones, en dicho volumen, por una pequeña energía por fotón), tal como enseña la teoría electromagnética clásica. En otros términos, el carácter corpuscular del fotón queda enmascarado. Pero en los efectos fotoeléctrico y Compton, que involucran frecuencias altas, la energía de cada fotón ya es suficiente (del orden de varios electronvoltios y mayor) como para producirlos. Un fotón tiene masa nula y se mueve a la velocidad de la luz, *c*.

M. Planck, A. Einstein y A. H. Compton recibieron el Premio Nobel de Física en 1918, 1921 y 1927, respectivamente (en el caso de A. Einstein por su contribución al efecto fotoeléctrico, no por su Teoría de la Relatividad de fama mundial).

1.3.4. Interpretación de los efectos fotoeléctrico y Compton como descubrimiento del fotón

El efecto fotoeléctrico se interpreta (A. Einstein, 1905) así: cada electrón del cátodo absorbe, de forma prácticamente instantánea, un fotón de energía $h\nu$, superando la diferencia de energía potencial, W_0, entre el interior y el exterior del metal que forma el cátodo, y así sale de este (W_0 es la llamada función trabajo de dicho metal y suele ser del orden de varios electrovoltios). Si $h\nu$ es inferior a W_0, los electrones, tras haber absorbido los fotones, no llegan a tener energía suficiente para salir del cátodo metálico; en consecuencia, no llegan al ánodo, y no se establece corriente en el circuito (recuérdese la figura 1.4). Así pues, hay una frecuencia mínima o umbral, ν_0 —dada por $h\nu_0 = W_0$—, tal que si ν es inferior a ν_0 el efecto no se produce.

Por lo que respecta al efecto Compton, este se interpreta (A. H. Compton, 1921-1923) como el resultado de una colisión elástica individual. Un fotón de los rayos X incidentes choca con un electrón del material, el cual retrocede, siendo emitido un fotón —con frecuencia ν' diferente de la incidente— que contribuye al haz de rayos X dispersados, y cuyas frecuencias dependen del ángulo de dispersión (véase la figura 1.5). Utilizando las leyes mecánicas de conservación de la energía y del momento total en dicha colisión (véase el apéndice B), se explican todos los resultados experimentales característicos del efecto Compton. En resumen, la naturaleza corpuscular de la luz explica los efectos fotoeléctrico y Compton, y no es arriesgado afirmar que el conjunto de ambos puede interpretarse como el descubrimiento experimental del fotón.

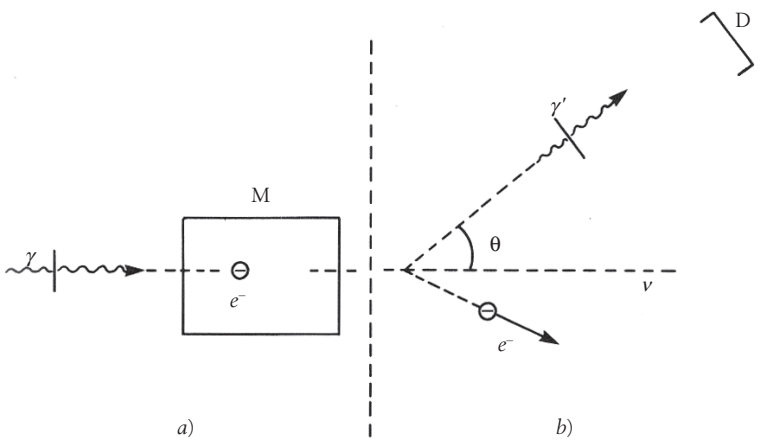


Figura 1.5.—Interpretación del efecto Compton como una colisión elástica de un fotón y un electrón. γ: fotón incidente; γ': fotón reemitido; e^-: electrón; D: detector; M: material sólido. *a*) Estado inicial de la colisión. *b*) Estado final.

1.4 PARTÍCULAS INESTABLES: VIDA MEDIA

Consideremos una cierta partícula elemental, aislada e inestable, que se desintegra espontáneamente en otras (por ejemplo, un neutrón). Supongamos que en el instante $t = 0$ se prepara un cierto número N de esas partículas —todas idénticas entre sí— en reposo, aisladas e independientes unas de otras. Al cabo de un cierto tiempo t, quedan $N(t)$ partículas que aún no se han desintegrado. Claramente, $N(t)$ es menor que N (¡pues las partículas se desinte-

gran!), y cuanto más tiempo transcurra menor será $N(t)$. El número de las que se desintegran en el pequeño intervalo de tiempo Δt es $N(t) - N(t + \Delta t)$, que debe ser proporcional al número de las que hay en t y al intervalo Δt. Llamaremos $1/\tau$ a la constante de proporcionalidad. En consecuencia, debe cumplirse:

$$N(t) - N(t + \Delta t) \simeq (1/\tau)N(t)\Delta t \qquad [1.3]$$

La solución de esta ecuación es la llamada ley de desintegración exponencial:

$$N(t) = N \exp(-t/\tau) \qquad [1.4]$$

donde exp denota la función exponencial. La constante τ, que tiene dimensiones de tiempo y se denomina vida media de la partícula inestable en cuestión, representa físicamente lo que esta «vive» en promedio antes de desintegrarse. Las tablas 1-5 tras los apéndices contienen las vidas medias de diversas partículas.

Como se verá en capítulos posteriores, la inestabilidad de una partícula será debida (o irá asociada) a ciertas interacciones, que serán clasificadas como fuertes, electromagnéticas o débiles. Un hecho muy importante es el siguiente: las vidas medias de las partículas inestables serán muy distintas, según el tipo de interacciones de que se trate. Los correspondientes órdenes de magnitud se dan en la tabla 1.2.

TABLA 1.2

Vidas medias

Interacción que produce la desintegración	Vida media
Fuerte	$10^{-22} - 10^{-25}$ s
Electromagnética	$10^{-16} - 10^{-19}$ s
Débil	$10^{-6} - 10^{-10}$ s

«Según la física cuántica, la vida media de una partícula elemental inestable es la inversa de su probabilidad total de desintegración por unidad de tiempo Γ (a todos los posibles estados finales): $\tau = 1/\Gamma$»