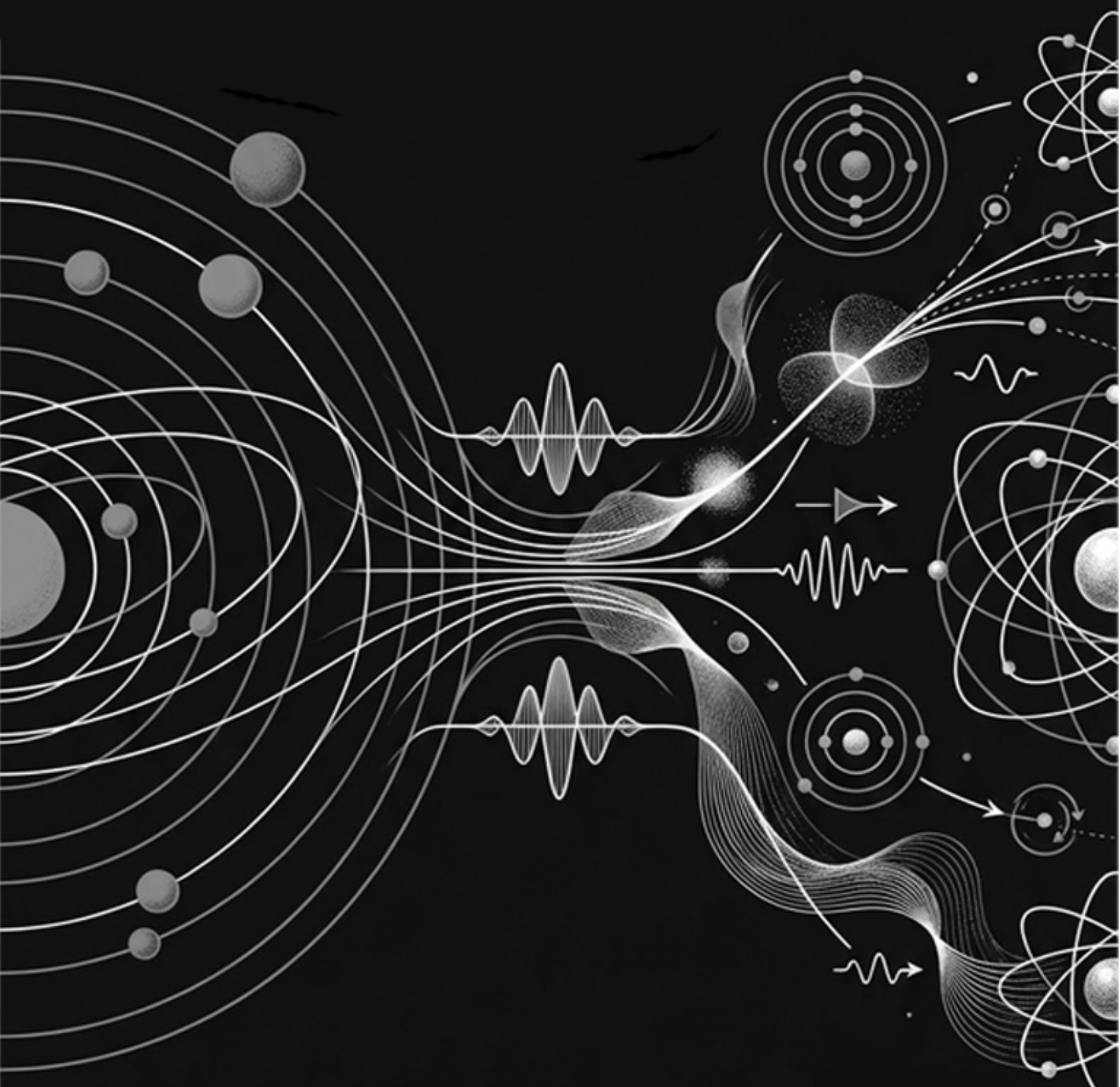
Miguel Martínez Mateo

MANUAL DE FÍSICA

TEORÍA Y MODELOS DESDE LA PAU A CARRERAS STEAM



Editorial

Francisco Ortiz Castillo
DIRECTOR EDITORIAL

Consejo Editorial

Guillermo Rodríguez Iniesta
DIRECTOR GENERAL DE PUBLICACIONES
Catedrático de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social. Universidad de Murcia.

José Luján Alcaraz
Catedrático de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social. Universidad de Murcia

José Luis Monereo Pérez
Catedrático de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social. Universidad de Granada. Presidente de la Asociación Española de Salud y Seguridad Social

María Nieves Moreno Vida
Catedrática de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social. Universidad de Granada

Cristina Sánchez-Rodas Navarro
Catedrática de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social. Universidad de Sevilla

Consejo Científico

Jaime Cabeza Pereiro
Catedrático de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social. Universidad de Vigo

Faustino Cavas Martínez
Catedrático de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social. Universidad de Murcia

María Teresa Díaz Aznarte
Catedrática de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social. Universidad de Granada

Juan José Fernández Domínguez
Catedrático de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social. Universidad de Valladolid

Jesús Martínez Girón
Catedrático de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social. Universidad de A Coruña

Carolina Martínez Moreno
Catedrática de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social. Universidad de Oviedo

Jesús Mercader Uguina
Catedrático de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social. Universidad Carlos III

Antonio Ojeda Avilés
Catedrático de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social. Universidad de Sevilla

Margarita Ramos Quintana
Catedrática de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social. Universidad de La Laguna

Pilar Rivas Vallejo
Catedrática de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social. Universidad de Barcelona

Susana Rodríguez Escanciano
Catedrática de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social. Universidad de León

Carmen Sáez Lara
Catedrática de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social. Universidad de Córdoba

Antonio V. Sempere Navarro
Magistrado del Tribunal Supremo. Catedrático de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social

Arántzazu Vicente Palacio
Catedrática de Derecho del Trabajo y de la Seguridad Social. Universidad Jaume I

MIGUEL MARTÍNEZ MATEO

MANUAL DE FÍSICA

Teoría y Modelos desde la PAU a carreras STEAM.

Laborum
EDICIONES

Edita:
Ediciones Laborum, S.L.
Avda. Gutiérrez Mellado, 9 - Planta 3ª, Oficina 21
30008 Murcia
Tel.: 968 24 10 97
E-mail: laborum@laborum.es
www.laborum.es

ISBN Digital: 979-13-88025-41-9

© Copyright de la edición, Ediciones Laborum, 2025
© Copyright del texto, Miguel Martínez Mateo, 2025

Ediciones Laborum, S.L. no comparte necesariamente los criterios manifestados por los autores en el trabajo publicado.

La información contenida en esta publicación constituye únicamente, y salvo error u omisión involuntarios, la opinión de su autor con arreglo a su leal saber y entender, opinión que subordinan tanto a los criterios que la jurisprudencia establezca, como a cualquier otro criterio mejor fundado.
Ni el editor, ni el autor, pueden responsabilizarse de las consecuencias, favorables o desfavorables, de actuaciones basadas en las opiniones o informaciones contenidas en esta publicación.

Reconocimiento - No comercial - Sin obra derivada (BY-NC-ND): El material puede ser distribuido, copiado y exhibido por terceros si se muestra en los créditos. No se puede obtener ningún beneficio comercial. No se pueden realizar obras derivadas.

A mi mujer, Amalia, a mis padres Miguel e Isabel y a mi hermano Carlos.

"*Un maestro trabaja para la eternidad; nunca sabe dónde termina su influencia*"

Henry Adams

ÍNDICE

PRÓLOGO 9

BLOQUE A. CAMPO GRAVITATORIO 11
Capítulo 1. Interacción gravitatoria y campo gravitatorio 11
1. Ley de Gravitación Universal 11
2.Intensidad de campo gravitatorio 13
3. Principio de superposición 17
Capítulo 2. Energía potencial gravitatoria 20
1. Campo conservativo 20
2. Potencial gravitatorio 22
3. Teoremas energéticos en el campo gravitatorio 25
Capítulo 3. Movimiento orbital 30
1. Energía y movimiento orbital 30
2. Velocidad orbital y velocidad de escape 33
3. Momento angular 38
4. Leyes de Kepler 42

BLOQUE B. CAMPO ELECTROMAGNÉTICO 46
Capítulo 4. Campo eléctrico 46
1. Ley de Coulomb 46
2. Campo eléctrico 49
3. Potencial eléctrico 52
4. Energía potencial eléctrica 55
Capítulo 5. Movimiento de cargas en campos 59
1. Movimiento de cargas en campo eléctrico 59
2. Campo magnético 62
3. Fuerza de Lorentz 65
4. Campos eléctricos y magnéticos combinados 68
Capítulo 6. Campo magnético creado por corrientes 71
1. Corriente rectilínea 71
2. Fuerza entre corrientes 73
3. Superposición de campos 76
Capítulo 7. Inducción electromagnética 79
1. Flujo magnético 79
2. Ley de Faraday-Henry 82
3. Ley de Lenz 85
4. Fuerza electromotriz inducida 87

BLOQUE C. VIBRACIONES Y ONDAS 91
Capítulo 8. Movimiento armónico simple 91
1. Cinemática del movimiento armónico simple 91
2. Energía en el oscilador armónico 94
Capítulo 9. Ondas mecánicas 98
1. Magnitudes ondulatorias 98
2. Ecuación de onda unidimensional 101

3. Ondas transversales y longitudinales 104
Capítulo 10. Fenómenos ondulatorios 107
1. Principio de Huygens 107
2. Reflexión y refracción 110
3. Interferencia y difracción 113
4. Ondas estacionarias 115
Capítulo 11. Ondas electromagnéticas 119
1. Naturaleza y propagación de las ondas electromagnéticas 119
2.Energía e intensidad de la radiación electromagnética 122
3. Espectro electromagnético 123
Capítulo 12. Óptica geométrica 127
1. Propagación rectilínea de la luz 127
2. Reflexión y refracción de la luz. Ley de Snell 129
3. Espejos planos y espejos esféricos 132
4. Lentes delgadas 135
5. Formación de imágenes 137

BLOQUE D. FÍSICA RELATIVISTA, CUÁNTICA, NUCLEAR Y DE PARTÍCULAS 141
Capítulo 13. Origen de la Física Cuántica 141
1. Crisis de la Física Clásica 141
2. Hipótesis de Planck 143
3. Espectros atómicos 146
4. Modelo atómico de Bohr 148
5. Efecto fotoeléctrico 151
Capítulo 14. Principios cuánticos 154
1. Dualidad onda-corpúsculo 154
2. Principio de incertidumbre 156
Capítulo 15. Física nuclear 158
1. El núcleo atómico 158
2. Defecto de masa y energía de enlace 161
3. Radiactividad 163
4. Ley de desintegración radiactiva 166
Capítulo 16. Fisión, fusión e interacciones fundamentales 170
1. Fisión nuclear 170
2. Fusión nuclear 172
3. Interacciones fundamentales 175

FORMULARIO RESUMEN AMPLIADO 179
BLOQUE A · CAMPO GRAVITATORIO 179
BLOQUE B · CAMPO ELECTROMAGNÉTICO 181
BLOQUE C · VIBRACIONES, ONDAS Y ÓPTICA 184
BLOQUE D · FÍSICA CUÁNTICA Y NUCLEAR 187

IDEAS CLAVE Y ERRORES QUE SE COMETEN EN LA PAU 191

CONCLUSIONES FINALES 225

BIBLIOGRAFÍA 227

PRÓLOGO

La Física ocupa un lugar singular dentro del currículo de 2.º de Bachillerato. No es únicamente una materia científica más, ni un conjunto de fórmulas destinadas a la resolución mecánica de problemas, sino una disciplina que aspira a describir, interpretar y modelizar la realidad mediante leyes generales, conceptos abstractos y un lenguaje matemático preciso. Sin embargo, esa aspiración convive, de forma inevitable, con una realidad académica concreta: la evaluación externa de los aprendizajes a través de la Prueba de Acceso a la Universidad (PAU).

Este Manual de Física nace precisamente en ese punto de encuentro, a veces tenso, entre el rigor conceptual de la Física como ciencia y las exigencias reales del sistema de evaluación. Surge de una constatación clara: no existe actualmente un manual que aborde de manera sistemática, rigurosa y explícita los contenidos de Física de 2.º de Bachillerato tal y como son formulados, delimitados y evaluados en las directrices oficiales de la PAU. Los libros de texto tradicionales cumplen una función imprescindible, pero con frecuencia incorporan desarrollos teóricos, demostraciones matemáticas o ampliaciones conceptuales que, aun siendo valiosas desde un punto de vista formativo, se sitúan fuera del marco estrictamente evaluable en la prueba.

Este manual no pretende sustituir a esos libros, sino complementarlos. Su objetivo es servir como obra de apoyo y referencia, tanto para el alumnado que se enfrenta a la prueba como para el profesorado que planifica, imparte y evalúa la materia. Por ello, cada uno de sus capítulos se ha construido con un criterio fundamental: ajustarse con precisión a los contenidos, enfoques y límites establecidos en las directrices oficiales, sin renunciar por ello al rigor científico ni a la claridad conceptual.

La Física que aquí se presenta es una Física modelizada, consciente de sus dominios de validez. Se enfatiza que las leyes físicas no son verdades absolutas, sino herramientas intelectuales que permiten describir determinados fenómenos bajo condiciones bien definidas. Esta idea, central en la ciencia moderna, es también clave para comprender por qué en este manual no aparecen desarrollos matemáticos avanzados, operadores diferenciales o formalismos propios de etapas universitarias. No porque carezcan de valor, sino porque no forman parte del lenguaje ni de los objetivos de la Física de 2.º de Bachillerato, ni son exigibles en la PAU.

El lector encontrará, por tanto, una exposición deliberadamente cuidada del lenguaje físico y matemático. Las magnitudes vectoriales se tratan como tales, se insiste en el significado físico de los signos, de las unidades y de los resultados, y se evita cualquier automatismo que convierta la resolución de problemas en un ejercicio puramente algebraico. En este sentido, el manual presta especial atención a los errores conceptuales más frecuentes, a las confusiones habituales entre magnitudes escalares y vectoriales, y a aquellas

interpretaciones incorrectas que, aun siendo comunes, son penalizadas de forma sistemática en la corrección de la prueba.

Uno de los rasgos distintivos de esta obra es la independencia conceptual de sus epígrafes. Cada apartado ha sido concebido como una unidad coherente en sí misma, con un desarrollo completo y autónomo, evitando repeticiones innecesarias y solapamientos conceptuales. Esta estructura responde a una doble finalidad: facilitar el estudio selectivo por parte del alumnado y permitir al profesorado utilizar el manual como material de consulta puntual, sin necesidad de una lectura lineal continua.

Asimismo, el manual adopta una perspectiva claramente alineada con el diseño competencial de la prueba. La Física no se presenta como un catálogo de fórmulas, sino como un sistema de relaciones entre magnitudes, principios de conservación, modelos explicativos y criterios de validez. Se fomenta la comprensión de los fenómenos físicos cotidianos, la interpretación razonada de situaciones concretas y la capacidad de anticipar cómo cambian los resultados cuando se modifican las condiciones iniciales, aspectos todos ellos explícitamente valorados en la PAU.

Finalmente, este libro es también una reivindicación del valor formativo de la Física en el tramo final de la educación secundaria. Más allá de su función evaluadora, la Física enseña a razonar con rigor, a distinguir entre hipótesis y conclusiones, a manejar modelos abstractos y a aceptar que todo conocimiento científico está sujeto a límites y condiciones. En un contexto educativo marcado por la inmediatez y la fragmentación, este manual apuesta por una Física pensada, argumentada y comprendida, accesible pero no simplificada, exigente pero no innecesariamente compleja.

Si este manual logra ayudar al alumnado a comprender mejor la Física que estudia, y al profesorado a disponer de una referencia clara, ajustada y honesta con respecto a lo que realmente se evalúa, habrá cumplido plenamente su propósito.

MIGUEL MARTÍNEZ MATEO

BLOQUE A. CAMPO GRAVITATORIO

Capítulo 1. Interacción gravitatoria y campo gravitatorio

1. Ley de Gravitación Universal

La interacción gravitatoria es una de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza y se manifiesta entre todos los cuerpos que poseen masa. A diferencia de otras interacciones, como la eléctrica o la magnética, la gravitación actúa siempre de forma atractiva y tiene alcance universal: cualquier par de masas del Universo se atrae mutuamente, independientemente de su tamaño, composición o estado físico. Esta universalidad convierte a la interacción gravitatoria en el marco fundamental para describir el movimiento de planetas, satélites, estrellas y galaxias, así como numerosos fenómenos físicos en escalas cotidianas.

El establecimiento de una ley cuantitativa que describa la interacción gravitatoria constituye uno de los hitos más importantes en la historia de la Física. Dicha ley fue formulada en el siglo XVII por Isaac Newton, quien logró unificar bajo un mismo principio el movimiento de los cuerpos en la Tierra y el movimiento de los cuerpos celestes. Esta unificación supuso un cambio radical en la forma de entender la naturaleza y sentó las bases de la Física clásica.

Antes de Newton, Galileo Galilei había estudiado experimentalmente el movimiento de los cuerpos en caída libre, estableciendo que, en ausencia de rozamiento, todos los cuerpos caen con la misma aceleración, independientemente de su masa. Sin embargo, Galileo no formuló una ley de interacción entre masas. Fue Newton quien dio el paso decisivo al proponer que la misma fuerza responsable de la caída de los cuerpos en la Tierra es la que mantiene a la Luna en su órbita alrededor de la Tierra y a los planetas girando alrededor del Sol.

La Ley de Gravitación Universal afirma que dos cuerpos puntuales de masas m_1 y m_2, separados una distancia r, se atraen mutuamente con una fuerza cuyo módulo es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Matemáticamente, el módulo de la fuerza gravitatoria viene dado por

$$F = G\,\frac{m_1\,m_2}{r^2}$$

donde G es la constante de gravitación universal, una constante fundamental de la naturaleza. Su valor en el Sistema Internacional es

$$G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ Nm^2\mathrm{kg}^{-2}$$

El valor extremadamente pequeño de esta constante explica por qué la interacción gravitatoria es despreciable entre objetos cotidianos y solo resulta dominante cuando intervienen masas muy grandes, como planetas o estrellas.

La fuerza gravitatoria es una magnitud vectorial, lo que implica que debe describirse mediante módulo, dirección y sentido. La dirección de la fuerza es la de la recta que une los centros de los dos cuerpos que interactúan, y su sentido es siempre atractivo, dirigido hacia el otro cuerpo. La expresión vectorial de la fuerza gravitatoria que ejerce el cuerpo de masa m_1 sobre el cuerpo de masa m_2 puede escribirse como

$$\mathbf{F}_{1\to 2} = -\,G\,\frac{m_1\,m_2}{r^2}\,\hat{\mathbf{r}}$$

donde $\hat{\mathbf{r}}$ es el versor radial dirigido desde el cuerpo m_1 hacia el cuerpo m_2. El signo negativo indica que la fuerza tiene sentido opuesto al del versor, es decir, apunta hacia el cuerpo que genera la interacción. La fuerza que ejerce m_2 sobre m_1 tiene el mismo módulo y sentido opuesto, en cumplimiento del principio de acción y reacción, uno de los pilares de la dinámica newtoniana.

La ley de gravitación universal se formula inicialmente para masas puntuales, es decir, cuerpos cuyas dimensiones son despreciables frente a la distancia que los separa. Sin embargo, esta ley puede extenderse a cuerpos extensos mediante un tratamiento adecuado. En el caso de cuerpos esféricos con distribución de masa uniforme, o con simetría esférica, la interacción gravitatoria externa es equivalente a la que se obtendría si toda la masa estuviera concentrada en el centro geométrico del cuerpo. Este resultado permite aplicar la ley de Newton a planetas y estrellas con gran precisión en el nivel de 2.º de Bachillerato.

Un aspecto esencial de la ley de gravitación universal es su carácter universal. La constante G tiene el mismo valor en cualquier punto del Universo y para cualquier par de masas. Esta universalidad fue confirmada experimentalmente a finales del siglo XVIII por Henry Cavendish, quien midió por primera vez el valor de la constante de gravitación mediante un experimento de balanza de torsión. Gracias a este experimento fue posible, además, estimar la masa de la Tierra, lo que supuso un avance extraordinario para la Física de la época.

La dependencia de la fuerza gravitatoria con el inverso del cuadrado de la distancia tiene profundas consecuencias físicas. Esta ley de tipo "inverso del cuadrado" implica que la fuerza disminuye rápidamente al aumentar la distancia entre los cuerpos, pero nunca se anula completamente. Como consecuencia, la interacción gravitatoria tiene alcance infinito, aunque su efecto sea cada vez más débil a grandes distancias. Este hecho explica por qué cuerpos extremadamente lejanos pueden influirse mutuamente, como ocurre en sistemas astronómicos a gran escala.

La ley de gravitación universal permite explicar una enorme variedad de fenómenos físicos. En el ámbito terrestre, describe el peso de los cuerpos como la fuerza gravitatoria que ejerce la Tierra sobre ellos. En el ámbito astronómico, explica el movimiento de los planetas

alrededor del Sol, el movimiento de los satélites alrededor de los planetas y la estructura de sistemas estelares. La capacidad de una única ley para explicar fenómenos tan diversos es una de las razones por las que la formulación de Newton se considera uno de los mayores logros intelectuales de la historia.

Es importante destacar que la ley de gravitación universal es una ley empírica, deducida a partir de la observación y la experimentación, y no una consecuencia matemática de principios más fundamentales dentro de la Física clásica. Su validez ha sido confirmada en innumerables experimentos y observaciones, aunque en el siglo XX fue reformulada conceptualmente en el marco de la Teoría de la Relatividad General de Albert Einstein. No obstante, en el dominio de velocidades pequeñas comparadas con la velocidad de la luz y campos gravitatorios no extremos, la ley de Newton proporciona resultados extraordinariamente precisos y sigue siendo plenamente válida en el nivel de Bachillerato.

Desde el punto de vista didáctico, la ley de gravitación universal introduce varias ideas clave que reaparecerán a lo largo del curso. En primer lugar, muestra cómo una interacción puede describirse mediante una ley matemática simple. En segundo lugar, pone de manifiesto la importancia de las magnitudes vectoriales en la descripción de las fuerzas. Finalmente, establece una conexión directa entre fuerza, masa y movimiento, que será esencial para comprender el concepto de campo gravitatorio y, más adelante, el movimiento orbital.

En la resolución de problemas de la PAU relacionados con la ley de gravitación universal, es fundamental identificar correctamente las masas que interactúan, la distancia entre sus centros y la dirección de la fuerza gravitatoria. También es importante recordar que la fuerza gravitatoria actúa siempre a lo largo de la línea que une las masas y que su sentido es atractivo. Un planteamiento claro y ordenado, acompañado de un esquema de fuerzas, suele ser decisivo para obtener la solución correcta.

La ley de gravitación universal no solo describe una interacción física concreta, sino que representa un ejemplo paradigmático del método científico: observación de regularidades, formulación de una ley matemática, contraste experimental y aplicación a fenómenos diversos. Su estudio constituye el punto de partida natural para el análisis del campo gravitatorio, que permitirá describir la interacción gravitatoria como una propiedad del espacio y no solo como una fuerza entre cuerpos.

Con la formulación de la ley de gravitación universal queda establecida la base conceptual necesaria para introducir, en el siguiente epígrafe, el concepto de intensidad de campo gravitatorio, que permitirá describir de forma más general y eficaz la acción de la gravedad sobre los cuerpos.

2.Intensidad de campo gravitatorio

La formulación de la Ley de Gravitación Universal permite describir la interacción gravitatoria como una fuerza mutua entre dos masas. Sin embargo, este enfoque presenta una limitación conceptual importante: obliga a considerar siempre pares de cuerpos que

interactúan directamente entre sí. Para superar esta dificultad y proporcionar una descripción más general y eficaz de la gravitación, se introduce el concepto de campo gravitatorio. Este concepto permite atribuir la acción gravitatoria no a una interacción directa entre cuerpos, sino a una propiedad del espacio asociada a la presencia de masa.

El campo gravitatorio se define como la región del espacio en la que una masa experimenta una fuerza gravitatoria. Cada cuerpo con masa modifica el espacio que lo rodea, de modo que cualquier otra masa situada en ese espacio queda sometida a la acción de la gravedad. Esta forma de describir la interacción es conceptualmente más potente que la formulación directa de fuerzas, ya que separa claramente la causa del fenómeno, la masa que genera el campo, del efecto, la fuerza que actúa sobre una masa situada en dicho campo.

Intensidad de campo gravitatorio

Para caracterizar cuantitativamente el campo gravitatorio se introduce la intensidad de campo gravitatorio, que se representa mediante el vector **g**. La intensidad de campo gravitatorio en un punto se define como la fuerza gravitatoria por unidad de masa que experimentaría una masa de prueba situada en ese punto. Matemáticamente, esta definición se expresa como

$$\mathbf{g} = \frac{\mathbf{F}}{m}$$

donde **F** es la fuerza gravitatoria que actúa sobre una masa de prueba m. Esta masa debe ser lo suficientemente pequeña como para no alterar el campo existente, de forma análoga a como se hace en la definición del campo eléctrico. La intensidad de campo gravitatorio es, por tanto, una magnitud vectorial, definida en cada punto del espacio, independiente de la masa que se utilice para medirla.

Las unidades de la intensidad de campo gravitatorio en el Sistema Internacional son newton por kilogramo ($\mathrm{N}\cdot Kg^{-1}$). Estas unidades son equivalentes a metros por segundo al cuadrado ($\mathrm{m}\cdot s^{-2}$), lo que pone de manifiesto que la intensidad de campo gravitatorio puede interpretarse también como la aceleración que experimenta una masa cuando se encuentra sometida únicamente a la acción de la gravedad.

A partir de la Ley de Gravitación Universal puede obtenerse la expresión de la intensidad de campo gravitatorio creado por una masa puntual M. La fuerza gravitatoria que ejerce esta masa sobre una masa de prueba m, situada a una distancia r, viene dada por

$$F = G\,\frac{M\,m}{r^2}$$

Dividiendo esta expresión entre la masa de prueba m, se obtiene el módulo de la intensidad de campo gravitatorio:

$$g = G\,\frac{M}{r^2}$$

La expresión vectorial completa del campo gravitatorio es

$$\mathbf{g} = -G\,\frac{M}{r^2}\,\hat{\mathbf{r}}$$

donde $\hat{\mathbf{r}}$ es el versor radial dirigido desde la masa que genera el campo hacia el punto considerado. El signo negativo indica que el campo gravitatorio tiene siempre sentido atractivo, apuntando hacia la masa que lo genera. Esta característica distingue al campo gravitatorio de otros campos físicos, como el eléctrico, que puede ser atractivo o repulsivo.

La expresión obtenida muestra que la intensidad del campo gravitatorio depende únicamente de la masa que genera el campo y de la distancia al punto considerado. No depende de la masa de prueba utilizada para medirlo, lo que refuerza la idea de que el campo es una propiedad del espacio y no del cuerpo que lo experimenta. Esta independencia es fundamental para comprender el carácter universal de la gravedad.

Un caso de especial interés es el campo gravitatorio terrestre. En las proximidades de la superficie de la Tierra, la intensidad del campo gravitatorio tiene un valor aproximadamente constante, cuyo módulo se designa habitualmente por g y vale

$$g \approx 9{,}8\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$$

Este valor representa la aceleración que experimenta cualquier cuerpo en caída libre cerca de la superficie terrestre, en ausencia de rozamiento. La constancia aproximada de g se debe a que, en escalas de altura pequeñas comparadas con el radio terrestre, la distancia al centro de la Tierra puede considerarse prácticamente constante. Esta aproximación es válida en el ámbito de la Física de Bachillerato y se utilizará de forma sistemática en problemas de movimiento vertical.

La dirección del vector $\mathbf{g}$ en el campo gravitatorio terrestre es aproximadamente vertical y su sentido es hacia el centro de la Tierra. En muchos problemas se toma un sistema de referencia en el que el eje vertical positivo apunta hacia arriba, de modo que el vector $\mathbf{g}$ tiene componente negativa. La correcta elección del sistema de referencia y la interpretación del signo de $\mathbf{g}$ son aspectos importantes en la resolución de ejercicios.

El concepto de intensidad de campo gravitatorio permite reinterpretar el peso de un cuerpo de forma más profunda. El peso no es una propiedad intrínseca del cuerpo, sino la fuerza gravitatoria que actúa sobre él debido al campo gravitatorio terrestre. El peso $\mathbf{P}$ de un cuerpo de masa m situado en un campo gravitatorio $\mathbf{g}$ se expresa como

$$\mathbf{P} = m\,\mathbf{g}$$

Esta expresión muestra que el peso depende tanto de la masa del cuerpo como del campo gravitatorio en el que se encuentra. Por esta razón, un mismo cuerpo tiene pesos distintos en la Tierra, en la Luna o en otros cuerpos celestes, aunque su masa permanezca constante. Esta distinción entre masa y peso es fundamental en Física y constituye una fuente habitual de errores conceptuales si no se maneja con cuidado.

La intensidad de campo gravitatorio permite también comprender de forma natural los resultados experimentales obtenidos por Galileo Galilei sobre la caída libre de los cuerpos. Dado que la aceleración que experimenta un cuerpo en un campo gravitatorio es independiente de su masa, todos los cuerpos caen con la misma aceleración cuando se encuentran sometidos únicamente a la acción de la gravedad. Este hecho, que resulta sorprendente desde el punto de vista intuitivo, se explica directamente a partir de la definición de **g**.

El campo gravitatorio puede representarse gráficamente mediante líneas de campo. Estas líneas son curvas imaginarias tales que el vector **g** es tangente a la línea en cada punto. En el caso de una masa puntual, las líneas de campo son rectas que convergen radialmente hacia la masa. La densidad de líneas es mayor en las regiones donde el campo es más intenso, lo que proporciona una representación cualitativa del módulo del campo.

En el campo gravitatorio terrestre, las líneas de campo son aproximadamente paralelas y verticales cerca de la superficie, lo que refleja el carácter prácticamente uniforme del campo en esa región. Esta representación visual resulta útil para comprender la dirección de la fuerza gravitatoria y para interpretar el movimiento de los cuerpos bajo su acción.

Desde el punto de vista conceptual, la introducción del campo gravitatorio supone un cambio importante en la forma de entender la gravitación. En lugar de pensar en una interacción directa entre dos masas separadas por una distancia, se considera que una masa crea un campo en el espacio y que otra masa responde a ese campo. Esta idea, introducida de forma sistemática por Michael Faraday en el contexto del electromagnetismo y adoptada posteriormente en la gravitación, constituye uno de los pilares de la Física moderna.

En la resolución de problemas de la PAU relacionados con la intensidad de campo gravitatorio, es habitual que se pida calcular el valor de **g** en un punto debido a una masa conocida o que se determine la fuerza que actúa sobre una masa situada en un campo gravitatorio dado. En estos casos, es esencial distinguir claramente entre fuerza y campo, y utilizar correctamente las expresiones vectoriales.

Un error frecuente consiste en confundir la intensidad de campo gravitatorio con la aceleración de un cuerpo en cualquier situación. Aunque ambas magnitudes coinciden cuando la única fuerza que actúa es la gravitatoria, dejan de coincidir cuando intervienen otras fuerzas, como la normal o el rozamiento. Mantener clara esta distinción es fundamental para un uso correcto del concepto de campo gravitatorio.

La intensidad de campo gravitatorio constituye, por tanto, una herramienta conceptual y matemática esencial para describir la gravitación de forma general. Su introducción permite avanzar hacia formulaciones más potentes, como el principio de superposición y el estudio del potencial gravitatorio, que se abordarán en epígrafes posteriores sin necesidad de modificar las ideas fundamentales aquí establecidas.

3. Principio de superposición

La Ley de Gravitación Universal y el concepto de intensidad de campo gravitatorio permiten describir la interacción gravitatoria entre una masa y su entorno. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones físicas reales no interviene una única masa aislada, sino sistemas formados por varias masas que contribuyen simultáneamente a la interacción gravitatoria. Para abordar correctamente estos casos es necesario introducir un principio fundamental que permite combinar los efectos de varias masas de forma coherente y rigurosa: el principio de superposición.

El principio de superposición establece que, cuando varias masas generan simultáneamente un campo gravitatorio, el efecto total en un punto del espacio es la suma de los efectos individuales producidos por cada una de esas masas por separado. Este principio es una consecuencia directa del carácter lineal de la interacción gravitatoria en el marco de la Física clásica y constituye una herramienta esencial para el análisis de sistemas gravitatorios complejos.

Desde el punto de vista conceptual, el principio de superposición implica que cada masa crea su propio campo gravitatorio de manera independiente, sin verse afectada por la presencia de otras masas. El campo gravitatorio total en un punto no se obtiene mediante una combinación no lineal o mediante un promedio, sino mediante una suma vectorial de los campos creados por cada masa individualmente. Esta idea resulta especialmente poderosa, ya que permite descomponer problemas aparentemente complejos en la suma de situaciones más simples.

Para formular matemáticamente el principio de superposición, consideremos un conjunto de masas puntuales $M_1, M_2, M_3, \ldots$, cada una de las cuales genera un campo gravitatorio en el espacio. En un punto determinado P, cada masa crea una intensidad de campo gravitatorio $\mathbf{g}_1$, $\mathbf{g}_2$, $\mathbf{g}_3$, etc. El campo gravitatorio total $\mathbf{g}_{\text{total}}$ en el punto P viene dado por

$$\mathbf{g}_{\text{total}} = \mathbf{g}_1 + \mathbf{g}_2 + \mathbf{g}_3 + \cdots$$

Esta expresión debe interpretarse como una suma vectorial, lo que implica que no solo se suman los módulos de los campos, sino también sus direcciones y sentidos. Por tanto, la orientación espacial de cada contribución es tan importante como su intensidad.

Cada uno de los campos individuales puede expresarse, en el caso de masas puntuales, mediante la expresión deducida anteriormente para la intensidad de campo gravitatorio:

$$\mathbf{g}_i = -\,G\,\frac{M_i}{r_i^2}\,\hat{\mathbf{r}}_i$$

donde r_i es la distancia desde la masa M_i hasta el punto considerado y $\hat{\mathbf{r}}_i$ es el versor radial dirigido desde dicha masa hacia el punto P. El signo negativo indica que cada contribución del campo apunta hacia la masa que la genera.

El principio de superposición es válido tanto para el campo gravitatorio como para la fuerza gravitatoria. Si una masa de prueba m se sitúa en una región del espacio donde actúan varias masas, la fuerza total que experimenta es la suma vectorial de las fuerzas ejercidas por cada una de ellas:

$$\mathbf{F}_{\text{total}} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3 + \cdots$$

Dividiendo esta expresión entre la masa de prueba m, se recupera de forma natural la expresión del campo gravitatorio total, lo que refuerza la coherencia interna del concepto de campo y su relación con la fuerza.

Desde el punto de vista físico, el principio de superposición permite explicar fenómenos como la anulación parcial o total del campo gravitatorio en determinadas regiones del espacio. Por ejemplo, en un punto situado exactamente en el centro de dos masas iguales colocadas simétricamente, las contribuciones de ambas masas pueden tener el mismo módulo pero sentidos opuestos, dando lugar a un campo gravitatorio resultante nulo. Este tipo de situaciones solo puede analizarse correctamente cuando se tiene en cuenta el carácter vectorial del campo.

Un caso especialmente relevante en Física de Bachillerato es el estudio del campo gravitatorio creado por sistemas de masas con simetría. En estos sistemas, el principio de superposición, combinado con consideraciones geométricas, permite simplificar enormemente el análisis. Por ejemplo, en distribuciones simétricas de masa, muchas de las contribuciones al campo se cancelan entre sí, quedando únicamente una componente resultante bien definida.

El principio de superposición desempeña un papel clave en la interpretación del campo gravitatorio terrestre. Aunque la Tierra no es una masa puntual, puede considerarse, en primera aproximación, como un conjunto de elementos de masa distribuidos en su volumen. El campo gravitatorio total en un punto exterior a la Tierra es el resultado de la superposición de los campos creados por cada uno de esos elementos. Gracias a la simetría aproximadamente esférica del planeta, el resultado final es equivalente al campo que produciría una masa puntual situada en su centro, como ya se ha indicado en epígrafes anteriores.

La validez del principio de superposición fue confirmada experimentalmente de forma indirecta a lo largo de los siglos XVIII y XIX, a medida que se acumulaban evidencias de que la gravitación se comporta de manera lineal en una amplia variedad de situaciones. Científicos como Pierre-Simon Laplace y Joseph-Louis Lagrange utilizaron este principio de forma sistemática para analizar sistemas gravitatorios complejos, especialmente en el estudio del movimiento de cuerpos celestes.

Es importante destacar que el principio de superposición no es una propiedad universal de todas las interacciones físicas. Existen interacciones en las que los efectos no se combinan de forma lineal. El hecho de que la gravitación clásica obedezca al principio de

superposición es una de las razones por las que resulta matemáticamente tratable y conceptualmente clara en el nivel de la Física clásica. En cursos posteriores se verá que, en contextos más avanzados, como la relatividad general, esta linealidad deja de cumplirse estrictamente. No obstante, en el ámbito de la Física de Bachillerato, el principio de superposición es plenamente válido y constituye una herramienta fundamental.

Desde el punto de vista didáctico, el principio de superposición refuerza la importancia del análisis vectorial en Física. No basta con calcular módulos de fuerzas o campos; es imprescindible representar direcciones, sentidos y ángulos para obtener resultados correctos. En la resolución de problemas de la PAU, este aspecto suele ser determinante, ya que muchos errores provienen de una suma incorrecta de vectores o de una interpretación incompleta de la geometría del problema.

Un procedimiento habitual en la aplicación del principio de superposición consiste en seguir una secuencia ordenada de pasos: en primer lugar, se identifica cada masa que contribuye al campo; en segundo lugar, se calcula el campo gravitatorio creado por cada una de ellas en el punto de interés; a continuación, se representa gráficamente cada vector $\mathbf{g}$; finalmente, se realiza la suma vectorial para obtener el campo total. Este método sistemático permite abordar problemas complejos con seguridad y claridad.

El principio de superposición también resulta esencial para comprender la noción de campo resultante en sistemas dinámicos. En el estudio del movimiento de un cuerpo sometido a la acción de varias masas, la aceleración del cuerpo viene determinada por el campo gravitatorio total en cada punto de su trayectoria. Este enfoque permite analizar el movimiento sin necesidad de considerar por separado cada interacción, lo que simplifica notablemente el planteamiento del problema.

En el contexto de la PAU, los ejercicios relacionados con el principio de superposición suelen plantear configuraciones sencillas, como dos o tres masas puntuales situadas en posiciones bien definidas. Aunque el planteamiento matemático es accesible, la correcta interpretación física exige atención al carácter vectorial del campo y a la geometría del sistema. La claridad en el razonamiento y la justificación de cada paso son aspectos especialmente valorados en la corrección.

Desde una perspectiva más amplia, el principio de superposición constituye un ejemplo paradigmático de cómo la Física construye modelos complejos a partir de leyes simples. Al combinar una ley fundamental, la ley de gravitación universal, con un principio general, la superposición, es posible describir sistemas de enorme complejidad, desde la estructura del Sistema Solar hasta la dinámica de sistemas estelares múltiples.

Con la introducción del principio de superposición se completa el estudio del campo gravitatorio desde el punto de vista de la interacción y del campo. Los conceptos desarrollados en este capítulo proporcionan la base necesaria para abordar, en los capítulos siguientes, el análisis energético del campo gravitatorio y el estudio del movimiento orbital, sin necesidad de modificar ni ampliar los principios fundamentales aquí establecidos.

Capítulo 2. Energía potencial gravitatoria

1. Campo conservativo

En el estudio de los campos gravitatorios, una vez introducidos los conceptos de fuerza gravitatoria, intensidad de campo y superposición, resulta natural plantearse cómo se comporta la energía asociada a los cuerpos que se mueven bajo la acción de la gravedad. Para ello es imprescindible introducir una noción fundamental en Física: la de campo conservativo. Este concepto permite describir la interacción gravitatoria desde un punto de vista energético y constituye la base para definir, en epígrafes posteriores, el potencial gravitatorio y la energía potencial gravitatoria.

Un campo de fuerzas se denomina conservativo cuando el trabajo realizado por la fuerza asociada al campo sobre un cuerpo que se desplaza entre dos puntos depende únicamente de la posición inicial y final, y no del camino seguido entre dichos puntos. Esta propiedad tiene consecuencias profundas, tanto conceptuales como prácticas, ya que permite asociar una energía potencial al campo y establecer principios de conservación de la energía mecánica.

Antes de centrarnos en el campo gravitatorio, conviene precisar el significado físico del trabajo de una fuerza. El trabajo W realizado por una fuerza $\mathbf{F}$ cuando un cuerpo experimenta un desplazamiento elemental $\mathbf{dr}$ se define, en general, como el producto escalar entre ambos vectores. En un desplazamiento finito, el trabajo total es la suma de los trabajos elementales realizados a lo largo de la trayectoria. En el nivel de 2.º de Bachillerato, esta idea se maneja de forma conceptual y, en muchos casos, mediante expresiones sencillas en situaciones rectilíneas.

En un campo conservativo, si un cuerpo se desplaza desde un punto A hasta un punto B siguiendo dos trayectorias distintas, el trabajo total realizado por la fuerza del campo es el mismo en ambos casos. Esta propiedad implica que, si el cuerpo recorre una trayectoria cerrada y vuelve al punto de partida, el trabajo total realizado por la fuerza es nulo. Este resultado es una de las características más claras y operativas de los campos conservativos.

El campo gravitatorio es un ejemplo paradigmático de campo conservativo en el marco de la Física clásica. La fuerza gravitatoria que actúa sobre un cuerpo depende únicamente de la posición del cuerpo en el campo y no de su velocidad ni de la trayectoria seguida previamente. Como consecuencia, el trabajo realizado por la fuerza gravitatoria al mover un cuerpo entre dos puntos depende solo de la distancia radial entre dichos puntos y no del recorrido concreto realizado.

Para ilustrar esta idea, consideremos un cuerpo que se mueve en el campo gravitatorio creado por una masa puntual M. Si el cuerpo se desplaza desde una posición inicial a una posición final situadas a distancias distintas del centro de la masa, el trabajo de la fuerza gravitatoria será el mismo tanto si el cuerpo se mueve directamente en línea recta como si

sigue una trayectoria curva. Esta independencia del camino es precisamente la condición que define el carácter conservativo del campo gravitatorio.

El carácter conservativo del campo gravitatorio fue implícitamente utilizado por Isaac Newton en sus análisis del movimiento planetario, aunque el lenguaje energético se desarrolló con mayor claridad en los siglos posteriores. Científicos como Gottfried Wilhelm Leibniz y Jean d'Alembert contribuyeron a la formulación de principios energéticos que permitieron reinterpretar la dinámica desde una perspectiva más general, complementaria a las leyes de Newton.

Una consecuencia inmediata de que el campo gravitatorio sea conservativo es la posibilidad de definir una energía potencial gravitatoria asociada a la posición de un cuerpo en el campo. Aunque la expresión concreta de dicha energía se estudiará en el epígrafe siguiente, es importante comprender desde ahora que esta energía potencial no es una propiedad intrínseca del cuerpo, sino del sistema formado por el cuerpo y la masa que genera el campo. Esta idea evita interpretaciones erróneas y será clave en el estudio de la conservación de la energía.

Desde un punto de vista más formal, el trabajo realizado por una fuerza conservativa al mover un cuerpo entre dos puntos puede expresarse como la variación negativa de una magnitud escalar llamada energía potencial.

$$W = -\Delta E_p$$

Es decir, cuando la fuerza realiza trabajo positivo, la energía potencial del sistema disminuye, y cuando la fuerza realiza trabajo negativo, la energía potencial aumenta. Esta relación cualitativa entre trabajo y energía es fundamental para la interpretación física de los procesos gravitatorios.

El carácter conservativo del campo gravitatorio permite también definir niveles de energía potencial y comparar estados distintos de un mismo sistema. Por ejemplo, elevar un cuerpo en el campo gravitatorio terrestre implica realizar un trabajo contra la fuerza de la gravedad, lo que se traduce en un aumento de la energía potencial del sistema. Al dejar caer el cuerpo, la fuerza gravitatoria realiza trabajo positivo y la energía potencial se transforma en energía cinética.

Es importante destacar que el hecho de que un campo sea conservativo no implica que la energía mecánica total de un cuerpo se conserve en cualquier situación. La conservación de la energía mecánica solo se cumple cuando las únicas fuerzas que realizan trabajo son conservativas. Si actúan fuerzas no conservativas, como el rozamiento, la energía mecánica deja de conservarse, aunque el campo gravitatorio siga siendo conservativo. Esta distinción es esencial y será retomada con mayor detalle en capítulos posteriores.

Desde el punto de vista experimental, el carácter conservativo del campo gravitatorio se manifiesta en la reproducibilidad de los resultados energéticos. Si un cuerpo se eleva hasta una cierta altura y luego se deja caer, la velocidad con la que llega a un punto determinado

depende únicamente de la diferencia de altura y no del camino seguido previamente. Esta observación, conocida desde la época de Galileo, encuentra su explicación teórica natural en el carácter conservativo del campo gravitatorio.

En problemas de la PAU, el concepto de campo conservativo suele aparecer de forma implícita, aunque en ocasiones se pide expresamente identificar si un campo es o no conservativo. En el caso del campo gravitatorio, la respuesta es afirmativa siempre que se trabaje en el marco de la gravitación newtoniana. Reconocer esta propiedad permite simplificar enormemente el planteamiento de los problemas, ya que evita tener que analizar trayectorias concretas.

Un error frecuente consiste en confundir el carácter conservativo del campo con la ausencia de fuerzas disipativas. El campo gravitatorio sigue siendo conservativo incluso cuando actúan fuerzas como el rozamiento; lo que ocurre en ese caso es que el rozamiento realiza trabajo no conservativo, impidiendo la conservación de la energía mecánica. Mantener clara esta distinción es fundamental para un uso correcto de los principios energéticos.

Desde una perspectiva histórica, la introducción del concepto de campo conservativo y de energía potencial supuso un avance decisivo en la comprensión de la naturaleza. Permitió unificar fenómenos aparentemente distintos bajo principios comunes y facilitó el desarrollo de nuevas herramientas matemáticas y conceptuales. Aunque en cursos posteriores se abordarán formulaciones más generales, el tratamiento presentado aquí es plenamente adecuado para el nivel de 2.º de Bachillerato y para la preparación de la PAU.

En resumen, el campo gravitatorio es un campo conservativo, lo que significa que el trabajo realizado por la fuerza gravitatoria depende únicamente de las posiciones inicial y final del cuerpo, y no del camino seguido. Esta propiedad permite definir una energía potencial asociada al campo y establecer principios de conservación que simplifican enormemente el análisis del movimiento bajo la acción de la gravedad. Con esta base conceptual, en el siguiente epígrafe se introducirá formalmente el concepto de potencial gravitatorio, que permitirá describir el campo gravitatorio mediante una magnitud escalar.

2. Potencial gravitatorio

El concepto de potencial gravitatorio surge de manera natural una vez establecido que el campo gravitatorio es un campo conservativo. En un campo de estas características, el trabajo realizado por la fuerza gravitatoria al desplazar un cuerpo entre dos puntos no depende del camino seguido, sino únicamente de las posiciones inicial y final. Esta propiedad permite introducir una magnitud escalar que describe el estado energético del campo en cada punto del espacio: el potencial gravitatorio.

El potencial gravitatorio, que se representa habitualmente por la letra V, se define como la energía potencial gravitatoria por unidad de masa asociada a una determinada posición en el campo gravitatorio. De este modo, el potencial gravitatorio no depende de la masa del cuerpo que se sitúa en el campo, sino exclusivamente del campo creado por la masa

o masas que lo generan. Esta definición refuerza la idea de que el potencial es una propiedad del espacio y no del cuerpo que se mueve en él.

Desde un punto de vista matemático, el potencial gravitatorio en un punto se define como

$$V = \frac{E_p}{m}$$

donde $E_p$es la energía potencial gravitatoria de una masa de prueba $m$situada en ese punto. La unidad del potencial gravitatorio en el Sistema Internacional es el julio por kilogramo ($J \cdot kg^{-1}$).

La definición de potencial gravitatorio está estrechamente relacionada con el trabajo de la fuerza gravitatoria. En un campo conservativo, la variación de la energía potencial gravitatoria al pasar de un punto A a un punto B es igual al opuesto del trabajo realizado por la fuerza gravitatoria en ese desplazamiento. Es decir,

$$\Delta E_p = E_{p,B} - E_{p,A} = - W_{A \to B}$$

Dividiendo esta expresión entre la masa m, se obtiene la relación correspondiente para el potencial gravitatorio:

$$\Delta V = V_B - V_A = - \frac{W_{A \to B}}{m}$$

Esta relación muestra que el potencial gravitatorio permite calcular el trabajo de la fuerza gravitatoria sin necesidad de analizar trayectorias concretas, lo que constituye una de sus principales ventajas prácticas.

Para fijar un valor absoluto del potencial gravitatorio es necesario establecer un nivel de referencia, ya que solo las diferencias de potencial tienen significado físico directo. En el caso del campo gravitatorio creado por una masa puntual o por un cuerpo esférico, se adopta convencionalmente como referencia el potencial gravitatorio nulo en el infinito, es decir,

$$V(\infty) = 0$$

Esta elección resulta especialmente conveniente en problemas astronómicos y permite obtener expresiones simples y coherentes para el potencial gravitatorio.

Consideremos ahora una masa puntual M que genera un campo gravitatorio. El trabajo realizado por la fuerza gravitatoria al llevar una masa de prueba $m$desde el infinito hasta una distancia $r$del centro de la masa M permite calcular la energía potencial gravitatoria en ese punto. A partir de la ley de gravitación universal, se obtiene que la energía potencial gravitatoria del sistema viene dada por

$$E_p = - G \frac{M\, m}{r}$$

Dividiendo entre la masa m, se obtiene la expresión del potencial gravitatorio creado por una masa puntual:

$$V(r) = -G\frac{M}{r}$$

Esta expresión es válida para puntos situados fuera de la masa que genera el campo y constituye una de las fórmulas fundamentales del estudio del campo gravitatorio en 2.º de Bachillerato.

El signo negativo del potencial gravitatorio tiene un significado físico claro. Dado que se ha elegido el potencial nulo en el infinito, el potencial gravitatorio es negativo en cualquier punto finito del espacio. Esto refleja el carácter atractivo de la interacción gravitatoria: para separar una masa del cuerpo que genera el campo y llevarla hasta el infinito es necesario realizar un trabajo positivo contra la fuerza gravitatoria. Cuanto más cerca se encuentra la masa del centro que genera el campo, más negativo es el valor del potencial gravitatorio.

El potencial gravitatorio depende únicamente de la masa que genera el campo y de la distancia al punto considerado. No depende de la masa de prueba, lo que refuerza su carácter de magnitud asociada al campo y no al cuerpo. Esta propiedad lo convierte en una herramienta especialmente útil para describir sistemas gravitatorios de forma general.

En el caso del campo gravitatorio terrestre, la expresión exacta del potencial gravitatorio viene dada también por la fórmula anterior, tomando M como la masa de la Tierra y r como la distancia al centro del planeta. Sin embargo, en las proximidades de la superficie terrestre, donde las variaciones de altura son pequeñas comparadas con el radio de la Tierra, es habitual utilizar una aproximación más sencilla que se introducirá en el estudio de la energía potencial gravitatoria. En este epígrafe se mantiene la expresión general del potencial para preservar su validez en contextos más amplios.

El potencial gravitatorio permite introducir el concepto de superficie equipotencial. Una superficie equipotencial es el conjunto de puntos del espacio en los que el potencial gravitatorio tiene el mismo valor. En una superficie equipotencial, el desplazamiento de una masa no implica variación de energía potencial gravitatoria, ya que el potencial es constante. Como consecuencia, el trabajo realizado por la fuerza gravitatoria al mover una masa a lo largo de una superficie equipotencial es nulo.

En el caso del campo gravitatorio creado por una masa puntual, las superficies equipotenciales son esferas concéntricas centradas en la masa. Cada una de estas esferas corresponde a un valor constante del potencial gravitatorio. A medida que aumenta la distancia al centro, el valor del potencial se aproxima a cero desde valores negativos.

La relación entre el potencial y el campo gravitatorios se manifiesta también en la orientación relativa de las superficies equipotenciales y el vector campo **g**. En cualquier punto del espacio, el vector **g** es perpendicular a la superficie equipotencial que pasa por ese punto. Esta propiedad tiene una interpretación física clara: el campo gravitatorio apunta en la

dirección de máximo descenso del potencial, es decir, en la dirección en la que el potencial disminuye más rápidamente.

Aunque la relación matemática precisa entre campo y potencial se estudiará en el siguiente epígrafe para el caso unidimensional, es importante destacar desde ahora que el potencial proporciona una descripción escalar del campo, complementaria a la descripción vectorial proporcionada por **g**. Ambas descripciones contienen la misma información física, pero resultan más o menos adecuadas según el tipo de problema que se desee resolver.

Desde un punto de vista histórico, el desarrollo del concepto de potencial gravitatorio estuvo ligado a la evolución de la Mecánica analítica en los siglos XVIII y XIX. Científicos como Joseph-Louis Lagrange y William Rowan Hamilton contribuyeron decisivamente a la formulación de métodos energéticos que permitieron reformular la dinámica clásica de una manera más general. Aunque estos desarrollos exceden el nivel de Bachillerato, el potencial gravitatorio constituye una herencia directa de ese enfoque.

En la resolución de problemas de la PAU, el potencial gravitatorio se utiliza habitualmente para calcular variaciones de energía potencial o para determinar el trabajo de la fuerza gravitatoria entre dos puntos. En estos casos, es esencial manejar correctamente el signo del potencial y recordar que solo las diferencias de potencial tienen significado físico directo. La elección coherente del nivel de referencia es un aspecto clave del planteamiento.

Un error frecuente consiste en confundir potencial gravitatorio con energía potencial gravitatoria. Aunque ambas magnitudes están estrechamente relacionadas, no son equivalentes. El potencial gravitatorio es una magnitud por unidad de masa, mientras que la energía potencial gravitatoria depende de la masa del cuerpo considerado. Mantener clara esta distinción evita errores conceptuales y facilita la interpretación física de los resultados.

El potencial gravitatorio proporciona, además, una herramienta poderosa para analizar sistemas gravitatorios complejos sin recurrir directamente al cálculo de fuerzas. En muchos casos, conocer la variación del potencial es suficiente para obtener información relevante sobre el movimiento o el estado energético de un cuerpo en el campo gravitatorio.

En resumen, el potencial gravitatorio es una magnitud escalar que describe el estado energético del campo gravitatorio en cada punto del espacio. Se define como la energía potencial gravitatoria por unidad de masa y permite calcular de forma sencilla el trabajo de la fuerza gravitatoria y las variaciones de energía potencial. Su introducción constituye un paso fundamental en el estudio energético del campo gravitatorio y prepara el terreno para establecer, en el siguiente epígrafe, la relación cuantitativa entre el campo gravitatorio y el potencial en el caso unidimensional.

3. Teoremas energéticos en el campo gravitatorio

El estudio energético del movimiento en el campo gravitatorio no se limita a la definición de energía potencial o potencial gravitatorio, sino que alcanza su verdadera utilidad cuando se formulan teoremas generales que permiten relacionar fuerzas, trabajo y variaciones

de energía. Estos teoremas constituyen una de las herramientas más potentes de la Física clásica y ocupan un lugar central en los problemas de la Prueba de Acceso a la Universidad (PAU).

En este epígrafe se desarrollan de forma sistemática los teoremas energéticos fundamentales, aplicados al campo gravitatorio, incorporando tanto fuerzas conservativas como fuerzas no conservativas, entre las que se incluyen el rozamiento y cualquier fuerza exterior aplicada. El objetivo es disponer de un marco general que permita analizar el movimiento sin necesidad de recurrir siempre al estudio dinámico detallado.

Energía cinética y teorema de las fuerzas vivas

La energía cinética E_c de un cuerpo de masa m que se mueve con velocidad de módulo v se define como

$$E_c = \frac{1}{2}\, m\, v^2$$

Esta magnitud escalar mide la energía asociada al movimiento del cuerpo y depende únicamente de su masa y de su velocidad, independientemente de la causa que haya producido dicho movimiento.

El teorema de las fuerzas vivas, formulado en el siglo XVIII y estrechamente vinculado a los trabajos de Gottfried Wilhelm Leibniz, establece que el trabajo total realizado por todas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo es igual a la variación de su energía cinética. Matemáticamente, este teorema se expresa como

$$W_{\text{total}} = \Delta E_c$$

donde W_{total} representa la suma de los trabajos realizados por todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo durante el desplazamiento considerado.

Este teorema es completamente general y es válido independientemente de la naturaleza de las fuerzas que intervienen, ya sean conservativas o no conservativas. Constituye, por tanto, una formulación energética equivalente a la segunda ley de Newton, pero especialmente útil cuando interesa analizar cambios de velocidad sin estudiar explícitamente aceleraciones.

Energía potencial gravitatoria y energía mecánica

En el campo gravitatorio, además de energía cinética, los cuerpos pueden poseer energía potencial gravitatoria E_p, asociada a su posición en el campo. Como se ha visto en epígrafes anteriores, esta energía depende del sistema considerado y del nivel de referencia elegido.

Se define la energía mecánica E_m de un cuerpo como la suma de su energía cinética y su energía potencial:

$$E_m = E_c + E_p$$

La energía mecánica permite describir de forma compacta el estado energético del cuerpo y resulta especialmente útil cuando el campo gravitatorio es el agente principal del movimiento.

Teorema de conservación de la energía mecánica

Cuando un cuerpo se mueve bajo la acción exclusiva de fuerzas conservativas, como la fuerza gravitatoria, la energía mecánica del sistema permanece constante. Este resultado se conoce como teorema de conservación de la energía mecánica y se expresa matemáticamente como

$$E_{m,\text{inicial}} = E_{m,\text{final}}$$

o, de forma equivalente,

$$\Delta E_m = 0$$

Este teorema es una consecuencia directa del carácter conservativo del campo gravitatorio y permite resolver numerosos problemas sin necesidad de estudiar fuerzas y aceleraciones en cada punto de la trayectoria.

Es fundamental destacar que este teorema solo es válido cuando no actúan fuerzas no conservativas que realicen trabajo. En cuanto interviene una fuerza como el rozamiento o una fuerza exterior aplicada, la energía mecánica deja de conservarse.

Fuerzas no conservativas: rozamiento y fuerzas exteriores aplicadas

Se denominan fuerzas no conservativas aquellas para las que el trabajo realizado depende del camino seguido y no solo de las posiciones inicial y final. Entre las fuerzas no conservativas más habituales se encuentran: el rozamiento, las fuerzas exteriores aplicadas (empujes, tracciones, fuerzas motoras), y fuerzas disipativas en general.

El rozamiento es una fuerza que se opone al movimiento y transforma parte de la energía mecánica en energía interna, generalmente en forma de calor. Su trabajo es siempre negativo cuando actúa sobre un cuerpo en movimiento.

Por su parte, una fuerza exterior aplicada puede realizar trabajo positivo o negativo, dependiendo de su sentido respecto al desplazamiento. Estas fuerzas permiten suministrar energía al sistema o extraerla de él.

Trabajo de las fuerzas no conservativas

Cuando actúan fuerzas no conservativas, el trabajo total puede descomponerse como

$$W_{\text{total}} = W_{\text{cons}} + W_{\text{no cons}}$$

donde:

W_{cons} es el trabajo de las fuerzas conservativas (como la gravitatoria),

$W_{\text{no cons}}$ es el trabajo de las fuerzas no conservativas.

Aplicando el teorema de las fuerzas vivas,

$$W_{\text{cons}} + W_{\text{no cons}} = \Delta E_c$$

Como el trabajo de las fuerzas conservativas está relacionado con la variación de la energía potencial,

$$W_{\text{cons}} = -\Delta E_p$$

sustituyendo, se obtiene

$$-\Delta E_p + W_{\text{no cons}} = \Delta E_c$$

Reordenando términos, se llega a una de las expresiones más importantes del estudio energético:

$$\Delta E_c + \Delta E_p = W_{\text{no cons}}$$

Incremento de energía mecánica y fuerzas no conservativas

Dado que la energía mecánica es la suma de energía cinética y potencial,

$$E_m = E_c + E_p$$

la variación de energía mecánica viene dada por

$$\Delta E_m = \Delta E_c + \Delta E_p$$

Comparando con la expresión anterior, se obtiene la relación fundamental:

$$\boxed{\Delta E_m = W_{\text{no cons}}}$$

Esta ecuación establece que la variación de la energía mecánica de un sistema es igual al trabajo realizado por las fuerzas no conservativas.

Este resultado tiene una interpretación física clara:

Si $W_{\text{no cons}} = 0$, la energía mecánica se conserva;

Si $W_{\text{no cons}} < 0$, la energía mecánica disminuye (caso típico del rozamiento);

Si $W_{\text{no cons}} > 0$, la energía mecánica aumenta (caso de una fuerza exterior que aporta energía).

Aplicación al campo gravitatorio con rozamiento

En un movimiento vertical bajo la acción del campo gravitatorio y una fuerza de rozamiento, la energía mecánica inicial y final no coinciden. Parte de la energía se disipa debido al trabajo negativo del rozamiento.

En este caso, el planteamiento energético correcto no es aplicar conservación de la energía mecánica, sino utilizar la expresión general:

$$E_{m,f} = E_{m,i} + W_{\text{roz}}$$

donde W_{roz} es el trabajo del rozamiento, que suele ser negativo.

Este enfoque es esencial en problemas de PAU donde se combinan gravedad y rozamiento, ya que evita errores conceptuales frecuentes.

Relación entre teoremas energéticos

Es importante comprender que los distintos teoremas energéticos no son independientes entre sí, sino que forman un sistema coherente:

El teorema de las fuerzas vivas relaciona trabajo total y energía cinética.

El teorema de conservación de la energía mecánica es un caso particular del anterior cuando solo actúan fuerzas conservativas.

La expresión $\Delta E_m = W_{\text{no cons}}$ generaliza la conservación de la energía mecánica cuando intervienen fuerzas no conservativas.

Esta jerarquía conceptual permite elegir el planteamiento más adecuado según el tipo de fuerzas que actúan en cada problema.

Importancia en la resolución de problemas PAU

En la PAU, los problemas energéticos en el campo gravitatorio suelen requerir: identificar correctamente las fuerzas que actúan, distinguir entre fuerzas conservativas y no conservativas, aplicar el teorema adecuado, y justificar claramente cada paso del razonamiento.

Un error común consiste en aplicar la conservación de la energía mecánica cuando existe rozamiento o una fuerza exterior aplicada. La formulación correcta exige utilizar la relación entre variación de energía mecánica y trabajo de fuerzas no conservativas.

Los teoremas energéticos constituyen una herramienta fundamental para el análisis del movimiento en el campo gravitatorio. Permiten relacionar fuerzas, trabajo y energía de forma coherente y ofrecen una alternativa poderosa al estudio puramente dinámico. La inclusión explícita de fuerzas no conservativas, como el rozamiento o fuerzas exteriores aplicadas, proporciona un marco general que refleja con mayor fidelidad las situaciones físicas reales.

Con este epígrafe queda completado el Capítulo 2, estableciendo una base sólida para abordar, en el capítulo siguiente, el movimiento orbital, donde los principios energéticos y dinámicos se combinan de forma natural.

Capítulo 3. Movimiento orbital

1. Energía y movimiento orbital

El estudio del movimiento orbital constituye una de las aplicaciones más importantes y completas del campo gravitatorio. En él convergen los conceptos de fuerza gravitatoria, campo gravitatorio y, de forma esencial, los principios energéticos desarrollados en el capítulo anterior. El análisis del movimiento orbital permite comprender cómo cuerpos como planetas, satélites o estrellas se mantienen ligados gravitatoriamente describiendo trayectorias cerradas alrededor de otros cuerpos de mayor masa.

Desde el punto de vista histórico, el movimiento de los astros fue objeto de estudio desde la Antigüedad, pero alcanzó una explicación científica rigurosa gracias a los trabajos de Johannes Kepler y, posteriormente, de Isaac Newton. Kepler describió empíricamente las órbitas planetarias mediante sus leyes, mientras que Newton proporcionó la explicación dinámica y energética que las fundamenta. En este epígrafe se aborda el movimiento orbital desde una perspectiva energética, sin entrar todavía en detalles geométricos de las órbitas, que se estudiarán en epígrafes posteriores.

Sistema gravitatorio y energía mecánica

Consideremos un sistema formado por un cuerpo de masa m que se mueve bajo la acción del campo gravitatorio creado por otro cuerpo de masa mucho mayor M (por ejemplo, un satélite alrededor de la Tierra o un planeta alrededor del Sol). En este tipo de sistemas, puede suponerse que el cuerpo de masa M permanece prácticamente en reposo, y que el movimiento orbital se describe mediante el movimiento de la masa m en el campo gravitatorio de M.

La energía mecánica del sistema viene dada por la suma de la energía cinética y la energía potencial gravitatoria:

$$E_m = E_c + E_p$$

donde:

$$E_c = \frac{1}{2}\, m\, v^2$$

$$E_p = -\, G\, \frac{M\, m}{r}$$

siendo r la distancia entre los centros de ambas masas. La energía potencial gravitatoria es negativa debido a que se ha elegido el infinito como nivel de referencia, lo que refleja el carácter ligado del sistema.

Condición energética del movimiento orbital

Un rasgo fundamental del movimiento orbital es que se trata de un movimiento ligado, es decir, el cuerpo no puede escapar indefinidamente del campo gravitatorio. Desde el punto de vista energético, esto implica que la energía mecánica total del sistema es negativa:

$$E_m < 0$$

Si la energía mecánica fuera positiva, el cuerpo tendría energía suficiente para alejarse indefinidamente, dando lugar a un movimiento no ligado. Por tanto, esa condición caracteriza a los sistemas orbitales estables.

Sustituyendo las expresiones de la energía cinética y potencial, la energía mecánica del cuerpo en un punto cualquiera de la órbita es

$$E_m = \frac{1}{2}\, m\, v^2 - G\, \frac{M\, m}{r}$$

Esta expresión es válida para cualquier punto de la trayectoria y será clave para analizar el movimiento orbital desde un punto de vista energético.

Movimiento orbital y conservación de la energía mecánica

En ausencia de fuerzas no conservativas, como el rozamiento o fuerzas externas, el movimiento orbital se desarrolla bajo la acción exclusiva de la fuerza gravitatoria, que es una fuerza conservativa. Por tanto, la energía mecánica del sistema se conserva:

$$E_{m,\text{inicial}} = E_{m,\text{final}}$$

Esto implica que, aunque la velocidad del cuerpo y su distancia al centro de atracción varíen a lo largo de la órbita, la suma de energía cinética y energía potencial permanece constante.

Esta conservación energética permite explicar cualitativamente el comportamiento del cuerpo en su órbita. Cuando el cuerpo se acerca al centro de atracción, el valor absoluto de la energía potencial aumenta (se hace más negativa), lo que debe compensarse con un aumento de la energía cinética. Como consecuencia, el cuerpo se mueve más rápido. Por el contrario, cuando el cuerpo se aleja, la energía potencial aumenta (se hace menos negativa) y la energía cinética disminuye, reduciendo la velocidad.

Relación entre energía y forma de la órbita

Aunque el análisis geométrico detallado de las órbitas se abordará más adelante, desde el punto de vista energético pueden extraerse conclusiones importantes. El valor de la energía mecánica determina el tipo de trayectoria:

Si $E_m < 0$, el movimiento es ligado y la trayectoria es cerrada (órbitas elípticas o circulares).

Si $E_m = 0$, el cuerpo tiene la energía justa para escapar y describe una trayectoria límite.

Si $E_m > 0$, el movimiento es no ligado y la trayectoria es abierta.

En el nivel de Bachillerato, el estudio se centra en el caso $E_m < 0$, correspondiente a órbitas planetarias y satelitales.

Caso particular: órbita circular

Un caso especialmente sencillo y relevante es el de la órbita circular, en la que la distancia r al centro de atracción permanece constante. En este tipo de movimiento, la velocidad del cuerpo tiene módulo constante y la fuerza gravitatoria actúa como fuerza centrípeta, responsable del movimiento circular.

La condición dinámica para una órbita circular es

$$G\,\frac{M\,m}{r^2} = \frac{m\,v^2}{r}$$

de donde se obtiene la velocidad orbital:

$$v = \sqrt{G\,\frac{M}{r}}$$

Sustituyendo esta expresión en la fórmula de la energía cinética, resulta

$$E_c = \frac{1}{2}\,m\,G\,\frac{M}{r}$$

La energía potencial gravitatoria es

$$E_p = -\,G\,\frac{M\,m}{r}$$

Por tanto, la energía mecánica total en una órbita circular es

$$E_m = E_c + E_p = -\,\frac{1}{2}\,G\,\frac{M\,m}{r}$$

Este resultado muestra que, en una órbita circular, la energía mecánica es negativa y su valor depende únicamente de las masas y del radio de la órbita.

Interpretación física del equilibrio orbital

El movimiento orbital no implica equilibrio de fuerzas en el sentido estático, sino un equilibrio dinámico. La fuerza gravitatoria no se anula, sino que proporciona exactamente la aceleración centrípeta necesaria para curvar la trayectoria del cuerpo.

Desde el punto de vista energético, este equilibrio dinámico se traduce en una distribución constante de energía entre las formas cinética y potencial. En una órbita circular,

ambas energías permanecen constantes, mientras que en órbitas no circulares se intercambian de forma continua, manteniéndose constante su suma.

Importancia del enfoque energético

El enfoque energético del movimiento orbital presenta varias ventajas fundamentales: Permite analizar el movimiento sin estudiar fuerzas en cada punto, facilita la comprensión del carácter ligado de las órbitas, proporciona criterios claros para distinguir entre movimiento orbital y escape y es especialmente adecuado para la resolución de problemas PAU.

Este enfoque fue desarrollado y utilizado sistemáticamente por científicos como Pierre-Simon Laplace y Joseph-Louis Lagrange, quienes ampliaron el análisis newtoniano introduciendo métodos energéticos que siguen siendo fundamentales en la Física actual.

Aplicación en problemas PAU

En problemas de acceso a la universidad, el movimiento orbital suele abordarse mediante la conservación de la energía mecánica o mediante la combinación de esta con la dinámica del movimiento circular. Es habitual que se solicite determinar la velocidad de un satélite, la energía mecánica del sistema o la variación de energía al cambiar el radio de la órbita.

Un planteamiento correcto exige: identificar el sistema físico, escribir la expresión completa de la energía mecánica, aplicar correctamente la conservación de la energía, e interpretar físicamente el signo y el valor de los resultados.

El estudio de la energía y el movimiento orbital permite comprender cómo la interacción gravitatoria da lugar a movimientos estables y periódicos a gran escala. La conservación de la energía mecánica proporciona un marco poderoso para analizar estos movimientos y establece una conexión directa entre los conceptos energéticos y la dinámica del campo gravitatorio.

Este análisis energético constituye la base necesaria para abordar, en el siguiente epígrafe, el estudio detallado de la velocidad orbital y la velocidad de escape, donde se profundizará en las condiciones energéticas que permiten a un cuerpo mantenerse en órbita o abandonar el campo gravitatorio.

2. Velocidad orbital y velocidad de escape

El análisis energético del movimiento orbital permite introducir dos magnitudes de enorme importancia física y gran presencia en los ejercicios de la PAU: la velocidad orbital y la velocidad de escape. Ambas están directamente relacionadas con la energía mecánica del sistema gravitatorio y proporcionan criterios claros para distinguir entre movimientos ligados y no ligados en un campo gravitatorio.

Estas velocidades no son simples valores cinemáticos, sino que reflejan de forma precisa el equilibrio entre la energía cinética de un cuerpo y la energía potencial gravitatoria

asociada a su posición. Su estudio permite comprender por qué los satélites permanecen en órbita, por qué los planetas no caen sobre el Sol y qué condiciones deben cumplirse para que un cuerpo pueda abandonar definitivamente un campo gravitatorio.

Velocidad orbital: concepto físico

La velocidad orbital es la velocidad que debe tener un cuerpo para describir una órbita alrededor de otro cuerpo de masa mucho mayor bajo la acción exclusiva de la fuerza gravitatoria. En el nivel de 2.º de Bachillerato, el estudio de la velocidad orbital se centra fundamentalmente en el caso de órbitas circulares, que constituyen el modelo más sencillo y didáctico.

En una órbita circular, la distancia entre el cuerpo orbitante y el centro de atracción permanece constante, y la velocidad tiene módulo constante, aunque su dirección cambia continuamente. La fuerza gravitatoria actúa en todo momento como fuerza centrípeta, responsable de la curvatura de la trayectoria.

Deducción de la velocidad orbital

Consideremos un cuerpo de masa m que describe una órbita circular de radio r alrededor de otro cuerpo de masa M. La fuerza gravitatoria que actúa sobre el cuerpo de masa $m$tiene módulo

$$F_g = G\,\frac{M\,m}{r^2}$$

Para que el cuerpo describa una trayectoria circular de radio $r$con velocidad de módulo v, debe existir una fuerza centrípeta de módulo

$$F_c = \frac{m\,v^2}{r}$$

En una órbita circular estable, la fuerza gravitatoria proporciona exactamente la fuerza centrípeta necesaria. Por tanto, se cumple la igualdad:

$$G\,\frac{M\,m}{r^2} = \frac{m\,v^2}{r}$$

Simplificando la masa m y reordenando términos, se obtiene:

$$v^2 = G\,\frac{M}{r}$$

y, finalmente, la expresión de la velocidad orbital:

$$\boxed{v_{\text{orb}} = \sqrt{G\,\frac{M}{r}}}$$

Esta expresión muestra que la velocidad orbital: depende de la masa Mdel cuerpo central, depende del radio de la órbita, no depende de la masa del cuerpo que orbita.

Este último resultado es especialmente relevante y conecta directamente con la universalidad del campo gravitatorio.

Interpretación energética de la velocidad orbital

La expresión de la velocidad orbital puede obtenerse también desde un punto de vista energético. En una órbita circular, la energía mecánica del sistema es

$$E_m = -\frac{1}{2}\, G\, \frac{M\, m}{r}$$

La energía cinética del cuerpo es

$$E_c = \frac{1}{2}\, m\, v^2$$

y la energía potencial gravitatoria es

$$E_p = -\, G\, \frac{M\, m}{r}$$

En una órbita circular, se cumple que:

$$E_c = -\frac{1}{2}\, E_p$$

Esta relación muestra que la energía cinética es la mitad del valor absoluto de la energía potencial gravitatoria. El equilibrio orbital puede interpretarse, por tanto, como un balance energético muy preciso entre ambas formas de energía.

Velocidad orbital en el campo gravitatorio terrestre

Aplicando la expresión general de la velocidad orbital al caso de un satélite que orbita alrededor de la Tierra, tomando M como la masa terrestre y $r$como la distancia al centro de la Tierra, se obtiene la velocidad necesaria para que el satélite permanezca en órbita circular.

Es importante destacar que: cuanto menor es el radio de la órbita, mayor es la velocidad orbital y que los satélites más cercanos a la Tierra se mueven más rápido que los satélites situados a mayor altura.

Este resultado explica, por ejemplo, por qué los satélites de órbita baja tienen períodos mucho menores que los satélites geoestacionarios.

Velocidad de escape: concepto físico

La velocidad de escape es la velocidad mínima que debe tener un cuerpo para abandonar definitivamente el campo gravitatorio de otro cuerpo, sin necesidad de seguir

aplicando fuerzas adicionales. Si un cuerpo alcanza esta velocidad, puede alejarse indefinidamente, llegando al infinito con velocidad nula.

Desde el punto de vista energético, la velocidad de escape corresponde a la situación límite en la que la energía mecánica total del sistema es nula:

$$E_m = 0$$

Este criterio energético proporciona una forma clara y elegante de deducir la expresión de la velocidad de escape.

Deducción de la velocidad de escape

Consideremos un cuerpo de masa m situado a una distancia r del centro de un cuerpo de masa M. Si el cuerpo se lanza radialmente con velocidad inicial v_e, su energía mecánica inicial es:

$$E_{m,i} = \frac{1}{2}\, m\, v_e^2 - G\, \frac{M\, m}{r}$$

Para que el cuerpo escape, debe llegar al infinito con velocidad nula. En el infinito, la energía potencial gravitatoria es cero y la energía cinética también es cero, por lo que:

$$E_{m,f} = 0$$

Aplicando la conservación de la energía mecánica:

$$\frac{1}{2}\, m\, v_e^2 - G\, \frac{M\, m}{r} = 0$$

Reordenando términos, se obtiene:

$$\frac{1}{2}\, m\, v_e^2 = G\, \frac{M\, m}{r}$$

Simplificando la masa my despejando la velocidad, resulta la expresión de la velocidad de escape:

$$\boxed{v_e = \sqrt{2\, G\, \frac{M}{r}}}$$

Comparación entre velocidad orbital y velocidad de escape

Comparando las expresiones obtenidas para la velocidad orbital y la velocidad de escape, se observa que:

$$v_e = \sqrt{2}\, v_{\text{orb}}$$

Este resultado es muy importante desde el punto de vista conceptual. Indica que la velocidad de escape es mayor que la velocidad orbital en un factor $\sqrt{2}$.

Por tanto: con velocidad orbital, el cuerpo permanece ligado describiendo una órbita; con velocidad de escape, el cuerpo deja de estar ligado y se aleja indefinidamente.

Interpretación física de la velocidad de escape

La velocidad de escape no depende de la dirección del lanzamiento, sino únicamente del módulo de la velocidad inicial. Tampoco depende de la masa del cuerpo que se lanza, sino exclusivamente de la masa del cuerpo que genera el campo y de la distancia al centro de atracción.

Este resultado pone de manifiesto que la velocidad de escape es una propiedad del campo gravitatorio y no del objeto que se mueve en él.

Velocidad de escape desde la superficie terrestre

En el caso de la Tierra, tomando $r$como el radio terrestre y Mcomo la masa de la Tierra, se obtiene la velocidad de escape desde la superficie. Este valor explica por qué los lanzamientos espaciales requieren enormes cantidades de energía y por qué solo una pequeña fracción de los objetos lanzados desde la superficie puede abandonar el campo gravitatorio terrestre.

Es importante destacar que la velocidad de escape no tiene en cuenta el rozamiento atmosférico, que en la práctica aumenta considerablemente la energía necesaria para escapar.

Relación con el carácter ligado del movimiento

Desde un punto de vista energético, el movimiento orbital y la velocidad de escape se interpretan de forma unificada:

$E_m < 0 \rightarrow$ movimiento ligado (órbitas)

$E_m = 0 \rightarrow$ escape límite

$E_m > 0 \rightarrow$ movimiento no ligado

La velocidad orbital corresponde a una situación de energía negativa estable, mientras que la velocidad de escape marca la frontera entre el movimiento ligado y el no ligado.

Importancia en la PAU

Los problemas de velocidad orbital y velocidad de escape son clásicos en la PAU. Su correcta resolución exige: identificar el sistema físico, elegir correctamente el nivel de referencia del potencial, aplicar la conservación de la energía mecánica, interpretar adecuadamente el significado físico de los resultados.

Un error frecuente consiste en confundir velocidad orbital con velocidad de escape o en aplicar incorrectamente la conservación de la energía sin tener en cuenta el signo de la energía potencial.

La velocidad orbital y la velocidad de escape constituyen dos conceptos fundamentales para comprender el movimiento en el campo gravitatorio. Ambas se deducen de forma natural a partir de principios energéticos y permiten establecer criterios claros para distinguir entre movimientos ligados y no ligados. Su estudio completa la visión energética del movimiento orbital y prepara el terreno para introducir, en el siguiente epígrafe, el concepto de momento angular, que permitirá analizar la estabilidad y las propiedades geométricas de las órbitas.

3. Momento angular

El estudio del momento angular constituye un paso fundamental para comprender en profundidad el movimiento orbital. Mientras que el análisis energético permite determinar si un movimiento es ligado o no, y calcular velocidades orbitales o de escape, el momento angular aporta información esencial sobre la geometría de la trayectoria, la estabilidad del movimiento y la distribución espacial del mismo. En particular, la conservación del momento angular es una de las claves que explican las propiedades observadas de las órbitas planetarias.

Desde el punto de vista histórico, el concepto de momento angular fue desarrollado progresivamente a partir de las leyes empíricas de Johannes Kepler y alcanzó su formulación dinámica rigurosa con Isaac Newton. Posteriormente, científicos como Pierre-Simon Laplace y Joseph-Louis Lagrange profundizaron en su significado y aplicaciones en Mecánica celeste. En el nivel de 2.º de Bachillerato, el momento angular se introduce de forma accesible, pero con suficiente rigor como para interpretar correctamente el movimiento orbital.

Definición de momento angular

El momento angular de una partícula de masa m respecto a un punto de referencia O se define como el producto vectorial entre el vector posición $\mathbf{r}$ de la partícula respecto a dicho punto y su cantidad de movimiento $\mathbf{p}$:

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$$

donde:

$$\mathbf{p} = m\,\mathbf{v}$$

es la cantidad de movimiento del cuerpo y $\mathbf{v}$ su vector velocidad. El momento angular es, por tanto, una magnitud vectorial cuya dirección es perpendicular al plano formado por $\mathbf{r}$ y $\mathbf{v}$, y cuyo sentido viene determinado por la regla de la mano derecha.

El módulo del momento angular viene dado por:

$$L = m\,r\,v \sin\,\theta$$

donde θ es el ángulo entre el vector posición $\mathbf{r}$ y el vector velocidad $\mathbf{v}$. Esta expresión permite interpretar el momento angular como una medida de la "capacidad de giro" del cuerpo respecto al punto considerado.

Momento angular en el movimiento orbital

En el caso del movimiento orbital, el punto de referencia se toma habitualmente en el centro del cuerpo que genera el campo gravitatorio (por ejemplo, el centro de la Tierra o del Sol). El cuerpo de masa m describe su trayectoria bajo la acción de la fuerza gravitatoria, y su posición viene dada por el vector $\mathbf{r}$ que une el centro de atracción con el cuerpo orbitante.

Un aspecto clave del movimiento orbital es que la fuerza gravitatoria es una fuerza central, es decir, su dirección coincide siempre con la línea que une el cuerpo con el centro de atracción. En términos vectoriales, la fuerza gravitatoria es colineal con el vector $\mathbf{r}$, lo que tendrá consecuencias directas sobre el momento angular del sistema.

Momento de una fuerza y conservación del momento angular

Para analizar la evolución temporal del momento angular, es necesario introducir el concepto de momento de una fuerza (también llamado torque). El momento de una fuerza $\mathbf{F}$ respecto a un punto O se define como:

$$\tau = \mathrm{r} \times \mathrm{F}$$

El momento de una fuerza mide la tendencia de dicha fuerza a producir un cambio en el momento angular del cuerpo. Existe una relación fundamental entre el momento de una fuerza y la variación del momento angular, análoga a la relación entre fuerza y cantidad de movimiento:

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{d\mathbf{L}}{dt}$$

Esta expresión indica que el momento de la fuerza es igual a la variación temporal del momento angular. En el nivel de Bachillerato, esta relación se interpreta de forma cualitativa y se aplica a situaciones sencillas, como el movimiento bajo fuerzas centrales.

Conservación del momento angular en el campo gravitatorio.

En el campo gravitatorio, la fuerza gravitatoria es una fuerza central, dirigida a lo largo del vector $\mathbf{r}$. Como consecuencia, el producto vectorial entre $\mathbf{r}$ y $\mathbf{F}$ es nulo:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}_g = \mathbf{0}$$

Si el momento de la fuerza es nulo, la relación anterior implica que:

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \mathbf{0}$$

lo que significa que el momento angular se conserva:

$$\mathbf{L} = \text{constante}$$

Este resultado es de enorme importancia física. La conservación del momento angular es una consecuencia directa del carácter central de la fuerza gravitatoria y se cumple siempre que no actúen fuerzas externas que ejerzan un momento neto respecto al centro de atracción.

Expresión del momento angular en órbitas planas

El movimiento orbital bajo una fuerza central tiene lugar en un plano, determinado por el vector posición inicial y el vector velocidad inicial. Como consecuencia, el vector momento angular es perpendicular a dicho plano y su dirección permanece constante.

En este contexto, suele trabajarse con el módulo del momento angular. Dado que el vector **v** puede descomponerse en una componente radial y una componente perpendicular al radio, el momento angular depende únicamente de la componente perpendicular de la velocidad. Si $v_\perp$ es dicha componente, se tiene:

$$L = m\, r\, v_\perp$$

Esta expresión es especialmente útil en el estudio de órbitas no circulares, donde la velocidad y la distancia al centro varían a lo largo de la trayectoria.

Momento angular y velocidad areolar

La conservación del momento angular tiene una consecuencia geométrica directa: la conservación de la velocidad areolar. La velocidad areolar es el área barrida por el radio vector **r** por unidad de tiempo.

Para un intervalo de tiempo Δt, el área barrida ΔA es proporcional al producto $r\, v_\perp\, \Delta t$. Por tanto, la velocidad areolar es:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2}\, r\, v_\perp$$

Multiplicando por la masa m, se obtiene una relación directa con el momento angular:

$$L = 2\, m\, \frac{dA}{dt}$$

Dado que el momento angular se conserva, la velocidad areolar también es constante. Este resultado constituye una formulación dinámica de la segunda ley de Kepler, que se estudiará de forma explícita en el siguiente epígrafe.

Momento angular en la órbita circular

En el caso particular de una órbita circular, la velocidad es siempre perpendicular al radio, por lo que $\sin\,\theta = 1$. El módulo del momento angular es entonces:

$$L = m\, r\, v$$

Sustituyendo la expresión de la velocidad orbital,

$$v = \sqrt{G\,\frac{M}{r}}$$

se obtiene:

$$L = m\sqrt{G\,M\,r}$$

Esta expresión muestra que, en una órbita circular, el momento angular depende de la masa del cuerpo orbitante, de la masa central y del radio de la órbita.

Interpretación física de la conservación del momento angular

La conservación del momento angular explica por qué un cuerpo que se mueve en una órbita elíptica aumenta su velocidad cuando se aproxima al centro de atracción y la disminuye cuando se aleja. Al reducirse la distancia r, debe aumentar la componente perpendicular de la velocidad $v_\perp$ para que el producto $r\,v_\perp$ permanezca constante.

Este comportamiento no es consecuencia directa de la energía, sino de la geometría del movimiento bajo una fuerza central. De hecho, incluso cuando la energía mecánica se conserva, es la conservación del momento angular la que determina cómo se reparte la velocidad a lo largo de la órbita.

Importancia en la resolución de problemas PAU

En la PAU, el momento angular suele aparecer: de forma explícita, pidiendo su cálculo o su conservación, o de forma implícita, al justificar variaciones de velocidad en órbitas no circulares.

Un planteamiento correcto exige: identificar el punto respecto al cual se conserva el momento angular, comprobar que no actúan fuerzas externas con momento no nulo y utilizar correctamente la expresión $L = m\,r\,v_\perp$.

Un error frecuente consiste en suponer que la velocidad es siempre perpendicular al radio, lo cual solo es cierto en órbitas circulares. En órbitas generales, debe considerarse la componente perpendicular.

El momento angular es una magnitud fundamental para comprender el movimiento orbital. Su conservación, consecuencia directa del carácter central de la fuerza gravitatoria, explica la planaridad de las órbitas, la variación de la velocidad a lo largo de la trayectoria y la constancia de la velocidad areolar. Este principio proporciona el puente conceptual entre la dinámica newtoniana y las leyes empíricas del movimiento planetario.

Con el estudio del momento angular queda preparado el terreno para abordar, en el siguiente epígrafe, las Leyes de Kepler, donde se integrarán los enfoques geométrico, dinámico y energético del movimiento orbital.

4. Leyes de Kepler

Las leyes de Kepler constituyen uno de los hitos fundamentales en la historia de la Física y la Astronomía. Formuladas a comienzos del siglo XVII por Johannes Kepler a partir del análisis minucioso de las observaciones astronómicas de Tycho Brahe, describen con gran precisión el movimiento de los planetas alrededor del Sol. Estas leyes fueron inicialmente empíricas, es decir, no surgieron de principios teóricos previos, sino del estudio sistemático de los datos observacionales.

La verdadera importancia de las leyes de Kepler se puso de manifiesto décadas más tarde, cuando Isaac Newton demostró que podían deducirse rigurosamente a partir de la Ley de Gravitación Universal y de los principios de la dinámica. De este modo, las leyes de Kepler pasaron de ser simples regularidades observadas a convertirse en consecuencias necesarias de una teoría física general.

En el nivel de 2.º de Bachillerato, las leyes de Kepler se estudian tanto desde un punto de vista descriptivo como interpretativo, estableciendo conexiones claras con los conceptos de energía, fuerza centrípeta y conservación del momento angular desarrollados en los epígrafes anteriores.

Primera ley de Kepler: ley de las órbitas

La primera ley de Kepler establece que:

> *Los planetas describen órbitas elípticas alrededor del Sol, que ocupa uno de los focos de la elipse.*

Esta ley introduce una ruptura decisiva con la tradición aristotélica y con los modelos circulares que habían dominado la astronomía durante siglos. Aunque el círculo es una elipse particular, Kepler mostró que las órbitas reales de los planetas son elipses ligeramente achatadas, con el Sol situado en uno de los focos y no en el centro geométrico.

Desde el punto de vista geométrico, una elipse se caracteriza por la propiedad de que la suma de las distancias de cualquier punto de la elipse a dos puntos fijos, llamados focos, es constante. En el contexto del movimiento planetario, uno de estos focos está ocupado por el cuerpo central (el Sol), mientras que el otro no contiene ningún cuerpo físico.

En el marco de la Física de Bachillerato, no se estudia la ecuación matemática de la elipse, pero sí se destacan dos puntos importantes de la órbita: el perihelio, punto de mínima distancia al Sol, y el afelio, punto de máxima distancia al Sol.

La primera ley de Kepler es plenamente compatible con el análisis energético y dinámico del movimiento orbital. En una órbita elíptica, la energía mecánica del sistema es constante y negativa, lo que confirma el carácter ligado del movimiento.

Interpretación dinámica de la primera ley

Newton demostró que una fuerza central atractiva inversamente proporcional al cuadrado de la distancia conduce naturalmente a trayectorias elípticas. La fuerza gravitatoria cumple exactamente esta condición, lo que explica por qué las órbitas planetarias obedecen la primera ley de Kepler.

Desde el punto de vista del momento angular, la existencia de órbitas planas y cerradas es consecuencia directa del carácter central de la fuerza gravitatoria. El plano de la órbita queda determinado por el momento angular inicial, que se conserva a lo largo de todo el movimiento.

Segunda ley de Kepler: ley de las áreas

La segunda ley de Kepler afirma que:

El radio vector que une el planeta con el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales.

Esta ley describe cómo varía la velocidad del planeta a lo largo de su órbita. Cuando el planeta se encuentra cerca del Sol (perihelio), se mueve más rápido; cuando está más alejado (afelio), se mueve más despacio. A pesar de esta variación, el área barrida por el radio vector en un intervalo de tiempo dado es siempre la misma.

Desde el punto de vista físico, esta ley es una consecuencia directa de la conservación del momento angular, estudiada en el epígrafe anterior. Como se ha visto, para un movimiento bajo una fuerza central se cumple que:

$$L = m\, r\, v_{\perp} = \text{constante}$$

Dado que la velocidad areolar es proporcional a $r\, v_{\perp}$, la conservación del momento angular implica la constancia de la velocidad areolar, y por tanto la validez de la segunda ley de Kepler.

Importancia de la segunda ley

La segunda ley de Kepler proporciona una interpretación geométrica clara del movimiento orbital y explica por qué la velocidad no es constante en órbitas no circulares. Esta ley es especialmente relevante en problemas PAU donde se comparan velocidades en distintos puntos de una órbita o se pide justificar por qué un cuerpo se mueve más rápido en determinadas regiones de su trayectoria.

Un error frecuente consiste en asociar la variación de velocidad únicamente a cambios de energía. Aunque la energía mecánica se conserva, es la conservación del momento angular la que determina cómo se distribuye la velocidad a lo largo de la órbita.

Tercera ley de Kepler: ley de los períodos

La tercera ley de Kepler establece que:

El cuadrado del período de revolución de un planeta es proporcional al cubo del semieje mayor de su órbita.

Matemáticamente, esta ley se expresa como:

$$T^2 \propto a^3$$

donde Tes el período orbital y $a$es el semieje mayor de la elipse. Para órbitas circulares, el semieje mayor coincide con el radio de la órbita.

Newton demostró que esta relación se deduce directamente de la Ley de Gravitación Universal. En el caso de una órbita circular de radio r, el período viene dado por:

$$T = \frac{2\pi r}{v}$$

Sustituyendo la expresión de la velocidad orbital,

$$v = \sqrt{G\,\frac{M}{r}}$$

se obtiene:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{G\,M}}$$

Elevando al cuadrado:

$$\boxed{T^2 = \frac{4\pi^2}{G\,M}\,r^3}$$

Esta expresión muestra que el cociente $\frac{T^2}{r^3}$es constante para todos los cuerpos que orbitan alrededor de una misma masa central M.

Interpretación física de la tercera ley

La tercera ley de Kepler permite comparar los movimientos de distintos cuerpos que orbitan alrededor del mismo centro de atracción. Indica que los cuerpos situados a mayor distancia tardan más tiempo en completar una órbita, no solo porque recorren trayectorias más largas, sino también porque se mueven con menor velocidad orbital.

Esta ley es especialmente útil para el estudio de satélites artificiales y sistemas planetarios, y aparece con frecuencia en problemas de PAU relacionados con períodos orbitales y radios de órbita.

Unidad del sistema y generalización

Aunque Kepler formuló sus leyes para los planetas del Sistema Solar, Newton mostró que son válidas para cualquier sistema gravitatorio en el que un cuerpo de masa mucho menor orbita alrededor de otro de masa dominante. Esto incluye satélites artificiales, lunas, sistemas estelares y galaxias.

La universalidad de las leyes de Kepler refuerza el carácter general de la Ley de Gravitación Universal y su coherencia con los principios de la Mecánica clásica.

Importancia en la PAU

En la PAU, las leyes de Kepler suelen aparecer: de forma directa, pidiendo su enunciado o aplicación, o integradas en problemas energéticos y dinámicos. Un planteamiento correcto exige: identificar correctamente la ley aplicable, justificar su uso a partir de principios físicos, relacionar período, radio y masa central cuando sea necesario.

Las leyes de Kepler constituyen la culminación natural del estudio del movimiento orbital. Integran los enfoques geométrico, dinámico y energético del campo gravitatorio y proporcionan una descripción completa y coherente del movimiento de los cuerpos celestes.

Con este epígrafe queda completado el Capítulo 3, cerrando el BLOQUE A. CAMPO GRAVITATORIO y estableciendo una base sólida para abordar, en el siguiente bloque, el estudio del campo eléctrico, donde se introducirán conceptos análogos aplicados a la interacción electromagnética.

BLOQUE B. CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

El campo electromagnético constituye uno de los pilares fundamentales de la Física clásica y moderna. A diferencia del campo gravitatorio, que actúa sobre cualquier cuerpo con masa, el campo electromagnético actúa únicamente sobre cuerpos que poseen carga eléctrica. Esta interacción es responsable de una enorme variedad de fenómenos físicos, desde la estructura de la materia y la conducción eléctrica hasta el funcionamiento de dispositivos tecnológicos esenciales en la sociedad actual.

En este bloque se estudian de forma progresiva y rigurosa los conceptos de campo eléctrico, campo magnético e inducción electromagnética, siguiendo el enfoque establecido en las directrices de la PAU. El tratamiento se basa en el concepto de campo como entidad física que describe la interacción sin necesidad de contacto directo entre los cuerpos, manteniendo una clara analogía formal con el campo gravitatorio estudiado en el Bloque A. El desarrollo del bloque sigue un orden lógico: primero se introduce la interacción y el campo eléctricos, después se analiza el movimiento de cargas en campos eléctricos y magnéticos, a continuación se estudia el origen del campo magnético en las corrientes, y finalmente se aborda la inducción electromagnética.

Este recorrido permite al alumnado construir una visión coherente y unificada de los fenómenos electromagnéticos, con especial atención a su formulación matemática básica y a su interpretación física.

Capítulo 4. Campo eléctrico

1. Ley de Coulomb

La Ley de Coulomb describe la interacción eléctrica entre cargas en reposo y constituye el punto de partida para el estudio del campo eléctrico. Esta ley es al electromagnetismo lo que la Ley de Gravitación Universal es a la gravitación: una ley fundamental que permite cuantificar la fuerza de interacción entre dos cuerpos y que sirve de base para definir el campo asociado.

Desde el punto de vista histórico, la ley fue formulada en el siglo XVIII por Charles-Augustin de Coulomb, a partir de experimentos realizados con una balanza de torsión. Sus resultados mostraron que la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales presenta una dependencia con la distancia muy similar a la fuerza gravitatoria, aunque con diferencias fundamentales en su naturaleza física.

Interacción eléctrica y carga eléctrica

La carga eléctrica es una propiedad fundamental de la materia, responsable de la interacción electromagnética. Existen dos tipos de carga eléctrica, denominadas convencionalmente positiva y negativa. Las cargas del mismo signo se repelen, mientras que las cargas de signo contrario se atraen.

La unidad de carga eléctrica en el Sistema Internacional es el culombio (C). La carga eléctrica está cuantizada, lo que significa que cualquier carga observable es un múltiplo entero de la carga elemental, cuyo valor corresponde a la carga del electrón en valor absoluto.

Enunciado de la Ley de Coulomb

La Ley de Coulomb establece que:

> *La fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales en reposo es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa, y actúa según la línea que une ambas cargas.*

Matemáticamente, el módulo de la fuerza eléctrica viene dado por:

$$F = k \frac{| q_1 q_2 |}{r^2}$$

donde: q_1 y q_2 son los valores de las cargas, r es la distancia entre ellas, $k$es la constante de Coulomb, cuyo valor en el vacío es:

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

siendo ε_0 la permitividad eléctrica del vacío.

Forma vectorial de la Ley de Coulomb

Para describir correctamente la interacción eléctrica es necesario utilizar una formulación vectorial. La fuerza eléctrica que ejerce una carga $q_1$sobre otra carga q_2 se expresa como:

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

donde $\hat{\mathbf{r}}$ es el versor dirigido desde la carga que ejerce la fuerza hacia la carga que la recibe. El signo del producto $q_1 q_2$ determina el sentido de la fuerza:

Si $q_1 q_2 > 0$, la fuerza es repulsiva,

Si $q_1 q_2 < 0$, la fuerza es atractiva.

La fuerza eléctrica cumple el principio de acción y reacción, de modo que ambas cargas se ejercen fuerzas de igual módulo y dirección, pero de sentido contrario.

Comparación con la interacción gravitatoria

Aunque la expresión matemática de la Ley de Coulomb es formalmente similar a la de la Ley de Gravitación Universal, existen diferencias físicas fundamentales: la interacción eléctrica puede ser atractiva o repulsiva, la interacción gravitatoria es siempre atractiva, la

interacción eléctrica es mucho más intensa que la gravitatoria, la carga eléctrica puede ser positiva o negativa, mientras que la masa es siempre positiva.

Estas diferencias explican por qué los fenómenos eléctricos dominan a escala microscópica, mientras que la gravitación es dominante a escala astronómica.

Principio de superposición en la interacción eléctrica

La Ley de Coulomb es válida para cargas puntuales aisladas, pero en sistemas reales suelen intervenir varias cargas. En estos casos se aplica el principio de superposición, según el cual la fuerza total que actúa sobre una carga es la suma vectorial de las fuerzas ejercidas por cada una de las demás cargas consideradas de forma independiente:

$$\mathbf{F}_{\text{total}} = \sum \mathbf{F}_i$$

Este principio permite analizar sistemas de múltiples cargas sin modificar la ley fundamental de interacción.

Limitaciones de la descripción mediante fuerzas

Aunque la Ley de Coulomb permite calcular fuerzas eléctricas entre cargas, presenta una limitación conceptual similar a la encontrada en el estudio de la gravitación: obliga a considerar interacciones directas entre pares de cargas. Para superar esta dificultad y proporcionar una descripción más general, se introduce el concepto de **campo eléctrico**, que se desarrollará en el siguiente epígrafe.

La Ley de Coulomb constituye, por tanto, el punto de partida imprescindible para definir el campo eléctrico como propiedad del espacio asociada a la presencia de cargas.

Importancia de la Ley de Coulomb en la PAU

En la PAU, la Ley de Coulomb aparece de forma recurrente: en cálculos directos de fuerzas entre cargas, como base para definir el campo eléctrico, integrada en problemas de superposición.

Un planteamiento correcto exige: identificar correctamente las cargas y sus signos, representar adecuadamente los vectores fuerza, aplicar el principio de superposición cuando sea necesario.

La Ley de Coulomb describe cuantitativamente la interacción eléctrica entre cargas en reposo y constituye la base del estudio del campo eléctrico. Su formulación vectorial y su analogía con la gravitación permiten introducir de forma natural el concepto de campo, que proporcionará una visión más general y potente de los fenómenos eléctricos.

En el siguiente epígrafe se definirá el campo eléctrico como magnitud física independiente de la carga de prueba y se analizarán sus propiedades fundamentales.

2. Campo eléctrico

La descripción de la interacción eléctrica mediante la Ley de Coulomb permite calcular fuerzas entre cargas puntuales, pero presenta una limitación conceptual importante: obliga a considerar siempre interacciones directas entre pares de cargas. Para superar esta dificultad y proporcionar una descripción más general y potente de los fenómenos eléctricos, se introduce el concepto de campo eléctrico. Este concepto permite atribuir la interacción no a una acción instantánea a distancia, sino a una propiedad del espacio asociada a la presencia de cargas eléctricas.

El campo eléctrico describe cómo una carga modifica el espacio que la rodea, de modo que cualquier otra carga situada en ese espacio experimentará una fuerza eléctrica. Esta forma de entender la interacción resulta conceptualmente análoga a la utilizada en el estudio del campo gravitatorio y constituye uno de los pilares del electromagnetismo clásico.

Definición de campo eléctrico

El campo eléctrico en un punto del espacio se define como la fuerza eléctrica por unidad de carga que experimentaría una carga de prueba positiva situada en ese punto. Matemáticamente, el campo eléctrico se representa mediante el vector $\mathbf{E}$ y se define como:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}$$

donde $\mathbf{F}$ es la fuerza eléctrica que actúa sobre una carga de prueba q. Esta carga de prueba debe ser suficientemente pequeña para no alterar el campo existente.

El campo eléctrico es, por tanto, una magnitud vectorial, definida en cada punto del espacio, independiente del valor de la carga utilizada para medirlo. Esta independencia refuerza la idea de que el campo eléctrico es una propiedad del espacio y no de la carga de prueba.

Unidades del campo eléctrico

En el Sistema Internacional, el campo eléctrico se mide en newton por culombio ($N \cdot C^{-1}$). Dado que la fuerza eléctrica es proporcional a la carga, estas unidades reflejan directamente la definición del campo.

De forma equivalente, el campo eléctrico puede expresarse en voltios por metro ($V \cdot m^{-1}$), como se verá más adelante al relacionar el campo eléctrico con el potencial eléctrico.

Campo eléctrico creado por una carga puntual

A partir de la Ley de Coulomb puede deducirse la expresión del campo eléctrico creado por una carga puntual Q. La fuerza que dicha carga ejerce sobre una carga de prueba q, situada a una distancia r, es:

$$\mathbf{F} = k\,\frac{Q\,q}{r^2}\,\hat{\mathbf{r}}$$

Dividiendo entre la carga de prueba q, se obtiene la expresión del campo eléctrico:

$$\mathbf{E} = k\,\frac{Q}{r^2}\,\hat{\mathbf{r}}$$

donde $\hat{\mathbf{r}}$ es el versor radial dirigido desde la carga que genera el campo hacia el punto considerado.

El sentido del campo eléctrico depende del signo de la carga que lo crea:

Si $Q > 0$, el campo es saliente

Si $Q < 0$, el campo es entrante.

Interpretación física del campo eléctrico

El campo eléctrico indica en cada punto del espacio la dirección y el sentido de la fuerza que actuaría sobre una carga positiva situada en ese punto. Si la carga de prueba fuera negativa, la fuerza tendría sentido contrario al del campo eléctrico.

Esta interpretación permite visualizar el comportamiento de cargas en presencia de otras cargas sin necesidad de calcular fuerzas para cada configuración concreta. El campo eléctrico proporciona, por tanto, una descripción más general y operativa de la interacción eléctrica.

Campo eléctrico y principio de superposición

Cuando existen varias cargas eléctricas, cada una crea su propio campo eléctrico de forma independiente. El campo eléctrico total en un punto es la suma vectorial de los campos creados por cada carga:

$$\mathbf{E}_{\text{total}} = \sum \mathbf{E}_i$$

Este principio de superposición es válido para el campo eléctrico y permite analizar configuraciones complejas de cargas a partir de la suma de campos simples.

Es importante destacar que se trata de una suma vectorial, por lo que deben tenerse en cuenta direcciones y sentidos de cada contribución.

Representación del campo eléctrico: líneas de campo

El campo eléctrico puede representarse gráficamente mediante líneas de campo. Estas líneas son curvas imaginarias tales que el vector $\mathbf{E}$ es tangente a la línea en cada punto. La densidad de líneas es mayor en las regiones donde el campo es más intenso.

Las líneas de campo eléctrico presentan las siguientes características: salen de las cargas positivas y entran en las negativas, no se cruzan entre sí, indican la dirección de la fuerza sobre una carga positiva.

Esta representación proporciona una visión cualitativa muy útil del campo eléctrico y se emplea con frecuencia en problemas conceptuales de la PAU.

Campo eléctrico uniforme

Un caso de especial interés es el campo eléctrico uniforme, en el que el vector **E** tiene el mismo módulo, dirección y sentido en todos los puntos de una región del espacio. Este tipo de campo se obtiene, por ejemplo, entre dos placas planas y paralelas cargadas con signos opuestos.

En un campo eléctrico uniforme, las líneas de campo son rectas, paralelas y equidistantes, lo que refleja la constancia del campo. Este modelo es especialmente importante para el estudio del movimiento de cargas, que se abordará en el Capítulo 5.

Relación entre campo eléctrico y fuerza eléctrica

Una vez definido el campo eléctrico, la fuerza que actúa sobre una carga q situada en un punto donde existe un campo **E** viene dada por:

$$\mathbf{F} = q\,\mathbf{E}$$

Esta expresión resume de forma compacta la interacción eléctrica y permite calcular fuerzas de manera inmediata a partir del campo. Si la carga es positiva, la fuerza tiene el mismo sentido que el campo; si es negativa, tiene sentido contrario.

Campo eléctrico como entidad física

La introducción del campo eléctrico representa un cambio profundo en la forma de entender la interacción eléctrica. El campo existe independientemente de que haya o no una carga de prueba para detectarlo y puede almacenar energía, como se verá en epígrafes posteriores.

Este enfoque fue desarrollado progresivamente en el siglo XIX, especialmente por Michael Faraday, quien introdujo la idea de líneas de campo, y por James Clerk Maxwell, que formuló una teoría unificada del electromagnetismo basada en el concepto de campo.

Importancia del campo eléctrico en la PAU

En la PAU, el campo eléctrico aparece: como definición fundamental, en cálculos de campo creado por cargas puntuales, en problemas de superposición, como base para definir potencial eléctrico y energía potencial eléctrica.

Un error frecuente consiste en confundir campo eléctrico con fuerza eléctrica. Recordar que el campo es una propiedad del espacio y la fuerza depende de la carga es esencial para evitar errores conceptuales.

El campo eléctrico proporciona una descripción general y potente de la interacción eléctrica, superando las limitaciones de la formulación basada exclusivamente en fuerzas. Definido como fuerza por unidad de carga, permite analizar de forma coherente sistemas de cargas múltiples y constituye la base para el estudio del potencial eléctrico y de la energía asociada al campo.

En el siguiente epígrafe se introducirá el potencial eléctrico, que permitirá describir el campo eléctrico desde un punto de vista energético, en estrecha analogía con el campo gravitatorio.

3. Potencial eléctrico

El estudio del potencial eléctrico supone un paso decisivo en la comprensión del campo eléctrico, ya que permite describir la interacción eléctrica desde un punto de vista energético, complementario a la descripción vectorial proporcionada por el campo **E**. Al igual que ocurre en el campo gravitatorio, el concepto de potencial eléctrico solo puede introducirse con pleno sentido una vez establecido que el campo eléctrico es un campo conservativo en las situaciones electrostáticas consideradas en 2.º de Bachillerato.

En electrostática, las cargas se encuentran en reposo y el campo eléctrico no depende del tiempo. En estas condiciones, la fuerza eléctrica es conservativa, lo que significa que el trabajo realizado por dicha fuerza al mover una carga entre dos puntos depende únicamente de la posición inicial y final, y no del camino seguido. Esta propiedad permite definir una magnitud escalar asociada al campo: el potencial eléctrico.

Trabajo de la fuerza eléctrica y energía potencial

Consideremos una carga eléctrica q que se desplaza en una región donde existe un campo eléctrico **E**. La fuerza que actúa sobre la carga viene dada por:

$$\mathbf{F} = q\,\mathbf{E}$$

Si la carga se desplaza entre dos puntos del espacio, la fuerza eléctrica realiza un trabajo. Dado que el campo eléctrico electrostático es conservativo, este trabajo puede relacionarse con una variación de energía potencial eléctrica.

Se define la energía potencial eléctrica E_p de una carga como la energía asociada a su posición en el campo eléctrico. La variación de esta energía potencial entre dos puntos A y B está relacionada con el trabajo de la fuerza eléctrica mediante:

$$\Delta E_p = E_{p,B} - E_{p,A} = -\,W_{A\to B}$$

Esta relación expresa que, cuando la fuerza eléctrica realiza trabajo positivo, la energía potencial del sistema disminuye, y viceversa. Esta idea es completamente análoga a la utilizada en el campo gravitatorio.

Definición de potencial eléctrico

El potencial eléctrico V se define como la energía potencial eléctrica por unidad de carga asociada a un punto del campo eléctrico. Matemáticamente:

$$V = \frac{E_p}{q}$$

Esta definición tiene consecuencias importantes: el potencial eléctrico es una magnitud escalar, no depende del valor de la carga de prueba utilizada, es una propiedad del campo eléctrico, no de la carga.

La unidad del potencial eléctrico en el Sistema Internacional es el voltio (V), que equivale a un julio por culombio ($J \cdot C^{-1}$).

Diferencia de potencial eléctrico

En la práctica, no interesa tanto el valor absoluto del potencial eléctrico en un punto como la diferencia de potencial entre dos puntos. La diferencia de potencial entre los puntos A y B se define como:

$$\Delta V = V_B - V_A = \frac{\Delta E_p}{q}$$

Utilizando la relación entre trabajo y energía potencial, resulta:

$$\Delta V = -\frac{W_{A \to B}}{q}$$

Esta expresión muestra que la diferencia de potencial eléctrico mide el trabajo que el campo eléctrico realiza por unidad de carga al desplazarla entre dos puntos.

Potencial eléctrico creado por una carga puntual

Para obtener una expresión concreta del potencial eléctrico, consideremos el campo creado por una carga puntual Q. Se elige, por convenio, el infinito como nivel de referencia del potencial, de modo que:

$$V(\infty) = 0$$

El trabajo realizado por la fuerza eléctrica al llevar una carga de prueba q desde el infinito hasta una distancia r de la carga Q permite calcular la energía potencial eléctrica del sistema. El resultado es:

$$E_p = k\,\frac{Q\,q}{r}$$

Dividiendo entre la carga q, se obtiene la expresión del potencial eléctrico creado por una carga puntual:

$$\boxed{V(r) = k\,\frac{Q}{r}}$$

Esta expresión muestra que el potencial eléctrico depende: del valor de la carga que genera el campo, de la distancia al punto considerado, pero no de la carga de prueba.

El signo del potencial eléctrico viene determinado por el signo de la carga Q:

Si $Q > 0$, el potencial es positivo,

Si $Q < 0$, el potencial es negativo.

Superposición de potenciales eléctricos

Dado que el campo eléctrico cumple el principio de superposición, el potencial eléctrico también lo cumple. Si varias cargas crean campo eléctrico, el potencial total en un punto es la suma algebraica de los potenciales creados por cada carga individual:

$$V_{\text{total}} = \sum V_i$$

Es importante destacar que, a diferencia del campo eléctrico, el potencial se suma algebraicamente, ya que es una magnitud escalar. Esta propiedad simplifica enormemente el cálculo del potencial en sistemas formados por varias cargas.

Superficies equipotenciales

Una superficie equipotencial es el conjunto de puntos del espacio en los que el potencial eléctrico tiene el mismo valor. En una superficie equipotencial: la energía potencial eléctrica de una carga es constante, el trabajo de la fuerza eléctrica al mover una carga sobre la superficie es nulo.

En el caso de una carga puntual, las superficies equipotenciales son esferas concéntricas centradas en la carga. A medida que aumenta la distancia, el valor del potencial disminuye en módulo.

Existe una relación fundamental entre el campo eléctrico y las superficies equipotenciales: el vector **E** es perpendicular a las superficies equipotenciales en cada punto. Esta propiedad tiene una interpretación física clara, ya que el campo eléctrico apunta en la dirección en la que el potencial disminuye más rápidamente.

Potencial eléctrico en un campo eléctrico uniforme

En un campo eléctrico uniforme, como el existente entre dos placas planas y paralelas cargadas, el campo **E** tiene módulo y dirección constantes. En este caso, la diferencia de potencial entre dos puntos separados una distancia $d$en la dirección del campo viene dada por:

$$\Delta V = - E\, d$$

Si se considera únicamente el módulo, resulta:

$$| \Delta V | = E\, d$$

Esta expresión es especialmente importante en aplicaciones prácticas y en problemas de PAU relacionados con placas paralelas y movimiento de cargas en campos eléctricos.

Interpretación física del potencial eléctrico

El potencial eléctrico permite describir el comportamiento de las cargas desde un punto de vista energético. Una carga positiva tiende a desplazarse espontáneamente hacia regiones de menor potencial, mientras que una carga negativa tiende a desplazarse hacia regiones de mayor potencial.

Esta interpretación energética resulta fundamental para comprender el funcionamiento de dispositivos eléctricos y electrónicos, y prepara el terreno para el estudio de la energía potencial eléctrica y del movimiento de cargas en campos eléctricos.

Importancia del potencial eléctrico en la PAU

En la PAU, el potencial eléctrico aparece: en el cálculo de diferencias de potencial, como base para determinar energía potencial eléctrica, en problemas de superposición, en campos eléctricos uniformes.

Un error frecuente consiste en confundir potencial eléctrico con energía potencial eléctrica. Hay que recordar que el potencial es energía por unidad de carga es esencial para evitar errores.

El potencial eléctrico proporciona una descripción escalar y energética del campo eléctrico, complementaria a la descripción vectorial proporcionada por el campo **E**. Definido como energía potencial por unidad de carga, permite calcular el trabajo de la fuerza eléctrica y analizar el comportamiento de las cargas de forma sencilla y rigurosa.

En el siguiente epígrafe se introducirá la energía potencial eléctrica, estableciendo la relación directa entre potencial y energía y completando el estudio energético del campo eléctrico.

4. Energía potencial eléctrica

La energía potencial eléctrica completa el estudio energético del campo eléctrico y permite describir la interacción eléctrica de forma plenamente análoga a la interacción gravitatoria. Mientras que el potencial eléctrico proporciona una descripción escalar del campo independiente de la carga de prueba, la energía potencial eléctrica introduce de nuevo a la carga concreta y cuantifica la energía asociada a su posición dentro del campo eléctrico.

Este epígrafe resulta esencial para comprender el movimiento de cargas en campos eléctricos, el intercambio entre energía cinética y energía potencial y la aplicación de los

teoremas energéticos, que aparecerán de forma natural en el Capítulo 5. En el nivel de 2.º de Bachillerato, la energía potencial eléctrica se estudia exclusivamente en el marco de la electrostática, donde el campo es conservativo.

Relación entre energía potencial eléctrica y potencial eléctrico

Por definición, el potencial eléctrico V es la energía potencial eléctrica por unidad de carga. Esta relación fundamental se expresa como:

$$E_p = q\,V$$

donde: E_p es la energía potencial eléctrica de la carga, q es el valor de la carga, V es el potencial eléctrico en el punto considerado.

Esta expresión muestra claramente la diferencia conceptual entre ambas magnitudes: el potencial eléctrico depende solo del campo, la energía potencial eléctrica depende tanto del campo como de la carga.

Variación de energía potencial eléctrica

Cuando una carga se desplaza entre dos puntos A y B de un campo eléctrico, la variación de energía potencial eléctrica viene dada por:

$$\Delta E_p = E_{p,B} - E_{p,A} = q\,(V_B - V_A)$$

Esta expresión es especialmente útil en la resolución de problemas, ya que permite calcular directamente la variación de energía potencial a partir de la diferencia de potencial eléctrico.

Si la carga es positiva: al desplazarse hacia regiones de menor potencial, su energía potencial disminuye; al desplazarse hacia regiones de mayor potencial, su energía potencial aumenta.

Si la carga es negativa, el comportamiento es el contrario.

Energía potencial eléctrica y trabajo de la fuerza eléctrica

La energía potencial eléctrica está directamente relacionada con el trabajo realizado por la fuerza eléctrica. Como la fuerza eléctrica es conservativa en electrostática, se cumple que:

$$W_{\text{eléctrica}} = -\,\Delta E_p$$

Es decir: si la fuerza eléctrica realiza trabajo positivo, la energía potencial disminuye; si la fuerza eléctrica realiza trabajo negativo, la energía potencial aumenta.

Esta relación es completamente análoga a la existente entre el trabajo del peso y la energía potencial gravitatoria.

Energía potencial eléctrica en el campo de una carga puntual

Para una carga puntual Q que crea un campo eléctrico, el potencial eléctrico en un punto situado a una distancia $r$es:

$$V = k\,\frac{Q}{r}$$

La energía potencial eléctrica de una carga $q$situada en ese punto es, por tanto:

$$\boxed{E_p = k\,\frac{Q\,q}{r}}$$

Esta expresión muestra que: la energía potencial eléctrica depende del producto de ambas cargas, puede ser positiva o negativa según el signo de $Q\ q$, depende de la distancia entre las cargas.

Si Q y q tienen el mismo signo, la energía potencial es positiva; si tienen signos opuestos, la energía potencial es negativa.

Elección del nivel de referencia

Al igual que en el campo gravitatorio, la energía potencial eléctrica no tiene un valor absoluto, sino que depende del nivel de referencia elegido. Por convenio, se toma el infinito como nivel de referencia nulo:

$$E_p(\infty) = 0$$

Esta elección es especialmente adecuada para campos creados por cargas puntuales y sistemas de cargas localizadas, y es la utilizada habitualmente en la PAU.

Energía potencial eléctrica y conservación de la energía mecánica

Cuando una carga se mueve en un campo eléctrico bajo la acción exclusiva de la fuerza eléctrica, la energía mecánica del sistema se conserva. La energía mecánica se define como:

$$E_m = E_c + E_p$$

donde $E_c$es la energía cinética y $E_p$la energía potencial eléctrica. Si no actúan fuerzas no conservativas, se cumple que:

$$E_{m,\text{inicial}} = E_{m,\text{final}}$$

Esta relación permite analizar el movimiento de cargas en campos eléctricos sin necesidad de estudiar fuerzas y aceleraciones en cada punto.

Intercambio entre energía cinética y energía potencial

Cuando una carga se mueve espontáneamente bajo la acción del campo eléctrico, se produce un intercambio entre energía cinética y energía potencial eléctrica. Por ejemplo: una

carga positiva que se desplaza en la dirección del campo pierde energía potencial y gana energía cinética; una carga negativa que se desplaza en sentido contrario al campo pierde energía potencial y gana energía cinética.

Este intercambio energético explica la aceleración de cargas en campos eléctricos y es la base de numerosos dispositivos físicos y tecnológicos.

Caso particular: campo eléctrico uniforme

En un campo eléctrico uniforme, la diferencia de potencial entre dos puntos separados una distancia $d$en la dirección del campo es:

$$\Delta V = - E\, d$$

La variación de energía potencial eléctrica de una carga $q$al desplazarse entre dichos puntos es:

$$\Delta E_p = q\, \Delta V = - q\, E\, d$$

Esta expresión es especialmente importante en problemas de PAU relacionados con placas paralelas, donde se pide calcular variaciones de energía, trabajo del campo o velocidades alcanzadas por partículas cargadas.

Energía potencial eléctrica y fuerzas externas

Si sobre la carga actúan fuerzas externas además de la fuerza eléctrica, la variación de energía mecánica viene dada por el trabajo de dichas fuerzas externas. En este caso, se cumple que:

$$\Delta E_m = W_{\text{ext}}$$

Este resultado conecta directamente con los teoremas energéticos estudiados en el campo gravitatorio y prepara el terreno para el análisis más general del movimiento de cargas en el Capítulo 5.

Importancia de la energía potencial eléctrica en la PAU

En la PAU, la energía potencial eléctrica aparece: en problemas de conservación de la energía, en cálculos de trabajo del campo eléctrico, en movimiento de partículas entre placas, en combinación con diferencias de potencial.

Un error frecuente consiste en confundir la variación de potencial con la variación de energía potencial. Recordar la relación $\Delta E_p = q\, \Delta V$ es clave para evitar errores.

La energía potencial eléctrica permite describir la interacción eléctrica desde un punto de vista plenamente energético y completa el estudio del campo eléctrico iniciado con la Ley de Coulomb, el campo y el potencial eléctricos. Su relación directa con el trabajo de la fuerza eléctrica y con la conservación de la energía mecánica la convierte en una herramienta fundamental para el análisis del movimiento de cargas.

Con este epígrafe queda completado el Capítulo 4. Campo eléctrico, y el Bloque B queda preparado para abordar, en el siguiente capítulo, el movimiento de cargas en campos eléctricos y magnéticos.

Capítulo 5. Movimiento de cargas en campos

1. Movimiento de cargas en campo eléctrico

El estudio del movimiento de cargas en un campo eléctrico constituye la primera aplicación dinámica del campo eléctrico y enlaza directamente con los conceptos energéticos introducidos en el Capítulo 4. En este epígrafe se analiza cómo se mueve una partícula cargada cuando está sometida exclusivamente a la acción de un campo eléctrico, sin intervención todavía de campos magnéticos. Este planteamiento permite establecer una base sólida antes de abordar situaciones más complejas en las que intervienen simultáneamente campos eléctricos y magnéticos.

En el nivel de 2.º de Bachillerato, el análisis se restringe a campos eléctricos uniformes, que permiten una descripción clara, rigurosa y compatible con los problemas habituales de la PAU. Estos campos se obtienen, por ejemplo, entre dos placas planas y paralelas cargadas con signos opuestos.

Fuerza eléctrica sobre una carga

Cuando una carga eléctrica $q$se encuentra en una región donde existe un campo eléctrico $\mathbf{E}$, experimenta una fuerza eléctrica dada por la expresión fundamental:

$$\mathbf{F} = q\,\mathbf{E}$$

Esta ecuación resume el efecto dinámico del campo eléctrico sobre la carga. La fuerza es: proporcional al valor de la carga, proporcional al campo eléctrico, paralela al campo si la carga es positiva, de sentido contrario al campo si la carga es negativa.

A diferencia de la fuerza magnética, la fuerza eléctrica sí puede realizar trabajo, ya que no es necesariamente perpendicular a la velocidad de la partícula.

Ecuación fundamental del movimiento

Aplicando la segunda ley de Newton, la fuerza eléctrica produce una aceleración en la carga:

$$\mathbf{F} = m\,\mathbf{a}$$

Sustituyendo la expresión de la fuerza eléctrica:

$$m\,\mathbf{a} = q\,\mathbf{E}$$

y despejando la aceleración, se obtiene:

$$\boxed{\mathbf{a} = \frac{q}{m}\,\mathbf{E}}$$

Esta expresión muestra que, en un campo eléctrico uniforme, la aceleración de la carga es constante, ya que el campo **E** es constante. La dirección y el sentido de la aceleración dependen del signo de la carga.

Analogía con el movimiento en el campo gravitatorio

El movimiento de una carga en un campo eléctrico uniforme presenta una analogía directa con el movimiento de un cuerpo en un campo gravitatorio uniforme. En ambos casos: existe una fuerza constante, la aceleración es constante, el movimiento puede describirse mediante las ecuaciones del movimiento uniformemente acelerado.

Esta analogía es especialmente útil desde el punto de vista didáctico y permite interpretar el campo eléctrico como un campo capaz de acelerar partículas de forma controlada.

Movimiento rectilíneo en la dirección del campo

Si la velocidad inicial de la carga tiene la misma dirección que el campo eléctrico **E**, el movimiento es rectilíneo uniformemente acelerado. La aceleración viene dada por la expresión anterior y su módulo es:

$$a = \frac{|\,q\,|\;E}{m}$$

Las ecuaciones cinemáticas del movimiento son:

$$v = v_0 + a\,t$$
$$x = x_0 + v_0\,t + \frac{1}{2}\,a\,t^2$$
$$v^2 = v_0^2 + 2\,a\,(x - x_0)$$

Estas ecuaciones permiten calcular velocidades, posiciones y tiempos de forma directa en problemas de PAU.

Movimiento en campo eléctrico uniforme con velocidad perpendicular

Si una carga entra en un campo eléctrico uniforme con una velocidad inicial perpendicular al campo, el movimiento es bidimensional. En este caso: en la dirección del campo hay aceleración constante, en la dirección perpendicular al campo el movimiento es uniforme.

Como resultado, la trayectoria es parabólica, de forma completamente análoga al tiro horizontal en el campo gravitatorio.

Este tipo de movimiento aparece en dispositivos como tubos de rayos catódicos y constituye un ejemplo clásico en los ejercicios de Selectividad.

Descripción energética del movimiento

Además del enfoque dinámico, el movimiento de una carga en un campo eléctrico puede analizarse desde un punto de vista energético, lo que resulta especialmente útil en problemas donde no interesa el detalle del movimiento, sino el intercambio entre energía cinética y energía potencial eléctrica.

Cuando una carga se desplaza entre dos puntos A y B con diferencia de potencial ΔV, la variación de energía potencial eléctrica es:

$$\Delta E_p = q\,\Delta V$$

Si no actúan fuerzas no conservativas, se conserva la energía mecánica:

$$E_{c,A} + E_{p,A} = E_{c,B} + E_{p,B}$$

De esta relación se obtiene:

$$\Delta E_c = -\,\Delta E_p$$

lo que implica que la ganancia de energía cinética es igual a la pérdida de energía potencial eléctrica.

Trabajo del campo eléctrico

El trabajo realizado por el campo eléctrico al mover una carga entre dos puntos es:

$$W_{\text{eléctrico}} = -\,\Delta E_p = q\,(V_A - V_B)$$

Este trabajo es independiente del camino seguido, ya que el campo eléctrico electrostático es conservativo. Esta propiedad permite resolver numerosos problemas de forma sencilla, sin necesidad de analizar trayectorias completas.

Velocidad adquirida por una carga acelerada

Si una carga parte del reposo y se acelera en un campo eléctrico al atravesar una diferencia de potencial ΔV, su energía cinética final es:

$$E_c = q\,\Delta V$$

Sustituyendo la expresión de la energía cinética:

$$\frac{1}{2}\,m\,v^2 = q\,\Delta V$$

Despejando la velocidad, se obtiene:

$$\boxed{v = \sqrt{\frac{2\,q\,\Delta V}{m}}}$$

Esta expresión es fundamental en problemas de PAU y se utiliza, por ejemplo, para calcular la velocidad de electrones acelerados en tubos de vacío.

Signo de la carga y sentido del movimiento

Es importante destacar que el sentido del movimiento espontáneo depende del signo de la carga: una carga positiva se acelera en el sentido del campo eléctrico, una carga negativa se acelera en sentido contrario al campo.

Sin embargo, la expresión de la velocidad depende del valor absoluto de la carga, ya que la energía cinética es siempre positiva.

Limitaciones del modelo

El modelo desarrollado en este epígrafe se basa en varias hipótesis: campo eléctrico uniforme, ausencia de rozamiento, velocidades no relativistas, ausencia de campos magnéticos.

Estas condiciones son perfectamente compatibles con el nivel de 2.º de Bachillerato y con los problemas habituales de la PAU.

Importancia en la PAU

El movimiento de cargas en campo eléctrico aparece con frecuencia en la PAU: aceleración de partículas entre placas, cálculo de velocidades a partir de diferencias de potencial, análisis energético del movimiento.

Un error frecuente consiste en mezclar el enfoque dinámico y el energético sin coherencia. Elegir uno de los dos enfoques y aplicarlo correctamente es clave para una resolución rigurosa.

El estudio del movimiento de cargas en un campo eléctrico muestra cómo el campo eléctrico puede acelerar partículas y transferir energía de forma controlada. La descripción dinámica y la energética se complementan y proporcionan herramientas fundamentales para analizar sistemas reales.

Este epígrafe constituye la base necesaria para introducir, en los siguientes apartados, el campo magnético y la fuerza de Lorentz, donde se estudiará cómo el movimiento de las cargas se ve modificado por campos magnéticos, dando lugar a trayectorias de naturaleza diferente.

2. Campo magnético

El campo magnético es una manifestación fundamental del campo electromagnético y aparece asociado a cargas eléctricas en movimiento y a corrientes eléctricas. A diferencia del campo eléctrico, que puede existir debido a cargas en reposo, el campo magnético está ligado de forma inseparable al movimiento de la carga eléctrica. Este hecho introduce diferencias

conceptuales profundas entre ambos campos, que deben quedar claramente establecidas en el nivel de 2.º de Bachillerato.

El estudio del campo magnético es imprescindible para comprender el movimiento de partículas cargadas, el funcionamiento de dispositivos eléctricos y electrónicos, y la naturaleza unificada del electromagnetismo, desarrollada en el siglo XIX por Michael Faraday y James Clerk Maxwell.

Naturaleza del campo magnético

El campo magnético es un campo vectorial, representado mediante el vector **B**, que existe en una región del espacio cuando hay cargas en movimiento o corrientes eléctricas. En presencia de un campo magnético, una carga eléctrica solo experimenta fuerza si se encuentra en movimiento.

Esta propiedad distingue claramente el campo magnético del campo eléctrico: el campo eléctrico actúa sobre cargas en reposo y en movimiento, pero el campo magnético actúa únicamente sobre cargas en movimiento.

Por tanto, el campo magnético no realiza trabajo sobre una carga, ya que la fuerza magnética es siempre perpendicular a la velocidad de la partícula, como se estudiará en el epígrafe siguiente.

Definición operativa del campo magnético

El campo magnético en un punto del espacio se define a partir de la fuerza magnética que experimenta una carga eléctrica en movimiento cuando se sitúa en dicho punto. Aunque la expresión matemática completa de esta fuerza se estudiará en el epígrafe 3 (Fuerza de Lorentz), esta definición permite introducir el campo **B** como una magnitud física independiente del valor de la carga de prueba.

El campo magnético es, por tanto: una propiedad del espacio, independiente de la carga utilizada para detectarlo, característico de la región donde existen corrientes o cargas en movimiento.

Unidades del campo magnético

En el Sistema Internacional, el campo magnético se mide en teslas (T). Esta unidad se define a partir de la fuerza magnética que actúa sobre una carga en movimiento o sobre un conductor recorrido por corriente.

El tesla es una unidad relativamente grande, por lo que en muchos contextos prácticos se utilizan submúltiplos como el militesla (mT).

Representación del campo magnético: líneas de campo

El campo magnético puede representarse gráficamente mediante líneas de campo magnético, que permiten visualizar su dirección y su intensidad de forma cualitativa. Estas líneas presentan características específicas: son curvas cerradas, no tienen principio ni fin, su sentido se establece convencionalmente del polo norte al polo sur de un imán, la densidad de líneas es mayor donde el campo es más intenso.

A diferencia de las líneas de campo eléctrico, las líneas de campo magnético no comienzan ni terminan en cargas, lo que refleja una diferencia esencial entre ambos campos.

Campo magnético y imanes

Históricamente, el campo magnético se observó inicialmente en relación con los imanes naturales. Un imán crea un campo magnético en el espacio que lo rodea, capaz de ejercer fuerzas sobre otros imanes o sobre materiales ferromagnéticos.

Aunque el origen microscópico del magnetismo está relacionado con el movimiento de electrones en los átomos, en 2.º de Bachillerato se adopta una descripción macroscópica, centrada en el campo **B** como entidad física.

Campo magnético y corrientes eléctricas

Un resultado fundamental del electromagnetismo, descubierto por Hans Christian Ørsted en 1820, es que una corriente eléctrica crea un campo magnético en el espacio que la rodea. Este descubrimiento estableció por primera vez una conexión directa entre electricidad y magnetismo.

El estudio cuantitativo del campo magnético creado por corrientes se abordará en el Capítulo 6. En este epígrafe, el objetivo es únicamente establecer que: el movimiento ordenado de cargas genera campo magnético, dicho campo puede actuar sobre otras cargas en movimiento.

Comparación entre campo eléctrico y campo magnético

Aunque ambos forman parte del mismo campo electromagnético, existen diferencias claras entre el campo eléctrico y el campo magnético: el campo eléctrico puede existir en ausencia de movimiento de cargas; el campo magnético está ligado al movimiento de cargas; el campo eléctrico puede realizar trabajo sobre una carga; el campo magnético no modifica la energía cinética de una carga.

Estas diferencias explican por qué el campo magnético no puede analizarse desde un punto de vista puramente energético, sino que requiere un enfoque dinámico, centrado en el movimiento de las partículas.

Campo magnético como parte del campo electromagnético

El desarrollo de la teoría electromagnética culminó con las ecuaciones de Maxwell, que mostraron que el campo eléctrico y el campo magnético no son entidades independientes, sino dos manifestaciones de un mismo campo físico: el campo electromagnético.

Aunque el estudio detallado de esta unificación queda fuera del nivel de Bachillerato, es importante destacar que: un campo eléctrico variable puede generar un campo magnético, un campo magnético variable puede generar un campo eléctrico.

Este último aspecto será el núcleo del estudio de la inducción electromagnética en el Capítulo 7.

Importancia del campo magnético en la PAU

En la PAU, el campo magnético aparece: como concepto fundamental previo a la fuerza de Lorentz, en la interpretación del movimiento de cargas, en la base conceptual del magnetismo creado por corrientes.

Un error frecuente consiste en confundir el campo magnético con la fuerza magnética. Hay que recordar que el campo describe la región del espacio y la fuerza depende de la carga y de su velocidad es esencial para evitar errores conceptuales.

El campo magnético describe la influencia que ejercen las cargas en movimiento y las corrientes eléctricas sobre el espacio que las rodea. Como campo vectorial, introduce una interacción profundamente distinta de la eléctrica, caracterizada por su dependencia del movimiento de la carga y por su incapacidad para modificar la energía cinética de las partículas.

En el siguiente epígrafe se estudiará la fuerza de Lorentz, que permitirá analizar de forma cuantitativa cómo actúa el campo magnético sobre cargas eléctricas en movimiento.

3. Fuerza de Lorentz

La fuerza de Lorentz describe la acción que ejerce un campo magnético sobre una carga eléctrica en movimiento y permite explicar cómo dicho campo modifica la trayectoria de la partícula sin alterar su energía cinética. En este epígrafe se estudia, en primer lugar, la fuerza magnética como efecto específico del campo magnético, y posteriormente se presenta la expresión general de la fuerza de Lorentz, que incorpora también la fuerza eléctrica cuando ambos campos están presentes.

Este enfoque refleja correctamente la secuencia conceptual del electromagnetismo en el nivel de 2.º de Bachillerato: la fuerza eléctrica ya ha sido estudiada en capítulos anteriores, mientras que la fuerza magnética introduce un fenómeno nuevo, caracterizado por su dependencia del movimiento de la carga. La formulación general permite, finalmente, unificar ambos efectos en una sola expresión.

Fuerza magnética sobre una carga en movimiento

Cuando una carga eléctrica q se mueve con velocidad $\mathbf{v}$ en una región donde existe un campo magnético $\mathbf{B}$, experimenta una fuerza magnética cuya expresión vectorial es:

$$\mathbf{F}_m = q\,(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Esta fuerza solo aparece si la carga está en movimiento y constituye la manifestación característica del campo magnético sobre partículas cargadas.

Módulo, dirección y sentido de la fuerza magnética

El módulo de la fuerza magnética viene dado por:

$$F_m = \mid q \mid \; v\,B \sin\,\theta$$

donde θ es el ángulo entre el vector velocidad $\mathbf{v}$ y el vector campo magnético $\mathbf{B}$.

De esta expresión se deduce que: si la carga está en reposo, la fuerza es nula; si la velocidad es paralela al campo magnético, la fuerza es nula; la fuerza es máxima cuando la velocidad es perpendicular al campo.

La dirección de la fuerza es siempre perpendicular tanto a $\mathbf{v}$ como a $\mathbf{B}$. El sentido se determina mediante la regla de la mano derecha para cargas positivas; en el caso de cargas negativas, el sentido es el contrario.

Carácter perpendicular y consecuencias energéticas

Una propiedad fundamental de la fuerza magnética es que es siempre perpendicular a la velocidad de la partícula. Como consecuencia directa: la fuerza magnética no realiza trabajo, la energía cinética de la carga permanece constante, el campo magnético no puede acelerar ni frenar una partícula, solo cambiar la dirección de su movimiento.

Esta característica distingue de forma clara la fuerza magnética de la fuerza eléctrica y explica por qué el análisis del campo magnético debe realizarse desde un punto de vista dinámico y no energético.

Movimiento circular en un campo magnético uniforme

Si una carga entra en un campo magnético uniforme con velocidad perpendicular al campo, la fuerza magnética actúa como una fuerza centrípeta, dando lugar a un movimiento circular uniforme.

Aplicando la segunda ley de Newton:

$$\frac{m\,v^2}{r} = \mid q \mid \; v\,B$$

de donde se obtiene el radio de la trayectoria:

$$\boxed{r = \frac{m\,v}{|\,q\,|\;B}}$$

La trayectoria es una circunferencia contenida en un plano perpendicular al campo magnético.

Período del movimiento circular

El movimiento circular es uniforme, por lo que puede caracterizarse mediante un período T. Este período viene dado por:

$$T = \frac{2\pi r}{v}$$

Sustituyendo la expresión del radio:

$$\boxed{T = \frac{2\pi m}{|\,q\,|\;B}}$$

Este resultado es especialmente relevante, ya que el período: no depende de la velocidad de la partícula, depende únicamente de la masa, la carga y el campo magnético.

Movimiento helicoidal

Si la velocidad de la carga tiene una componente paralela al campo magnético y otra perpendicular, el movimiento resultante es una trayectoria helicoidal. En este caso: la componente perpendicular produce el movimiento circular, la componente paralela origina un movimiento rectilíneo uniforme.

Este tipo de movimiento aparece en numerosos contextos físicos, como el movimiento de partículas cargadas en el campo magnético terrestre.

Expresión general de la fuerza de Lorentz

Cuando una carga eléctrica se mueve en una región donde existen simultáneamente un campo eléctrico **E** y un campo magnético **B**, la fuerza total que actúa sobre ella viene dada por la expresión general de la fuerza de Lorentz:

$$\boxed{\mathrm{F} = q\,\mathrm{E} + q\,(\mathrm{v} \times \mathrm{B})}$$

Esta expresión no introduce un fenómeno nuevo, sino que reúne en una sola ecuación: la fuerza eléctrica, ya estudiada, la fuerza magnética, objeto principal de este epígrafe.

Interpretación física de la expresión general

La expresión general de la fuerza de Lorentz permite entender que: el campo eléctrico puede modificar el módulo de la velocidad (energía cinética), el campo magnético modifica

únicamente la dirección de la velocidad, el movimiento real de la carga resulta de la combinación de ambos efectos.

El análisis detallado de esta combinación se realizará en el siguiente epígrafe, dedicado específicamente a los campos eléctricos y magnéticos combinados.

Importancia en la PAU

En la PAU, la fuerza de Lorentz aparece principalmente en: el análisis del movimiento circular de partículas cargadas, el cálculo de radios y períodos, la interpretación cualitativa del papel del campo magnético.

Un error frecuente consiste en atribuir al campo magnético cambios en la energía de la partícula. Hay que recordar que la fuerza magnética no realiza trabajo es esencial para una resolución correcta.

La fuerza de Lorentz, introducida desde el estudio de la fuerza magnética y generalizada posteriormente, permite describir con precisión la acción del campo magnético sobre cargas en movimiento. Su carácter perpendicular a la velocidad explica la curvatura de las trayectorias y la conservación de la energía cinética.

Este epígrafe prepara de forma natural el estudio del caso en que campos eléctricos y magnéticos actúan simultáneamente, que se abordará en el siguiente apartado.

4. Campos eléctricos y magnéticos combinados

En numerosas situaciones físicas, una carga eléctrica se mueve en regiones del espacio donde existen simultáneamente un campo eléctrico y un campo magnético. El estudio de estos casos requiere combinar los efectos analizados por separado en los epígrafes anteriores, manteniendo clara la función específica de cada campo. Este apartado tiene como objetivo analizar cómo se modifica el movimiento de una carga cuando actúan a la vez ambos campos, sin introducir nuevos conceptos, sino aplicando de forma coherente los ya estudiados.

Desde el punto de vista didáctico, este epígrafe constituye una aplicación integrada del campo eléctrico, del campo magnético y de la fuerza de Lorentz, y permite comprender dispositivos y situaciones reales en las que el control del movimiento de partículas cargadas se logra mediante la combinación de campos.

Fuerza total sobre una carga

Cuando una carga eléctrica $q$se mueve con velocidad **v** en una región donde existen un campo eléctrico **E** y un campo magnético **B**, la fuerza total que actúa sobre ella viene dada por la expresión general de la fuerza de Lorentz:

$$\mathrm{F} = q\,\mathrm{E} + q\,(\mathrm{v} \times \mathrm{B})$$

Esta expresión muestra claramente que: el campo eléctrico actúa independientemente de la velocidad de la carga, el campo magnético actúa únicamente si la carga está en movimiento y su efecto depende de la dirección de **v**.

La fuerza total es la suma vectorial de ambas contribuciones, por lo que su dirección y sentido dependen de la orientación relativa de **E**, **B** y **v**.

Papel diferenciado de los campos eléctrico y magnético

Es fundamental distinguir el efecto físico de cada campo: el campo eléctrico puede modificar el módulo de la velocidad de la carga, ya que realiza trabajo y produce variaciones de energía cinética; el campo magnético no modifica la energía cinética, pero cambia la dirección de la velocidad, curvando la trayectoria.

Como consecuencia, en presencia simultánea de ambos campos, el movimiento de la carga resulta de la combinación de: aceleraciones debidas al campo eléctrico, desviaciones debidas al campo magnético.

Movimiento en campos cruzados

Un caso de especial interés es aquel en el que los campos eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí y la velocidad de la carga es perpendicular al campo magnético. Esta configuración aparece en numerosos dispositivos experimentales y tecnológicos.

En estas condiciones, la fuerza eléctrica y la fuerza magnética pueden actuar en sentidos opuestos. Si ambas fuerzas tienen el mismo módulo, la fuerza total es nula y la carga se mueve con velocidad constante en línea recta.

La condición de equilibrio dinámico es:

$$q\,E = q\,v\,B$$

de donde se obtiene la velocidad:

$$\boxed{v = \frac{E}{B}}$$

Esta expresión es independiente de la masa y de la carga de la partícula, lo que permite seleccionar partículas según su velocidad.

Selector de velocidades

El dispositivo basado en la condición anterior se conoce como selector de velocidades. Solo las partículas cuya velocidad cumple la relación $v = \frac{E}{B}$ atraviesan la región sin desviarse, mientras que el resto son desviadas por la acción conjunta de los campos.

Este principio tiene una gran importancia conceptual y aparece con frecuencia en problemas de PAU, donde se pide justificar por qué determinadas partículas siguen trayectorias rectilíneas en presencia de campos cruzados.

Análisis energético en campos combinados

Desde el punto de vista energético, únicamente el campo eléctrico puede modificar la energía cinética de la carga. El trabajo total realizado sobre la carga viene dado por:

$$W = W_{\text{eléctrico}} + W_{\text{magnético}}$$

Dado que la fuerza magnética no realiza trabajo, se cumple que:

$$W_{\text{magnético}} = 0$$

y, por tanto:

$$W = W_{\text{eléctrico}} = -\Delta E_p$$

Este resultado permite aplicar directamente los principios de conservación de la energía mecánica cuando solo actúan campos eléctricos, incluso en presencia de un campo magnético.

Trayectorias en campos combinados

La forma concreta de la trayectoria de una carga en campos eléctricos y magnéticos combinados depende de: la orientación relativa de los campos, el signo de la carga, las condiciones iniciales de velocidad.

En general, el movimiento puede presentar trayectorias complejas, pero en el nivel de Bachillerato se analizan únicamente configuraciones sencillas, en las que los campos son uniformes y mutuamente perpendiculares.

Importancia en la PAU

En la PAU, los campos eléctricos y magnéticos combinados aparecen: en el estudio del selector de velocidades, en problemas cualitativos sobre trayectorias, en la interpretación del papel de cada campo.

Un error frecuente consiste en atribuir al campo magnético variaciones de energía. Hay que recordar que solo el campo eléctrico realiza trabajo es clave para evitar errores conceptuales.

El estudio de los campos eléctricos y magnéticos combinados muestra cómo el movimiento de cargas puede controlarse mediante la acción simultánea de ambos campos. La fuerza de Lorentz proporciona el marco teórico adecuado para describir estos movimientos y permite integrar de forma coherente los efectos eléctricos y magnéticos.

Con este epígrafe queda completado el Capítulo 5. Movimiento de cargas en campos, cerrando una parte esencial del Bloque B y preparando el terreno para el estudio del origen del campo magnético en las corrientes eléctricas, que se abordará en el Capítulo 6.

Capítulo 6. Campo magnético creado por corrientes

Este capítulo se centra en el origen del campo magnético, completando la visión iniciada en el capítulo anterior. Mientras que en el Capítulo 5 se ha estudiado cómo actúa el campo magnético sobre cargas en movimiento, ahora se aborda la cuestión inversa: cómo se genera el campo magnético.

En el nivel de 2.º de Bachillerato, el estudio se restringe a configuraciones sencillas de corrientes eléctricas, que permiten describir el campo magnético mediante expresiones accesibles y directamente aplicables en problemas de PAU. No se introducen formulaciones generales avanzadas, sino relaciones experimentales fundamentales que conectan corriente eléctrica y campo magnético.

1. Corriente rectilínea

Una de las configuraciones más simples y fundamentales para el estudio del campo magnético es la de una corriente rectilínea indefinida. Se trata de un conductor largo por el que circula una corriente eléctrica constante. Esta situación, aunque idealizada, permite establecer las propiedades básicas del campo magnético creado por corrientes.

Corriente eléctrica como movimiento ordenado de cargas

Una corriente eléctrica es el movimiento ordenado de cargas eléctricas a través de un conductor. En los conductores metálicos, este movimiento corresponde principalmente al desplazamiento de electrones. Aunque las cargas individuales se mueven con velocidades pequeñas, el efecto colectivo da lugar a un campo magnético medible en el espacio que rodea al conductor.

El sentido de la corriente se define convencionalmente como el sentido del movimiento de cargas positivas, aunque en la práctica los portadores de carga sean negativos.

Descubrimiento del campo magnético creado por corrientes

La relación entre corriente eléctrica y campo magnético fue descubierta experimentalmente por Hans Christian Ørsted en 1820. Ørsted observó que una aguja imantada se desviaba al situarse cerca de un conductor recorrido por corriente, lo que evidenciaba la existencia de un campo magnético generado por la corriente eléctrica.

Este experimento marcó el inicio del electromagnetismo como disciplina unificada y mostró que el magnetismo no es un fenómeno independiente, sino una consecuencia del movimiento de cargas eléctricas.

Forma del campo magnético alrededor de un conductor rectilíneo

El campo magnético creado por una corriente rectilínea presenta una geometría característica. Las líneas de campo magnético son circunferencias concéntricas contenidas en planos perpendiculares al conductor, con centro en el propio conductor.

El sentido de las líneas de campo se determina mediante la regla de la mano derecha: el pulgar indica el sentido de la corriente, los dedos curvados indican el sentido del campo magnético **B**.

Esta regla proporciona una forma sencilla y eficaz de determinar la orientación del campo magnético en cualquier punto del espacio.

Expresión del campo magnético creado por una corriente rectilínea

El módulo del campo magnético creado por una corriente rectilínea indefinida, en un punto situado a una distancia $r$del conductor, viene dado por la expresión:

$$\boxed{B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}}$$

donde: Ies la intensidad de corriente, r es la distancia al conductor, μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío.

Esta expresión muestra que el campo magnético: es directamente proporcional a la corriente, disminuye al aumentar la distancia al conductor, depende del medio a través del cual se propaga.

Vector campo magnético

El campo magnético es una magnitud vectorial. En cada punto del espacio, el vector **B** es tangente a la línea de campo que pasa por dicho punto y su sentido viene determinado por la regla de la mano derecha.

Aunque en muchos problemas de PAU se trabaja únicamente con el módulo del campo, es esencial comprender la dirección y el sentido del vector **B**, especialmente en situaciones donde intervienen fuerzas magnéticas sobre cargas o corrientes.

Comparación con el campo eléctrico de una carga puntual

Existe una analogía formal entre: el campo eléctrico creado por una carga puntual y el campo magnético creado por una corriente rectilínea.

En ambos casos: el campo disminuye con la distancia y existe simetría alrededor de la fuente.

Sin embargo, también existen diferencias fundamentales: el campo eléctrico tiene líneas abiertas que comienzan y terminan en cargas, pero el campo magnético presenta líneas cerradas. Estas diferencias reflejan la naturaleza distinta de ambas interacciones.

Dependencia del campo con el medio

La expresión del campo magnético incluye la constante μ_0, que caracteriza la respuesta del vacío al campo magnético. En medios materiales, esta constante puede modificarse, aunque en el nivel de 2.º de Bachillerato se considera, salvo indicación contraria, que el campo se propaga en el vacío o en aire.

Importancia en la PAU

En la PAU, el campo magnético creado por una corriente rectilínea aparece: en el cálculo del módulo del campo en un punto, en la determinación de la fuerza sobre una carga o una corriente, en el análisis cualitativo de la dirección del campo.

Un error frecuente consiste en confundir la distancia al conductor con la longitud del conductor. La expresión del campo depende exclusivamente de la distancia perpendicular al conductor.

El estudio del campo magnético creado por una corriente rectilínea permite comprender el origen del magnetismo a partir del movimiento de cargas eléctricas. La geometría circular del campo y su dependencia con la corriente y la distancia constituyen resultados fundamentales del electromagnetismo clásico.

Este epígrafe sienta las bases para analizar, en el siguiente apartado, la interacción entre corrientes eléctricas, que pone de manifiesto el carácter dinámico del campo magnético y su capacidad para ejercer fuerzas sobre otros conductores.

2. Fuerza entre corrientes

El estudio de la fuerza entre corrientes pone de manifiesto que el campo magnético no solo actúa sobre cargas en movimiento, sino también sobre conductores recorridos por corriente. Este fenómeno constituye una de las evidencias experimentales más claras de la conexión entre electricidad y magnetismo y permite comprender cómo dos corrientes pueden atraerse o repelerse mutuamente.

Desde el punto de vista conceptual, este epígrafe completa la secuencia lógica del electromagnetismo clásico: una corriente crea un campo magnético (epígrafe 6.1) y dicho campo ejerce fuerzas sobre otras corrientes. El análisis se realiza en configuraciones sencillas, compatibles con el nivel de 2.º de Bachillerato y con los problemas habituales de la PAU.

Planteamiento físico del problema.

Consideremos dos conductores rectilíneos, largos y paralelos, separados una distancia d, por los que circulan corrientes estacionarias I_1 e I_2. Cada conductor crea un campo magnético en el espacio que lo rodea, y dicho campo actúa sobre el otro conductor, dando lugar a una fuerza magnética.

El fenómeno es simétrico: el conductor 1 crea un campo magnético que actúa sobre el conductor 2, el conductor 2 crea un campo magnético que actúa sobre el conductor 1.

Las fuerzas que se ejercen ambos conductores cumplen el principio de acción y reacción.

Campo magnético creado por el primer conductor

El campo magnético creado por un conductor rectilíneo recorrido por una corriente I_1, a una distancia d, tiene módulo:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d}$$

Este campo es perpendicular al plano formado por los conductores y su sentido viene determinado por la regla de la mano derecha.

Fuerza magnética sobre un conductor recorrido por corriente

Un conductor recorrido por una corriente eléctrica puede considerarse como un conjunto de cargas en movimiento. Cuando dicho conductor se encuentra en un campo magnético **B**, experimenta una fuerza magnética.

El módulo de la fuerza que actúa sobre un tramo rectilíneo de conductor de longitud L, recorrido por una corriente I, situado en un campo magnético uniforme y perpendicular al conductor, viene dado por:

$$\boldsymbol{F} = I \cdot (\boldsymbol{L} \; x \; \boldsymbol{B}) = I \, L \, B \, sen \, \alpha$$

Esta expresión es la base para analizar la interacción entre corrientes.

Fuerza ejercida por el conductor 1 sobre el conductor 2

El conductor 2, recorrido por una corriente I_2, se encuentra en el campo magnético creado por el conductor 1. Sustituyendo el valor del campo B_1 en la expresión de la fuerza, se obtiene:

$$F = I_2 \, L \, B_1 = I_2 \, L \, \frac{\mu_0 \, I_1}{2\pi d}$$

Reordenando términos:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \; \frac{I_1 I_2}{d} \; L$$

Dado que la fuerza es proporcional a la longitud del conductor, resulta conveniente introducir la fuerza por unidad de longitud.

Fuerza por unidad de longitud

Se define la fuerza por unidad de longitud como:

$$\boxed{\frac{F}{L} = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{d}}$$

Esta expresión es fundamental en electromagnetismo y aparece de forma directa en los ejercicios de PAU. Describe la interacción entre dos corrientes rectilíneas largas y paralelas y permite calcular la intensidad de la fuerza sin necesidad de conocer la longitud total de los conductores.

Sentido de la fuerza: atracción y repulsión

El sentido de la fuerza depende del sentido relativo de las corrientes: si las corrientes circulan en el mismo sentido, los conductores se atraen; si las corrientes circulan en sentidos opuestos, los conductores se repelen.

Este resultado puede justificarse aplicando la regla de la mano derecha para determinar el sentido del campo magnético creado por uno de los conductores y, a continuación, el sentido de la fuerza sobre el otro conductor.

Interpretación física del fenómeno

La fuerza entre corrientes puede interpretarse como una consecuencia directa de la fuerza magnética sobre cargas en movimiento. Las cargas que constituyen la corriente del segundo conductor se mueven en el campo magnético creado por el primero y experimentan una fuerza de Lorentz, cuyo efecto colectivo da lugar a una fuerza neta sobre el conductor.

Esta interpretación refuerza la idea de que el campo magnético es una entidad física real, capaz de transmitir interacciones entre sistemas eléctricos.

Acción y reacción

Las fuerzas que se ejercen mutuamente los dos conductores tienen: el mismo módulo, la misma dirección, sentidos opuestos.

Esto garantiza el cumplimiento del tercer principio de Newton y muestra que la interacción magnética entre corrientes es una interacción mutua.

Relación con la definición del amperio

Históricamente, la expresión de la fuerza por unidad de longitud entre dos corrientes ha sido utilizada para definir la unidad de intensidad de corriente, el amperio. Aunque esta definición ha sido actualizada en el Sistema Internacional moderno, sigue siendo de gran interés conceptual y didáctico.

Según la definición clásica, dos conductores paralelos, separados una distancia de un metro y recorridos por corrientes iguales, experimentan una fuerza determinada por unidad de longitud.

Limitaciones del modelo

La expresión obtenida para $\frac{F}{L}$ es válida bajo las siguientes condiciones: conductores rectilíneos y largos, corrientes constantes, distancia entre conductores mucho menor que su longitud, medio homogéneo (vacío o aire).

Estas condiciones son plenamente compatibles con el nivel de 2.º de Bachillerato y con los problemas planteados en la PAU.

Importancia en la PAU

En la PAU, la fuerza entre corrientes aparece: en el cálculo del módulo de F/L, en la interpretación del sentido de la fuerza, como aplicación directa del campo magnético creado por corrientes.

Un error frecuente consiste en confundir esta fuerza con la fuerza entre cargas puntuales. Recordar que aquí se trata de conductores recorridos por corrient**e** es esencial para una correcta resolución.

La fuerza entre corrientes muestra de forma clara cómo el campo magnético media la interacción entre sistemas eléctricos en movimiento. La expresión de la fuerza por unidad de longitud proporciona una herramienta sencilla y potente para cuantificar esta interacción y conecta directamente el estudio del campo magnético con la dinámica de conductores reales.

Este epígrafe prepara el análisis de situaciones más complejas, en las que intervienen varias corrientes simultáneamente, que se abordará en el siguiente apartado dedicado a la superposición de campos.

3. Superposición de campos

El principio de superposición de campos permite analizar el campo magnético creado por varias corrientes simultáneamente a partir de la suma de los campos producidos por cada una de ellas por separado. Este principio es una consecuencia directa del carácter lineal del campo magnético en las situaciones tratadas en 2.º de Bachillerato y constituye una herramienta esencial para resolver problemas reales de electromagnetismo con rigor y sencillez.

Desde el punto de vista conceptual, este epígrafe completa el estudio del origen del campo magnético iniciado en los apartados anteriores, proporcionando un método general para calcular el campo resultante cuando intervienen múltiples conductores.

Principio de superposición aplicado al campo magnético

El principio de superposición establece que el campo magnético total en un punto del espacio es la suma vectorial de los campos magnéticos creados por cada corriente considerada de forma independiente. Matemáticamente:

$$\mathrm{B}_{\mathrm{total}} = \sum \mathrm{B}_i$$

donde $\mathbf{B}_i$ es el campo magnético creado por la corriente I_i en el punto considerado.

Este principio es análogo al aplicado previamente en el campo gravitatorio y en el campo eléctrico, y refleja que cada corriente contribuye al campo magnético sin verse alterada por la presencia de las demás.

Carácter vectorial del campo magnético

Es fundamental recordar que el campo magnético es una magnitud vectorial. Por tanto, la superposición no se realiza sumando módulos, sino teniendo en cuenta: la dirección de cada campo, su sentido, su módulo.

En la práctica, esto implica que el cálculo del campo resultante exige determinar previamente la orientación de cada vector $\mathbf{B}_i$, utilizando reglas como la regla de la mano derecha, antes de realizar la suma vectorial.

Campo magnético creado por varias corrientes rectilíneas

Consideremos un conjunto de conductores rectilíneos largos, recorridos por corrientes estacionarias. Cada conductor crea un campo magnético cuyo módulo venía dado por:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Para aplicar el principio de superposición:

1. se calcula el campo creado por cada conductor en el punto considerado,
2. se determina la dirección y el sentido de cada campo,
3. se realiza la suma vectorial de todos ellos.

Este procedimiento permite analizar configuraciones con dos o más corrientes sin necesidad de introducir nuevas leyes físicas.

Casos de simetría

En muchas configuraciones de interés, la simetría geométrica simplifica notablemente el cálculo del campo magnético total. Por ejemplo: dos conductores idénticos con corrientes iguales y simétricamente situados, conductores equidistantes del punto donde se calcula el campo.

En estos casos, algunas contribuciones pueden anularse parcial o totalmente, dando lugar a campos resultantes nulos o dirigidos según una dirección privilegiada.

El reconocimiento de estas simetrías es clave para resolver problemas de PAU de forma rápida y eficaz.

Superposición y fuerza sobre corrientes

Una vez calculado el campo magnético total mediante superposición, este campo puede utilizarse para determinar la fuerza magnétic**a** que actúa sobre un conductor recorrido por corriente o sobre una carga en movimiento.

La secuencia correcta es siempre:

1. calcular el campo magnético total **B**,
2. aplicar la expresión de la fuerza correspondiente.

Este orden evita errores conceptuales frecuentes, como intentar sumar directamente fuerzas sin haber determinado previamente el campo resultante.

Diferencia entre superposición de campos y campos combinados

Es importante no confundir este epígrafe con el estudio de campos eléctricos y magnéticos combinados del Capítulo 5. En el presente apartado: solo se estudia el campo magnético, no interviene el movimiento de cargas como objeto de estudio, no se analiza la fuerza de Lorentz.

Aquí se responde a la pregunta:

¿Qué campo magnético hay en un punto cuando existen varias corrientes?

Esta distinción es fundamental para mantener la coherencia conceptual del índice.

Limitaciones del principio de superposición

El principio de superposición es válido en el régimen tratado en Bachillerato, donde: las corrientes son estacionarias, los campos no varían con el tiempo, los efectos relativistas y no lineales son despreciables.

Estas hipótesis son plenamente compatibles con el nivel de la PAU y permiten un tratamiento claro y riguroso de los problemas.

Importancia en la PAU

En la PAU, la superposición de campos magnéticos aparece: en problemas con varios conductores, en cálculos del campo total en puntos concretos, o como paso previo al cálculo de fuerzas entre corrientes.

Un error frecuente consiste en sumar módulos de campos sin tener en cuenta su orientación. Recordar siempre el carácter vectorial del campo es esencial.

El principio de superposición de campos magnéticos proporciona un método general y potente para analizar sistemas formados por varias corrientes eléctricas. Su correcta aplicación permite calcular campos resultantes complejos a partir de configuraciones sencillas y constituye una herramienta esencial del electromagnetismo clásico.

Con este epígrafe queda completado el Capítulo 6. Campo magnético creado por corrientes, cerrando el estudio del origen del campo magnético y preparando el terreno para abordar, en el siguiente capítulo, los fenómenos de inducción electromagnética, donde los campos variables en el tiempo juegan un papel fundamental.

Capítulo 7. Inducción electromagnética

El estudio de la inducción electromagnética supone el cierre natural del Bloque B y representa uno de los hitos fundamentales de la Física del siglo XIX. Mientras que en los capítulos anteriores se ha analizado cómo las corrientes eléctricas generan campos magnéticos y cómo estos campos actúan sobre cargas y conductores, en este capítulo se aborda el fenómeno inverso: cómo un campo magnético variable puede dar lugar a efectos eléctricos.

Este descubrimiento, asociado principalmente a los trabajos de Michael Faraday y Joseph Henry, reveló una conexión profunda entre electricidad y magnetismo y permitió el desarrollo de dispositivos esenciales como generadores eléctricos, transformadores y sistemas de producción de energía eléctrica.

En 2.º de Bachillerato, el estudio de la inducción electromagnética se centra en configuraciones sencillas y en la formulación cualitativa y cuantitativa básica del fenómeno, sin recurrir a formalismos avanzados, pero manteniendo el rigor conceptual necesario para su correcta comprensión.

1. Flujo magnético

El concepto de flujo magnético es fundamental para describir y cuantificar los fenómenos de inducción electromagnética. El flujo magnético permite medir, de forma global, cómo atraviesa un campo magnético una determinada superficie, y constituye la magnitud clave que interviene en las leyes de la inducción.

Antes de introducir cualquier ley de inducción, es imprescindible definir con claridad esta magnitud y analizar de qué factores depende.

Definición de flujo magnético

El flujo magnético, representado por la magnitud escalar Φ, se define como el producto escalar del campo magnético $\mathbf{B}$ por el vector superficie $\mathbf{S}$, asociado a una determinada superficie:

$$\boxed{\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}}$$

donde:

B es el vector campo magnético,

S es un vector perpendicular a la superficie, cuyo módulo es igual al área de la superficie y cuyo sentido se elige de forma convencional.

Esta definición pone de manifiesto que el flujo magnético depende no solo del módulo del campo, sino también de la orientación de la superficie respecto al campo magnético.

Expresión del flujo magnético en términos escalares

Cuando el campo magnético es uniforme y atraviesa una superficie plana, el flujo magnético puede expresarse como:

$$\boxed{\Phi = B\,S\cos\,\theta}$$

donde:

B es el módulo del campo magnético,

S es el área de la superficie,

θ es el ángulo entre el vector **B** y el vector superficie **S**.

Esta expresión es la más utilizada en problemas de PAU y permite analizar de forma sencilla cómo varía el flujo magnético al cambiar la orientación de la superficie o la intensidad del campo.

Interpretación física del flujo magnético

El flujo magnético puede interpretarse como una medida del número de líneas de campo magnético que atraviesan una superficie. Aunque las líneas de campo son una construcción conceptual, esta interpretación resulta muy útil desde el punto de vista cualitativo.

De acuerdo con esta interpretación:

El flujo es máximo cuando el campo es perpendicular a la superficie ($\theta = 0$),

El flujo es nulo cuando el campo es paralelo a la superficie ($\theta = 90°$),

El flujo cambia si cambia el campo, el área o la orientación de la superficie.

Carácter escalar del flujo magnético

A diferencia del campo magnético, el flujo magnético es una magnitud escalar, aunque puede tomar valores positivos o negativos según la orientación relativa entre **B** y **S**.

El signo del flujo no tiene un significado absoluto, sino que depende de la elección del sentido del vector superficie. Esta elección se realiza normalmente mediante la regla de la mano derecha, especialmente cuando la superficie está asociada a un circuito eléctrico.

Unidad del flujo magnético

En el Sistema Internacional, la unidad de flujo magnético es el weber (Wb). A partir de la expresión del flujo, se deduce que:

$$1\ \text{Wb} = 1\ \text{T} \cdot \text{m}^2$$

Esta unidad aparece con frecuencia en los enunciados de problemas de inducción electromagnética en la PAU.

Flujo magnético asociado a un circuito

En muchos casos de interés, la superficie considerada es la superficie delimitada por un circuito cerrado. En este contexto, el flujo magnético se asocia directamente al circuito y se convierte en la magnitud clave para describir los fenómenos de inducción.

El flujo magnético a través de un circuito puede variar por diferentes motivos: variación del campo magnético, variación del área del circuito, variación de la orientación del circuito respecto al campo.

Estas tres posibilidades serán fundamentales en el estudio de la inducción electromagnética.

Flujo magnético y número de espiras

Si el circuito está formado por N espiras idénticas, el flujo magnético total asociado al circuito viene dado por:

$$\boxed{\Phi_{\text{total}} = N\,\Phi}$$

Este resultado es especialmente importante en aplicaciones prácticas y en problemas de PAU relacionados con bobinas y espiras múltiples.

Variación del flujo magnético

La inducción electromagnética no depende del valor absoluto del flujo magnético, sino de su variación. Una variación del flujo magnético puede producirse cuando: cambia el módulo del campo magnético, cambia el área de la superficie, cambia el ángulo θ.

Este hecho será la base de la Ley de Faraday-Henry, que se estudiará en el siguiente epígrafe.

Ejemplos conceptuales de variación del flujo

Sin necesidad de introducir todavía leyes matemáticas, pueden considerarse ejemplos sencillos: una espira que gira en un campo magnético uniforme, una espira que entra o sale de una región con campo magnético, un campo magnético que varía con el tiempo.

En todos estos casos, existe una variación del flujo magnético, condición necesaria para que aparezcan fenómenos de inducción.

Importancia del flujo magnético en la PAU

En la PAU, el flujo magnético aparece: como definición fundamental, en el cálculo del flujo a través de superficies, como paso previo a la aplicación de la ley de Faraday.

Un error frecuente consiste en confundir el flujo con el campo magnético. Hay que recordar que el flujo depende del área y de la orientación es esencial para evitar errores.

El flujo magnético proporciona una medida global de la interacción entre un campo magnético y una superficie y constituye la magnitud central en la descripción de la inducción electromagnética. Su definición clara y su interpretación física permiten comprender por qué es necesaria una variación del flujo para que se produzcan efectos eléctricos inducidos.

En el siguiente epígrafe se formulará la Ley de Faraday-Henry, que establece la relación cuantitativa entre la variación del flujo magnético y la aparición de una fuerza electromotriz inducida.

2. Ley de Faraday-Henry

La Ley de Faraday-Henry establece la relación fundamental entre la variación del flujo magnético que atraviesa un circuito y la aparición de una fuerza electromotriz inducida en dicho circuito. Esta ley constituye el núcleo cuantitativo de la inducción electromagnética y permite explicar cómo un fenómeno magnético puede dar lugar a efectos eléctricos sin necesidad de contacto directo entre los sistemas implicados.

Históricamente, la ley fue descubierta de forma independiente por Michael Faraday en Inglaterra y Joseph Henry en Estados Unidos, a partir de experimentos en los que se observó la aparición de corrientes eléctricas inducidas al variar las condiciones magnéticas de un circuito. Estos descubrimientos demostraron que la electricidad y el magnetismo no son fenómenos independientes, sino manifestaciones de una misma interacción física.

Enunciado cualitativo de la ley

De forma cualitativa, la Ley de Faraday-Henry puede enunciarse del siguiente modo:

> *Siempre que varía el flujo magnético que atraviesa un circuito cerrado, se induce en él una fuerza electromotriz.*

Este enunciado pone de relieve dos ideas clave: no es necesario que exista un campo magnético intenso, basta con que el flujo varíe; la inducción está asociada al circuito, no a un punto concreto del espacio.

La ley no especifica aún el sentido de la corriente inducida, aspecto que se abordará en el siguiente epígrafe mediante la Ley de Lenz.

Enunciado matemático de la Ley de Faraday-Henry

Desde el punto de vista cuantitativo, la fuerza electromotriz inducida ε en un circuito viene dada por la expresión:

$$\boxed{\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}$$

donde:

Φ es el flujo magnético que atraviesa el circuito,

$\Delta\Phi$ es la variación del flujo magnético,

Δt es el intervalo de tiempo en el que se produce dicha variación.

Esta expresión es válida para los fenómenos de inducción tratados en 2.º de Bachillerato y constituye la forma habitual en los problemas de PAU.

Caso de un circuito con varias espiras

Si el circuito está formado por N espiras idénticas, la fuerza electromotriz inducida es proporcional al número de espiras:

$$\boxed{\varepsilon = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}$$

Este resultado muestra que el efecto de la inducción se intensifica cuando aumenta el número de espiras, hecho que tiene una gran importancia práctica en dispositivos como bobinas y generadores eléctricos.

Significado físico del signo negativo

En la expresión de la ley aparece un signo negativo cuyo significado no es matemático, sino físico. Este signo indica que la fuerza electromotriz inducida se opone a la causa que la produce, es decir, a la variación del flujo magnético.

La interpretación precisa de este signo se desarrollará en el siguiente epígrafe mediante la Ley de Lenz, que permite determinar el sentido de la corriente inducida en cada situación concreta.

Formas de variar el flujo magnético

La Ley de Faraday-Henry es general y se aplica a cualquier situación en la que el flujo magnético varíe. Como ya se indicó en el epígrafe anterior, dicha variación puede producirse por distintas causas: variación del módulo del campo magnético, variación del área del circuito, variación de la orientación del circuito respecto al campo.

La ley es válida independientemente del mecanismo concreto que origine la variación del flujo.

Inducción sin movimiento del circuito

Un aspecto importante de la Ley de Faraday-Henry es que la inducción puede producirse sin que el circuito se mueva, siempre que el campo magnético varíe con el tiempo. En este caso, la variación del flujo se debe exclusivamente a la variación del campo.

Este hecho pone de manifiesto que la inducción electromagnética no requiere necesariamente movimiento mecánico, sino únicamente una variación temporal de las condiciones magnéticas.

Inducción con movimiento del circuito

También puede producirse inducción cuando el campo magnético es constante, pero el circuito se mueve o cambia su orientación. En este caso, la variación del flujo se debe a cambios geométricos del circuito, como su área o su orientación.

En ambos casos, el factor determinante es siempre la variación del flujo magnético, tal como establece la Ley de Faraday-Henry.

Carácter experimental de la ley

La Ley de Faraday-Henry es una ley experimental, deducida a partir de la observación directa de los fenómenos de inducción. No se deriva de otras leyes más simples en el nivel de Bachillerato, sino que se acepta como un principio fundamental del electromagnetismo clásico.

Su formulación constituye uno de los pilares sobre los que se construye la teoría electromagnética desarrollada posteriormente por Maxwell.

Importancia en la PAU

En la PAU, la Ley de Faraday-Henry aparece: en el cálculo de fuerzas electromotrices inducidas, en problemas con espiras y bobinas, en el análisis cualitativo de fenómenos de inducción.

Un error frecuente consiste en aplicar la ley al valor del flujo y no a su variación. Hay que recordar que la inducción depende de $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ es esencial para una correcta resolución.

La Ley de Faraday-Henry establece la relación cuantitativa fundamental entre la variación del flujo magnético y la aparición de una fuerza electromotriz inducida. Esta ley permite describir de forma unificada todos los fenómenos de inducción electromagnética tratados en Bachillerato y constituye la base para comprender el funcionamiento de numerosos dispositivos eléctricos.

En el siguiente epígrafe se introducirá la Ley de Lenz, que permitirá determinar el sentido de la corriente inducida y completar la interpretación física del fenómeno de inducción.

3. Ley de Lenz

La Ley de Lenz establece el criterio físico que permite determinar el sentido de la corriente inducida cuando se produce un fenómeno de inducción electromagnética. Esta ley no introduce una nueva magnitud ni ecuación independiente, sino que proporciona la interpretación física del signo negativo que aparece en la Ley de Faraday-Henry.

Desde el punto de vista conceptual, la Ley de Lenz es esencial para comprender por qué la inducción electromagnética no viola los principios fundamentales de la Física, en particular el principio de conservación de la energía. Su correcta aplicación es clave en los ejercicios de PAU, donde con frecuencia se pide justificar el sentido de la corriente inducida.

Enunciado de la Ley de Lenz

La Ley de Lenz puede enunciarse de la siguiente forma:

> *La corriente inducida en un circuito tiene un sentido tal que el campo magnético que crea se opone a la variación del flujo magnético que la produce.*

Este enunciado debe interpretarse con cuidado. La oposición no se produce frente al campo magnético existente, sino frente a la variación del flujo magnético que atraviesa el circuito.

Relación con la Ley de Faraday-Henry

La expresión matemática de la Ley de Faraday-Henry es:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

El signo negativo que aparece en esta expresión es precisamente la manifestación matemática de la Ley de Lenz. Este signo indica que la fuerza electromotriz inducida, y por tanto la corriente inducida, se orienta de manera que su efecto magnético se opone a la causa que la genera.

La Ley de Lenz no añade un nuevo término a la ecuación, sino que da significado físico al signo negativo.

Interpretación física de la oposición

Cuando el flujo magnético a través de un circuito aumenta, la corriente inducida crea un campo magnético que tiende a disminuir ese aumento. Cuando el flujo magnético disminuye, la corriente inducida crea un campo magnético que tiende a compensar esa disminución.

En ambos casos, el sistema responde intentando mantener el flujo magnético, oponiéndose a su variación. Esta respuesta es una manifestación general del comportamiento de los sistemas físicos frente a perturbaciones externas.

Determinación del sentido de la corriente inducida

Para aplicar correctamente la Ley de Lenz en problemas, se sigue un procedimiento sistemático:

1. Determinar el sentido del campo magnético externo que atraviesa el circuito.
2. Analizar cómo varía el flujo magnético (aumenta o disminuye).
3. Determinar el sentido del campo magnético inducido que se opone a esa variación.
4. Aplicar la regla de la mano derecha para obtener el sentido de la corriente inducida.

Este método evita errores frecuentes y permite justificar el resultado de forma clara y ordenada.

Casos típicos de aplicación

La Ley de Lenz se aplica con frecuencia en situaciones como: una espira que se acerca o se aleja de un imán, una espira que entra o sale de una región con campo magnético, un campo magnético que aumenta o disminuye con el tiempo, un circuito que cambia su orientación respecto al campo.

En todos estos casos, el sentido de la corriente inducida se obtiene analizando exclusivamente la variación del flujo magnético.

Relación con la conservación de la energía

La Ley de Lenz garantiza que los fenómenos de inducción electromagnética no violan el principio de conservación de la energía. Si la corriente inducida reforzara la variación del flujo que la produce, el sistema podría generar energía de forma indefinida, lo cual es físicamente imposible.

Por ejemplo, cuando una espira se mueve en un campo magnético y se induce una corriente: la fuerza magnética asociada a la corriente inducida se opone al movimiento, es necesario realizar trabajo externo para mantener dicho movimiento, la energía mecánica suministrada se transforma en energía eléctrica.

Este razonamiento proporciona una justificación física profunda de la Ley de Lenz.

Ley de Lenz y fuerza sobre conductores

La oposición establecida por la Ley de Lenz se manifiesta también en forma de fuerzas magnéticas que tienden a frenar el movimiento que provoca la variación del flujo. Este efecto aparece, por ejemplo, en sistemas de frenado magnético y en dispositivos de amortiguación electromagnética.

Aunque el estudio detallado de estos dispositivos queda fuera del nivel de Bachillerato, la idea general de oposición al cambio resulta fundamental para interpretar correctamente la inducción.

Errores frecuentes en la PAU

En la PAU, son habituales los siguientes errores: oponerse al campo magnético en lugar de a su variación, olvidar analizar si el flujo aumenta o disminuye, determinar el sentido de la corriente sin justificarlo físicamente.

Aplicar el procedimiento paso a paso permite evitar estos errores y presentar razonamientos claros y completos.

Importancia conceptual de la Ley de Lenz

La Ley de Lenz no es una ley secundaria o auxiliar, sino un principio fundamental que conecta la inducción electromagnética con los principios generales de la Física. Su formulación permite comprender por qué la inducción es un fenómeno estable y coherente con la conservación de la energía.

Desde el punto de vista histórico y conceptual, esta ley completa la formulación de Faraday-Henry y prepara el camino para el desarrollo de la teoría electromagnética moderna.

La Ley de Lenz proporciona el criterio físico que determina el sentido de la corriente inducida y da significado al signo negativo de la Ley de Faraday-Henry. Al establecer que la corriente inducida se opone a la variación del flujo magnético que la produce, garantiza la coherencia energética de los fenómenos de inducción.

En el siguiente epígrafe se introducirá la fuerza electromotriz inducida, que permitirá relacionar cuantitativamente la inducción con los circuitos eléctricos y cerrar el estudio de este capítulo.

4. Fuerza electromotriz inducida

La fuerza electromotriz inducida (f.e.m. inducida) cuantifica el efecto eléctrico producido por un fenómeno de inducción electromagnética. Mientras que los epígrafes anteriores han permitido comprender cuándo se produce la inducción (variación del flujo magnético) y con qué sentido aparece la corriente inducida (Ley de Lenz), en este apartado se precisa cuál es la intensidad del efecto eléctrico generado en el circuito.

La fuerza electromotriz inducida no es una fuerza mecánica, sino una magnitud eléctrica que mide la capacidad del fenómeno de inducción para generar corriente en un circuito cerrado. Su introducción permite conectar la inducción electromagnética con las leyes básicas de los circuitos eléctricos.

Definición de fuerza electromotriz inducida

La fuerza electromotriz inducida, representada por ε, se define como el trabajo por unidad de carga que realizan las fuerzas eléctricas no conservativas asociadas al fenómeno de inducción al recorrer una carga el circuito completo.

Desde el punto de vista operativo, la fuerza electromotriz inducida es la magnitud que aparece en la Ley de Faraday-Henry y se expresa como:

$$\boxed{\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}$$

En el caso de un circuito formado por N espiras:

$$\boxed{\varepsilon = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}$$

Estas expresiones permiten calcular directamente el valor de la f.e.m. inducida cuando se conoce cómo varía el flujo magnético con el tiempo.

Unidad de la fuerza electromotriz

En el Sistema Internacional, la unidad de la fuerza electromotriz es el voltio (V). Un voltio equivale a un julio por culombio:

$$1\ \mathrm{V} = 1\ \mathrm{J}\cdot\mathrm{C}^{-1}$$

Esta unidad es la misma que la de la diferencia de potencial eléctrico, lo que refleja la naturaleza energética de la fuerza electromotriz.

Relación entre f.e.m. y corriente inducidas

Si el circuito en el que aparece la fuerza electromotriz inducida es cerrado, la f.e.m. da lugar a una corriente inducida. El valor de dicha corriente puede calcularse aplicando la ley de Ohm al circuito completo:

$$\boxed{I = \frac{\varepsilon}{R}}$$

donde Res la resistencia total del circuito.

Esta expresión muestra que la corriente inducida depende tanto del fenómeno de inducción (a través de ε) como de las propiedades eléctricas del circuito.

Fuerza electromotriz y campo eléctrico inducido

La aparición de una fuerza electromotriz inducida implica la existencia de un campo eléctrico inducido en el circuito. A diferencia del campo eléctrico electrostático, este campo: no es conservativo, tiene líneas de campo cerradas, está asociado a la variación temporal del campo magnético.

Aunque el estudio detallado de este campo queda fuera del nivel de 2.º de Bachillerato, es importante destacar que la f.e.m. inducida es la manifestación macroscópica de este campo eléctrico inducido.

F.e.m. inducida sin corriente

Puede existir una fuerza electromotriz inducida sin que circule corriente, siempre que el circuito esté abierto. En este caso: existe inducción electromagnética, aparece una f.e.m., pero no hay corriente debido a la interrupción del circuito.

Este hecho pone de manifiesto que la f.e.m. es una magnitud asociada al fenómeno de inducción y no depende necesariamente de que exista corriente.

Dependencia de la f.e.m. inducida

De las expresiones de la Ley de Faraday-Henry se deduce que la fuerza electromotriz inducida depende de: la rapidez con la que varía el flujo magnético, el número de espiras del circuito, la intensidad del campo magnético, la geometría y orientación del circuito.

Cuanto mayor sea la variación del flujo en un intervalo de tiempo dado, mayor será la fuerza electromotriz inducida.

Interpretación energética

Desde el punto de vista energético, la fuerza electromotriz inducida representa la conversión de energía mecánica en energía eléctrica o, en general, la transferencia de energía desde el agente que provoca la variación del flujo hacia el circuito.

La Ley de Lenz garantiza que esta conversión respeta el principio de conservación de la energía, ya que la corriente inducida se opone a la causa que la produce, requiriendo un aporte de energía externa.

Aplicaciones fundamentales

La fuerza electromotriz inducida es el principio de funcionamiento de dispositivos fundamentales como: los generadores eléctricos, los alternadores, los transformadores, los sistemas de producción de energía eléctrica.

Aunque el estudio detallado de estos dispositivos se realiza en niveles posteriores, su funcionamiento básico se comprende a partir de los conceptos desarrollados en este capítulo.

Errores frecuentes en la PAU

En la PAU, son habituales los siguientes errores: confundir f.e.m. inducida con fuerza mecánica, olvidar el signo de la Ley de Faraday-Henry al analizar el sentido de la corriente, aplicar la ley de Ohm sin considerar la resistencia total del circuito.

Distinguir claramente entre f.e.m. y corriente es esencial para evitar estos fallos.

La fuerza electromotriz inducida cuantifica el efecto eléctrico producido por una variación del flujo magnético y permite conectar la inducción electromagnética con el comportamiento de los circuitos eléctricos. Su definición, su relación con la corriente inducida y su interpretación energética completan el estudio iniciado con el concepto de flujo magnético.

Con este epígrafe queda completado el Capítulo 7. Inducción electromagnética y, con él, el Bloque B. Campo electromagnético.

BLOQUE C. VIBRACIONES Y ONDAS

Capítulo 8. Movimiento armónico simple

El movimiento armónico simple (M.A.S.) es uno de los modelos fundamentales de la Física y constituye el punto de partida para el estudio de vibraciones y ondas. A pesar de su sencillez matemática, el M.A.S. permite describir con gran precisión una amplia variedad de fenómenos físicos, desde el movimiento de un sistema masa–muelle hasta las oscilaciones microscópicas asociadas a procesos ondulatorios.

En 2.º de Bachillerato, el movimiento armónico simple se presenta como un movimiento oscilatorio periódico caracterizado por una ley dinámica concreta: la existencia de una fuerza recuperadora proporcional al desplazamiento y dirigida siempre hacia la posición de equilibrio. Este capítulo se centra en la descripción cinemática y energética del M.A.S., sin recurrir a formulaciones avanzadas, pero manteniendo un tratamiento riguroso y coherente con la PAU.

1. Cinemática del movimiento armónico simple

El estudio cinemático del movimiento armónico simple tiene como objetivo describir cómo varían con el tiempo la posición, la velocidad y la aceleración de un sistema que realiza este tipo de movimiento. Para ello, se parte de una definición clara del M.A.S. y se introducen las magnitudes características que lo describen.

Definición de movimiento armónico simple

Se dice que un sistema realiza un movimiento armónico simple cuando su movimiento es unidimensional, periódico y está gobernado por una fuerza recuperadora proporcional al desplazamiento respecto a la posición de equilibrio y de sentido opuesto a este.

Desde el punto de vista dinámico, esta condición se expresa como:

$$\mathbf{F} = -k\,\mathbf{x}$$

donde: $\mathbf{F}$ es la fuerza recuperadora, $\mathbf{x}$ es el vector desplazamiento respecto a la posición de equilibrio, $k$es una constante positiva característica del sistema.

El signo negativo indica que la fuerza siempre tiende a devolver el sistema a la posición de equilibrio.

Posición de equilibrio

La posición de equilibrio es aquella en la que la fuerza resultante sobre el sistema es nula. Si el sistema se encuentra exactamente en esa posición, permanece en reposo. Si se separa ligeramente de ella, aparece una fuerza recuperadora que da lugar a un movimiento oscilatorio alrededor de dicha posición.

El movimiento se desarrolla siempre en torno a esta posición de equilibrio, que se toma como origen de coordenadas para simplificar la descripción del movimiento.

Movimiento periódico y oscilatorio

El M.A.S. es un movimiento periódico, lo que significa que el sistema repite su estado de movimiento en intervalos de tiempo iguales. Este carácter periódico permite definir magnitudes fundamentales como el período y la frecuencia.

Además, se trata de un movimiento oscilatorio, ya que el sistema se desplaza alternativamente a ambos lados de la posición de equilibrio, alcanzando posiciones extremas y regresando de forma continua.

Elongación

Se denomina elongación al desplazamiento instantáneo del sistema respecto a la posición de equilibrio. Se representa habitualmente mediante la magnitud x, que puede tomar valores positivos o negativos según el sentido del desplazamiento.

La elongación es la magnitud clave en la descripción del M.A.S., ya que tanto la fuerza como la aceleración dependen directamente de ella.

Ley de posición

La posición de un sistema que realiza un movimiento armónico simple puede describirse mediante una función sinusoidal del tiempo. Una forma habitual de la ecuación del movimiento es:

$$\boxed{x(t) = A\cos(\omega t + \varphi)}$$

donde: A es la amplitud del movimiento, ω es la pulsación o frecuencia angular, φ es la fase inicial, t es el tiempo.

Esta expresión describe completamente la evolución temporal de la posición del sistema.

Amplitud

La amplitud A es el valor máximo de la elongación. Representa la máxima distancia a la que el sistema se separa de la posición de equilibrio durante el movimiento.

La amplitud depende de las condiciones iniciales del movimiento y está relacionada con la energía total del sistema.

Pulsación, período y frecuencia

La pulsación ω es una magnitud característica del movimiento armónico simple y está relacionada con el período T y la frecuencia f mediante las expresiones:

$$\boxed{\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f}$$

Estas relaciones permiten pasar de una magnitud a otra según convenga en cada problema.

Fase y fase inicial

El argumento de la función coseno, $\omega t + \varphi$, se denomina fase del movimiento. La fase indica el estado del sistema en un instante determinado y permite comparar el movimiento de distintos osciladores.

La fase inicial φ depende de las condiciones iniciales del sistema en el instante $t = 0$.

Velocidad en el M.A.S

La velocidad del sistema se obtiene derivando la expresión de la posición respecto al tiempo. El resultado es:

$$\boxed{\frac{dx(t)}{dt} = v(t) = -A\,\omega \sin(\omega t + \varphi)}$$

De esta expresión se deduce que: la velocidad es máxima al pasar por la posición de equilibrio, la velocidad es nula en los extremos del movimiento.

Aceleración en el M.A.S

La aceleración se obtiene derivando la velocidad respecto al tiempo o, directamente, a partir de la ley dinámica del movimiento. Su expresión es:

$$\boxed{\frac{dv(t)}{dt} = a(t) = -\omega^2\, x(t)}$$

Esta relación muestra que la aceleración es proporcional a la elongación y de sentido contrario, característica esencial del movimiento armónico simple.

Relación entre cinemática y dinámica

La expresión de la aceleración permite conectar la descripción cinemática con la ley dinámica del M.A.S. Aplicando la segunda ley de Newton:

$$\mathbf{F} = m\,\mathbf{a}$$

y sustituyendo la expresión de la aceleración, se obtiene una fuerza de la forma $\mathbf{F} = -k\,\mathbf{x}$, con:

$$k = m\,\omega^2$$

Esta relación vincula las propiedades dinámicas del sistema con las magnitudes cinemáticas del movimiento.

Valores máximos de velocidad y aceleración

A partir de las expresiones anteriores, se obtienen fácilmente los valores máximos:

$$\boxed{v_{\text{máx}} = A\,\omega}$$

$$\boxed{a_{\text{máx}} = A\,\omega^2}$$

Estos valores son especialmente útiles en problemas de PAU.

Representación gráfica

En el movimiento armónico simple: la posición varía de forma sinusoidal con el tiempo, la velocidad y la aceleración también varían sinusoidalmente, pero desfasadas respecto a la posición.

El análisis de estas gráficas permite interpretar de forma cualitativa el movimiento sin necesidad de cálculos adicionales.

Importancia en la PAU

En la PAU, la cinemática del M.A.S. aparece: en la identificación del tipo de movimiento, en el uso de las ecuaciones de posición, velocidad y aceleración, en la interpretación de gráficas, en el cálculo de períodos, frecuencias y pulsaciones.

Un error frecuente consiste en confundir amplitud con elongación o en olvidar el carácter vectorial de la aceleración.

La descripción cinemática del movimiento armónico simple proporciona un marco completo para analizar la evolución temporal de sistemas oscilatorios sencillos. La relación entre posición, velocidad y aceleración, así como su dependencia con el tiempo, permite comprender el comportamiento periódico característico de este tipo de movimiento.

En el siguiente epígrafe se estudiará la energía en el oscilador armónico, lo que permitirá completar la descripción del M.A.S. desde el punto de vista energético.

2. Energía en el oscilador armónico

El estudio energético del movimiento armónico simple permite comprender el comportamiento del sistema desde un punto de vista global, complementando la descripción cinemática realizada en el epígrafe anterior. El análisis de la energía resulta especialmente útil porque pone de manifiesto los intercambios continuos entre energía cinética y energía potencial, así como el papel fundamental de las fuerzas conservativas en este tipo de movimiento.

En el nivel de 2.º de Bachillerato, el oscilador armónico se analiza como un sistema mecánico ideal, sin rozamientos, sometido a una fuerza recuperadora proporcional al desplazamiento. Bajo estas condiciones, la energía mecánica total del sistema se conserva.

Sistema oscilador armónico

El oscilador armónico más representativo es el formado por una masa unida a un muelle ideal, aunque los resultados obtenidos son válidos para cualquier sistema que realice un movimiento armónico simple. La fuerza que actúa sobre la masa viene dada por:

$$\mathbf{F} = -k\,\mathbf{x}$$

donde $\mathbf{x}$ es el vector desplazamiento respecto a la posición de equilibrio y $k$es la constante elástica del muelle.

Esta fuerza es conservativa, lo que permite definir una energía potencial asociada.

Energía potencial elástica

La energía potencial asociada a una fuerza recuperadora proporcional al desplazamiento se denomina energía potencial elástica. Su expresión es:

$$\boxed{E_p = \frac{1}{2}\,k\,x^2}$$

Esta expresión muestra que la energía potencial: es mínima en la posición de equilibrio, aumenta al separarse de dicha posición, depende del cuadrado de la elongación.

La elección del origen de energías se realiza tomando como referencia la posición de equilibrio, donde la energía potencial es nula.

Energía cinética del oscilador

La energía cinética del sistema viene dada por la expresión general:

$$\boxed{E_c = \frac{1}{2}\,m\,v^2}$$

donde $m$es la masa del sistema y $v$el módulo de su velocidad instantánea.

En el movimiento armónico simple, la velocidad varía con el tiempo, por lo que la energía cinética también cambia de forma periódica.

Energía mecánica total

La energía mecánica total del oscilador armónico es la suma de la energía cinética y la energía potencial:

$$\boxed{E_m = E_c + E_p}$$

En ausencia de fuerzas no conservativas, la energía mecánica permanece constante durante todo el movimiento. Esta conservación es una consecuencia directa del carácter conservativo de la fuerza recuperadora.

Valor de la energía mecánica

La energía mecánica total puede calcularse evaluando el sistema en una posición particularmente sencilla. En los extremos del movimiento: la velocidad es nula, la elongación es máxima ($x = \pm A$).

En estos puntos, toda la energía es potencial, por lo que:

$$\boxed{E_m = \frac{1}{2}\, k\, A^2}$$

Esta expresión muestra que la energía mecánica depende de la amplitud del movimiento y de la constante elástica del sistema.

Intercambio entre energía cinética y potencial

Durante el movimiento armónico simple, la energía se intercambia continuamente entre las formas cinética y potencial: en los extremos del movimiento, la energía es exclusivamente potencial, en la posición de equilibrio, la energía es exclusivamente cinética, en posiciones intermedias, ambas formas de energía coexisten.

Este intercambio se produce de forma periódica y no implica pérdida de energía en el modelo ideal.

Energía cinética máxima

La energía cinética alcanza su valor máximo al pasar por la posición de equilibrio, donde la velocidad es máxima. Sustituyendo el valor de la velocidad máxima:

$$v_{\text{máx}} = A\, \omega$$

en la expresión de la energía cinética, se obtiene:

$$\boxed{E_{c,\text{máx}} = \frac{1}{2}\, m\, A^2\, \omega^2}$$

Teniendo en cuenta que $k = m\, \omega^2$, este resultado coincide con el valor de la energía mecánica total.

Energía potencial máxima

La energía potencial alcanza su valor máximo en los extremos del movimiento, donde la elongación es máxima y la velocidad es nula:

$$\boxed{E_{p,\text{máx}} = \frac{1}{2}\, k\, A^2}$$

Este valor es igual a la energía mecánica total del sistema.

Relación entre energía y posición

A partir de la conservación de la energía mecánica, se puede obtener la velocidad del sistema en función de la posición:

$$\frac{1}{2}\, m\, v^2 + \frac{1}{2}\, k\, x^2 = \frac{1}{2}\, k\, A^2$$

Despejando la velocidad:

$$\boxed{v = \sqrt{\frac{k}{m}\,(A^2 - x^2)}}$$

Esta expresión es especialmente útil en problemas de PAU en los que se pide la velocidad del oscilador para una determinada elongación.

Representación energética

La representación gráfica de las energías en función de la elongación muestra: una parábola creciente para la energía potencial, una parábola invertida para la energía cinética, una recta horizontal para la energía mecánica total.

Estas gráficas permiten visualizar de forma clara el intercambio energético característico del movimiento armónico simple.

Energía y período del movimiento

Es importante destacar que la energía mecánica del oscilador armónico no influye en el período del movimiento. El período depende únicamente de las propiedades del sistema y no de la amplitud, siempre que el movimiento sea armónico simple.

Este resultado distingue al M.A.S. de otros movimientos oscilatorios no armónicos.

Importancia en la PAU

En la PAU, el estudio energético del M.A.S. aparece: en problemas de conservación de la energía, en el cálculo de velocidades y elongaciones, en la interpretación de gráficas energéticas.

Un error frecuente consiste en confundir energía potencial elástica con energía potencial gravitatoria o en olvidar que la energía mecánica se conserva solo en ausencia de rozamiento.

El análisis energético del oscilador armónico completa la descripción del movimiento armónico simple, mostrando cómo la energía mecánica se conserva y se intercambia periódicamente entre las formas cinética y potencial. Este enfoque proporciona una visión global del movimiento y refuerza la comprensión de los principios de conservación aplicados a sistemas oscilatorios.

Con este epígrafe queda completado el Capítulo 8. Movimiento armónico simple, que sirve como base para el estudio de las ondas mecánicas, tema central del siguiente capítulo.

Capítulo 9. Ondas mecánicas

El estudio de las ondas mecánicas permite describir cómo una perturbación se propaga a través de un medio material transportando energía e información, pero no materia. Este capítulo constituye una extensión natural del movimiento armónico simple, ya que muchas ondas mecánicas pueden interpretarse como la propagación espacial de oscilaciones armónicas.

En 2.º de Bachillerato, el tratamiento de las ondas mecánicas se centra en modelos sencillos y en magnitudes bien definidas, con especial atención a su interpretación física y a su aplicación en problemas típicos de la PAU. No se introducen formulaciones matemáticas avanzadas, sino relaciones fundamentales que permiten analizar y describir el fenómeno ondulatorio con rigor.

1. Magnitudes ondulatorias

Para describir de forma completa una onda mecánica es necesario introducir una serie de magnitudes características que permiten cuantificar tanto la oscilación de los puntos del medio como la propagación de la perturbación. Estas magnitudes son comunes a todos los fenómenos ondulatorios y constituyen la base para el estudio posterior de la ecuación de onda y de los fenómenos asociados a las ondas.

Concepto de onda mecánica

Una onda mecánica es una perturbación que se propaga a través de un medio material gracias a la interacción entre las partículas del medio. La propagación de la onda implica una transferencia de energía, pero las partículas del medio no se desplazan globalmente junto con la onda, sino que oscilan alrededor de sus posiciones de equilibrio.

Ejemplos típicos de ondas mecánicas son: las ondas en una cuerda, las ondas en la superficie del agua, las ondas sonoras.

La existencia de un medio material es una condición imprescindible para la propagación de una onda mecánica.

Perturbación y equilibrio

El paso de una onda por un punto del medio produce una perturbación temporal del estado de equilibrio. Una vez que la onda ha pasado, el punto recupera su estado inicial. Este comportamiento pone de manifiesto que la onda no transporta materia, sino energía asociada a la perturbación.

Cada punto del medio realiza un movimiento oscilatorio que, en muchos casos, puede aproximarse por un movimiento armónico simple.

Dirección de propagación

La dirección de propagación de una onda es la dirección en la que se desplaza la perturbación a través del medio. Esta dirección no tiene por qué coincidir con la dirección de oscilación de las partículas del medio, lo que dará lugar a distintos tipos de ondas, que se estudiarán en un epígrafe posterior.

Elongación

La elongación de un punto del medio es su desplazamiento instantáneo respecto a la posición de equilibrio cuando la onda pasa por él. Se suele representar mediante una función $y(x,t)$, que depende de la posición y del tiempo.

La elongación es la magnitud que describe el estado de vibración del medio en cada punto y en cada instante.

Amplitud

La amplitud A de una onda es el valor máximo de la elongación. Representa la máxima separación de las partículas del medio respecto a la posición de equilibrio durante el paso de la onda.

La amplitud está directamente relacionada con la energía transportada por la onda: a mayor amplitud, mayor energía.

Período

El período T de una onda es el tiempo que tarda un punto del medio en realizar una oscilación completa. Es una magnitud característica del movimiento oscilatorio de las partículas del medio.

El período se mide en segundos y es el mismo para todos los puntos del medio que participan en la onda.

Frecuencia

La frecuencia f es el número de oscilaciones que realiza un punto del medio por unidad de tiempo. Se relaciona con el período mediante la expresión:

$$\boxed{f = \frac{1}{T}}$$

La frecuencia se mide en hercios (Hz) y es una magnitud fundamental en el estudio de las ondas, especialmente en el caso del sonido.

Longitud de onda

La longitud de onda λ es la distancia entre dos puntos consecutivos del medio que se encuentran en el mismo estado de vibración. Por ejemplo, la distancia entre dos crestas consecutivas o entre dos valles consecutivos.

La longitud de onda se mide en metros y depende tanto de las propiedades del medio como de la frecuencia de la onda.

Velocidad de propagación

La velocidad de propagación de una onda es la velocidad con la que se desplaza la perturbación a través del medio. Se representa habitualmente por vy se define como la distancia recorrida por la onda en una unidad de tiempo.

Existe una relación fundamental entre la velocidad de propagación, la longitud de onda y la frecuencia:

$$\boxed{v = \lambda f}$$

Esta expresión es una de las más importantes del estudio de las ondas y aparece con frecuencia en problemas de PAU.

Fase

La fase indica el estado de vibración de un punto del medio en un instante determinado. Dos puntos que se encuentran en la misma fase oscilan de la misma manera, aunque estén situados en posiciones distintas.

La fase permite comparar el movimiento de distintos puntos del medio y resulta esencial para el estudio de fenómenos como la interferencia y las ondas estacionarias.

Desfase

El desfase es la diferencia de fase entre dos puntos de la onda o entre dos instantes de tiempo. Puede deberse a una diferencia de posición o a una diferencia temporal.

El desfase es una magnitud clave para analizar la relación entre distintos puntos del medio cuando una onda se propaga.

Resumen de magnitudes ondulatorias

Las magnitudes fundamentales que describen una onda mecánica son: amplitud, período, frecuencia, longitud de onda, velocidad de propagación, fase y desfase.

El conocimiento y la correcta interpretación de estas magnitudes permiten describir completamente el comportamiento de una onda mecánica.

Importancia en la PAU

En la PAU, las magnitudes ondulatorias aparecen: en la identificación del tipo de onda, en el uso de la relación $v = \lambda f$, en el análisis cualitativo del movimiento ondulatorio, como base para el estudio de fenómenos ondulatorios posteriores.

Un error frecuente consiste en confundir la velocidad de oscilación de las partículas con la velocidad de propagación de la onda.

Las magnitudes ondulatorias proporcionan el lenguaje básico para describir y analizar las ondas mecánicas. Su correcta comprensión es imprescindible para abordar el estudio de la ecuación de onda y de los fenómenos asociados a la propagación ondulatoria.

En el siguiente epígrafe se introducirá la ecuación de onda unidimensional, que permitirá describir matemáticamente la propagación de una onda en un medio.

2. Ecuación de onda unidimensional

La ecuación de onda unidimensional permite describir matemáticamente cómo se propaga una onda mecánica a lo largo de una única dirección del espacio. Esta formulación proporciona una expresión compacta que recoge, en una sola función, la evolución temporal de la perturbación y su desplazamiento espacial, y constituye una herramienta fundamental para el análisis de fenómenos ondulatorios en sistemas sencillos.

En 2.º de Bachillerato, el estudio de la ecuación de onda se limita a ondas armónicas que se propagan en una dimensión, como las ondas en una cuerda tensa o las ondas longitudinales en un tubo. El objetivo no es profundizar en su deducción matemática, sino comprender su forma, su significado físico y su correcta interpretación en problemas de PAU.

Onda unidimensional

Se habla de onda unidimensional cuando la perturbación se propaga a lo largo de una sola dirección del espacio, que suele elegirse como el eje x. En este caso, la elongación de los puntos del medio depende únicamente de la posición x, y del tiempo t.

La magnitud que describe la perturbación se representa mediante una función del tipo:

$$y = y(x, t)$$

donde y es la elongación del punto situado en la posición $x$en el instante t.

Onda armónica

Una onda armónica es aquella en la que cada punto del medio realiza un movimiento armónico simple cuando la onda pasa por él. Este tipo de ondas es especialmente importante porque: es fácil de describir matemáticamente, aparece con frecuencia en sistemas físicos reales, sirve como modelo básico para ondas más complejas.

En una onda armónica, la perturbación se propaga sin deformarse, manteniendo su forma a lo largo del tiempo.

Forma general de la ecuación de onda

La expresión matemática de una onda armónica que se propaga en el sentido positivo del eje $x$es:

$$\boxed{y(x,t) = A\cos(\omega t - kx + \varphi)}$$

donde: A es la amplitud de la onda, ω es la pulsación, k es el número de onda, φ es la fase inicial.

Esta expresión recibe el nombre de ecuación de onda y describe completamente el movimiento ondulatorio.

Significado físico de los términos

Cada término de la ecuación de onda tiene un significado físico preciso: La amplitud A determina la máxima elongación de los puntos del medio. El término ωt describe la evolución temporal de la oscilación. El término kx introduce la dependencia espacial de la perturbación. La fase inicial φ fija el estado inicial de la onda.

La combinación de estos términos permite describir tanto el movimiento oscilatorio local como la propagación global de la onda.

Número de onda

El número de onda k se define como:

$$\boxed{k = \frac{2\pi}{\lambda}}$$

donde λ es la longitud de onda. El número de onda indica cuántos radianes de fase cambian por unidad de longitud y mide la rapidez con la que varía la fase en el espacio.

Sentido de propagación de la onda

El signo que acompaña al término espacial kxdetermina el sentido de propagación de la onda:

Una expresión del tipo

$$y(x,t) = A\cos(\omega t - kx + \varphi)$$

describe una onda que se propaga en el sentido positivo del eje x;

Una expresión del tipo

$$y(x,t) = A\cos(\omega t + kx + \varphi)$$

describe una onda que se propaga en el sentido negativo del eje x.

Esta distinción es muy importante en problemas de PAU.

Relación con las magnitudes ondulatorias

La ecuación de onda está directamente relacionada con las magnitudes ondulatorias estudiadas en el epígrafe anterior. En particular, se cumplen las relaciones:

$$\omega = 2\pi f \text{ y } v = \frac{\omega}{k}$$

Combinando ambas expresiones se recupera la relación fundamental:

$$v = \lambda f$$

lo que confirma la coherencia interna del modelo ondulatorio.

Interpretación de la ecuación de onda

La ecuación de onda permite obtener información relevante sobre el movimiento: fijando x, se describe la oscilación temporal de un punto concreto del medio; fijando t, se obtiene la forma de la onda en un instante dado; analizando la fase, se pueden comparar estados de vibración en distintos puntos.

Esta versatilidad hace de la ecuación de onda una herramienta central en el estudio de las ondas mecánicas.

Velocidad de propagación y movimiento de las partículas

Es importante distinguir entre: la velocidad de propagación de la onda, la velocidad de oscilación de las partículas del medio.

La ecuación de onda describe la propagación de la perturbación, pero no implica que las partículas del medio se desplacen junto con la onda. Cada partícula oscila alrededor de su posición de equilibrio.

Validez del modelo

La ecuación de onda armónica es válida bajo ciertas condiciones: el medio es homogéneo y elástico, las deformaciones son pequeñas, no existen pérdidas apreciables de energía.

Estas hipótesis son adecuadas para el tratamiento de las ondas mecánicas en el nivel de 2.º de Bachillerato.

Importancia en la PAU

En la PAU, la ecuación de onda aparece: en la identificación de ondas que se propagan en uno u otro sentido, en el cálculo de magnitudes ondulatorias a partir de la ecuación, en la interpretación física de los términos de la expresión.

Un error frecuente consiste en confundir el signo del término espacial o en interpretar incorrectamente la fase.

La ecuación de onda unidimensional proporciona una descripción completa y coherente de la propagación de una onda armónica en un medio material. Su correcta interpretación permite relacionar la evolución temporal y espacial de la perturbación y constituye la base para el estudio de los distintos tipos de ondas y de los fenómenos ondulatorios.

En el siguiente epígrafe se estudiarán las ondas transversales y longitudinales, completando la clasificación básica de las ondas mecánicas.

3. Ondas transversales y longitudinales

La clasificación de las ondas mecánicas en ondas transversales y ondas longitudinales se basa en la relación existente entre la dirección de propagación de la onda y la dirección de oscilación de las partículas del medio. Esta distinción es fundamental para comprender la naturaleza de los distintos tipos de ondas mecánicas y resulta imprescindible para el estudio posterior de fenómenos ondulatorios como la reflexión, la refracción o las ondas estacionarias.

En 2.º de Bachillerato, esta clasificación se aborda desde un punto de vista descriptivo y físico, apoyándose en ejemplos sencillos y en la interpretación correcta de las magnitudes ondulatorias.

Criterio de clasificación

El criterio que permite distinguir entre ondas transversales y longitudinales es el siguiente:

> En las ondas transversales, la oscilación de las partículas del medio es perpendicular a la dirección de propagación de la onda;
>
> En las ondas longitudinales, la oscilación de las partículas del medio es paralela a la dirección de propagación de la onda.

Este criterio es independiente de la forma concreta de la onda y se aplica a cualquier tipo de onda mecánica.

Ondas transversales

Una onda transversal es aquella en la que las partículas del medio oscilan en una dirección perpendicular a la dirección en la que se propaga la perturbación. Este tipo de ondas se produce cuando el medio permite deformaciones transversales.

Un ejemplo típico de onda transversal es la onda que se propaga a lo largo de una cuerda tensa. En este caso:

La onda se propaga a lo largo de la cuerda,

Los puntos de la cuerda oscilan arriba y abajo respecto a su posición de equilibrio.

Características de las ondas transversales

En las ondas transversales pueden identificarse con facilidad:

Crestas, que corresponden a los puntos de máxima elongación positiva;

Valles, que corresponden a los puntos de máxima elongación negativa.

La distancia entre dos crestas consecutivas o entre dos valles consecutivos es la longitud de onda.

Este tipo de ondas permite una representación gráfica clara mediante curvas sinusoidales.

Medios en los que se propagan las ondas transversales

Las ondas transversales mecánicas solo pueden propagarse en medios que presenten rigidez transversal, como: cuerdas, superficies de líquidos, sólidos elásticos.

No pueden propagarse en fluidos en volumen, ya que estos no resisten esfuerzos de corte.

Ondas longitudinales

Una onda longitudinal es aquella en la que las partículas del medio oscilan en la misma dirección en la que se propaga la onda. En este caso, la perturbación se manifiesta como una sucesión de compresiones y dilataciones del medio.

El ejemplo más importante de onda longitudinal es el sonido que se propaga en el aire.

Compresiones y dilataciones

En una onda longitudinal se distinguen:

Zonas de compresión, donde las partículas del medio se encuentran más próximas entre sí;

Zonas de dilatación o rarefacción, donde las partículas están más separadas.

La distancia entre dos compresiones consecutivas o entre dos dilataciones consecutivas corresponde a la longitud de onda.

Representación de las ondas longitudinales

Aunque las ondas longitudinales no presentan crestas y valles en el sentido geométrico, suelen representarse gráficamente mediante una curva sinusoidal que describe la variación de la presión o de la densidad del medio en función de la posición.

Esta representación es una herramienta útil para visualizar el fenómeno, pero no debe confundirse con el movimiento real de las partículas.

Movimiento de las partículas del medio

En ambos tipos de ondas:

Las partículas del medio no se desplazan junto con la onda,

Cada partícula oscila alrededor de su posición de equilibrio.

En las ondas transversales, la oscilación es perpendicular a la propagación; en las longitudinales, es paralela.

Esta diferencia es clave para interpretar correctamente los fenómenos ondulatorios.

Comparación entre ondas transversales y longitudinales

Las principales diferencias entre ambos tipos de ondas pueden resumirse del siguiente modo:

Dirección de oscilación:

Perpendicular en ondas transversales,

Paralela en ondas longitudinales;

Tipo de deformación del medio:

Transversal en ondas transversales,

Compresiones y dilataciones en ondas longitudinales;

Medios de propagación:

Sólidos y superficies para ondas transversales,

Sólidos, líquidos y gases para ondas longitudinales.

Velocidad de propagación

La velocidad de propagación de una onda depende: de las propiedades elásticas del medio, de la densidad del medio, del tipo de onda (transversal o longitudinal).

En un mismo medio, las ondas longitudinales suelen propagarse más rápidamente que las transversales, aunque este aspecto se estudia de forma cualitativa en Bachillerato.

Relación con la ecuación de onda

La ecuación de onda unidimensional estudiada en el epígrafe anterior es válida tanto para ondas transversales como para ondas longitudinales, siempre que la magnitud que describe la perturbación se elija adecuadamente.

En ondas transversales suele utilizarse la elongación, mientras que en ondas longitudinales se emplean magnitudes como la presión o la densidad.

Importancia en la PAU

En la PAU, la distinción entre ondas transversales y longitudinales aparece: en preguntas conceptuales, en la identificación del tipo de onda a partir de su descripción, en la interpretación de esquemas y representaciones gráficas.

Un error frecuente consiste en confundir la representación gráfica de una onda longitudinal con el movimiento real de las partículas del medio.

La clasificación de las ondas mecánicas en transversales y longitudinales permite comprender la diversidad de comportamientos ondulatorios en función de la naturaleza del medio y del tipo de deformación que se propaga. Esta distinción, basada en la relación entre oscilación y propagación, es fundamental para el estudio de los fenómenos ondulatorios.

Con este epígrafe queda completado el Capítulo 9. Ondas mecánicas.

Capítulo 10. Fenómenos ondulatorios

El estudio de los fenómenos ondulatorios permite analizar cómo se comportan las ondas cuando interactúan con obstáculos, superficies de separación entre medios o entre sí. Estos fenómenos no requieren introducir nuevas magnitudes ondulatorias, sino aplicar las ya conocidas para interpretar situaciones físicas concretas como la reflexión, la refracción, la interferencia o la formación de ondas estacionarias.

En 2.º de Bachillerato, el tratamiento de estos fenómenos se apoya en modelos geométricos y en razonamientos cualitativos y cuantitativos sencillos, manteniendo siempre la coherencia con la ecuación de onda y con las magnitudes fundamentales estudiadas en el capítulo anterior.

1. Principio de Huygens

El principio de Huygens constituye una herramienta conceptual fundamental para describir la propagación de las ondas y para explicar de forma unificada muchos de los fenómenos ondulatorios. Aunque no es una ley en sentido estricto, este principio proporciona un método geométrico muy eficaz para comprender cómo se desplaza un frente de onda en el espacio.

Frente de onda

Se denomina frente de onda al conjunto de puntos del medio que se encuentran en el mismo estado de vibración en un instante dado. Es decir, todos los puntos de un frente de onda tienen la misma fase.

En ondas planas, los frentes de onda son planos paralelos entre sí. En ondas circulares o esféricas, los frentes de onda tienen forma de circunferencia o de esfera, respectivamente.

El estudio de los frentes de onda permite describir la propagación sin necesidad de analizar el movimiento individual de cada punto del medio.

Enunciado del principio de Huygens

El principio de Huygens puede enunciarse de la siguiente forma:

> *Cada punto de un frente de onda se comporta como un foco emisor de ondas secundarias, que se propagan en todas las direcciones con la misma velocidad que la onda original.*
> *El frente de onda en un instante posterior es la envolvente de todas esas ondas secundarias.*

Este enunciado proporciona una construcción geométrica que permite determinar la posición futura del frente de onda.

Ondas secundarias

Las ondas secundarias son ondas elementales que se emiten desde cada punto del frente de onda original. Todas ellas se propagan con la misma velocidad que la onda principal y durante el mismo intervalo de tiempo.

La superposición de estas ondas secundarias da lugar al nuevo frente de onda, que representa la evolución del fenómeno ondulatorio.

Propagación rectilínea de las ondas

Aplicando el principio de Huygens a una onda plana en un medio homogéneo, se obtiene que el frente de onda se desplaza manteniendo su forma y su orientación. Esto explica la propagación rectilínea de las ondas en ausencia de obstáculos o cambios de medio.

Cada punto del frente genera ondas secundarias cuya envolvente es un nuevo frente plano paralelo al anterior.

Velocidad de propagación

El principio de Huygens supone que las ondas secundarias se propagan con la misma velocidad que la onda original. Esta velocidad depende exclusivamente de las propiedades del medio y no de la forma del frente de onda.

Este supuesto es coherente con la descripción de las ondas mecánicas estudiada en el capítulo anterior.

Aplicación a frentes de onda curvos

En el caso de frentes de onda curvos, como los generados por una fuente puntual, el principio de Huygens permite explicar por qué la onda conserva su carácter esférico o circular a medida que se propaga.

Cada punto del frente curvo emite ondas secundarias, cuya envolvente da lugar a un nuevo frente curvo de mayor radio.

Relación con la superposición de ondas

El principio de Huygens se basa implícitamente en **el principio de superposición**. El nuevo frente de onda se obtiene como resultado de la superposición de todas las ondas secundarias emitidas por el frente anterior.

Este hecho conecta el principio de Huygens con los fenómenos de interferencia y difracción, que se estudiarán más adelante en este capítulo.

Importancia del principio de Huygens

El principio de Huygens permite: explicar la propagación de las ondas, interpretar la reflexión y la refracción, comprender la difracción de las ondas al atravesar rendijas u obstáculos.

Por este motivo, constituye una base conceptual común para el estudio de todos los fenómenos ondulatorios.

Limitaciones del principio de Huygens

Aunque el principio de Huygens es muy útil, no permite por sí solo explicar la distribución de intensidades en todos los fenómenos ondulatorios. Para un tratamiento completo de la interferencia y la difracción sería necesario introducir formulaciones más avanzadas, que quedan fuera del nivel de Bachillerato.

No obstante, el principio de Huygens proporciona una interpretación cualitativa correcta de estos fenómenos.

Importancia en la PAU

En la PAU, el principio de Huygens aparece: en preguntas conceptuales, en la explicación de la propagación rectilínea, como base para justificar reflexión, refracción y difracción.

Un error frecuente consiste en interpretar las ondas secundarias como fuentes reales independientes. Debe recordarse que son una construcción teórica.

El principio de Huygens ofrece una descripción geométrica sencilla y potente de la propagación de las ondas, basada en la emisión de ondas secundarias desde cada punto del frente de onda. Su aplicación permite comprender de forma unificada los principales fenómenos ondulatorios.

En el siguiente epígrafe se estudiarán los fenómenos de reflexión y refracción, aplicando directamente este principio al comportamiento de las ondas en superficies de separación entre medios.

2. Reflexión y refracción

Los fenómenos de reflexión y refracción describen el comportamiento de una onda cuando encuentra una superficie de separación entre dos medios o un obstáculo que impide su propagación libre. Ambos fenómenos pueden explicarse de forma unificada mediante el principio de Huygens y constituyen una parte esencial del estudio ondulatorio en 2.º de Bachillerato, con especial relevancia en la PAU.

Aunque estos fenómenos aparecen tanto en ondas mecánicas como en ondas electromagnéticas, en este capítulo se analizan desde un punto de vista general, aplicable a cualquier tipo de onda.

Reflexión de ondas

La reflexión es el fenómeno por el cual una onda, al incidir sobre una superficie que impide total o parcialmente su propagación, regresa al medio de origen.

Durante la reflexión: la onda no atraviesa la superficie, se mantiene la frecuencia de la onda, cambia la dirección de propagación.

La reflexión se produce, por ejemplo, cuando una onda en una cuerda llega a un extremo fijo o cuando una onda sonora incide sobre una pared.

Ley de la reflexión

El comportamiento geométrico de la reflexión viene descrito por la ley de la reflexión, que puede enunciarse del siguiente modo:

> El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión,
>
> El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie en el punto de incidencia se encuentran en el mismo plano.

Esta ley es válida tanto para ondas mecánicas como para ondas electromagnéticas.

Interpretación mediante el principio de Huygens

Aplicando el principio de Huygens, cada punto del frente de onda incidente actúa como foco de ondas secundarias al llegar a la superficie. La envolvente de estas ondas secundarias da lugar al nuevo frente de onda reflejado.

Esta construcción geométrica permite justificar la igualdad entre los ángulos de incidencia y reflexión sin necesidad de introducir hipótesis adicionales.

Reflexión en extremos fijos y libres

En el caso de ondas transversales en una cuerda, la reflexión presenta características particulares según el tipo de extremo:

En un extremo fijo, la onda reflejada se invierte, produciéndose un cambio de fase de π;

En un extremo libre, la onda reflejada no se invierte.

Esta diferencia tiene consecuencias importantes en la formación de ondas estacionarias, que se estudiarán más adelante.

Refracción de ondas

La refracción es el fenómeno por el cual una onda cambia su dirección de propagación al pasar de un medio a otro en el que su velocidad es distinta.

Durante la refracción: la frecuencia de la onda permanece constante, cambia la velocidad de propagación, cambia la longitud de onda, puede cambiar la dirección de propagación.

La refracción se produce, por ejemplo, cuando una onda superficial pasa de una región profunda a otra menos profunda o cuando una onda sonora atraviesa medios con distinta densidad.

Ley de la refracción

La refracción está gobernada por una relación geométrica entre los ángulos de incidencia y refracción, conocida como ley de la refracción. Para ondas en general, esta ley puede expresarse en términos de las velocidades de propagación en ambos medios:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

donde:

$\theta_1$es el ángulo de incidencia, $\theta_2$es el ángulo de refracción, v_1y $v_2$son las velocidades de propagación en los medios 1 y 2, respectivamente.

Cambio de longitud de onda

Dado que la frecuencia se conserva durante la refracción y que la velocidad cambia, la longitud de onda también se modifica al pasar de un medio a otro. A partir de la relación $v = \lambda f$, se obtiene:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Este resultado es fundamental para interpretar correctamente los fenómenos refractivos.

Interpretación física de la refracción

La refracción se debe a que la onda cambia de velocidad al entrar en un medio con propiedades físicas distintas. Como consecuencia, las ondas secundarias generadas en la superficie de separación no avanzan a la misma velocidad en ambos medios, lo que provoca un cambio en la orientación del frente de onda.

Este razonamiento, basado en el principio de Huygens, permite comprender el origen físico del fenómeno.

Casos límite

Existen situaciones particulares en las que la refracción presenta características especiales: si la onda incide perpendicularmente a la superficie, no se produce desviación; si la velocidad es mayor en el segundo medio, la onda se refracta alejándose de la normal; si la velocidad es menor, la onda se refracta acercándose a la normal.

Estos casos se analizan con frecuencia en problemas cualitativos de PAU.

Reflexión y refracción simultáneas

Cuando una onda incide sobre una superficie de separación, generalmente se producen simultáneamente reflexión y refracción. Una parte de la energía de la onda se refleja y otra parte se transmite al segundo medio.

La proporción de energía reflejada y transmitida depende de las propiedades de los medios y del ángulo de incidencia.

Importancia en la PAU

En la PAU, los fenómenos de reflexión y refracción aparecen: en cuestiones conceptuales, en el análisis geométrico de frentes de onda, en el uso de relaciones entre velocidades, longitudes de onda y ángulos.

Un error frecuente consiste en suponer que la frecuencia cambia al pasar de un medio a otro. Hay que recordar que la frecuencia se conserva es esencial.

La reflexión y la refracción describen cómo se modifica la propagación de una onda al interactuar con superficies o cambios de medio. Ambos fenómenos pueden explicarse de forma coherente mediante el principio de Huygens y constituyen la base para comprender situaciones más complejas como la interferencia y la difracción.

En el siguiente epígrafe se estudiarán los fenómenos de interferencia y difracción, que ponen de manifiesto el carácter ondulatorio de la propagación.

3. Interferencia y difracción

Los fenómenos de interferencia y difracción ponen de manifiesto el carácter ondulatorio de la propagación y solo pueden explicarse adecuadamente mediante el principio de superposición. Cuando dos o más ondas se propagan simultáneamente por una misma región del medio, la perturbación resultante depende de la relación de fase entre ellas, dando lugar a zonas de refuerzo y de anulación de la oscilación.

Principio de superposición

Cuando dos o más ondas se superponen en un mismo punto del medio, la elongación resultante es la suma algebraica de las elongaciones producidas por cada onda por separado. Este principio es válido siempre que el medio se comporte de forma lineal, condición que se cumple en los sistemas estudiados en 2.º de Bachillerato.

Ondas coherentes

Para que exista un patrón de interferencia estable, las ondas deben ser coherentes, es decir: tener la misma frecuencia, mantener una diferencia de fase constante en el tiempo, propagarse por el mismo medio.

Estas condiciones se cumplen cuando las ondas proceden de una misma fuente o de fuentes sincronizadas.

Interferencia de ondas

La interferencia es el fenómeno que se produce cuando dos ondas coherentes se superponen, dando lugar a una distribución característica de máximos y mínimos de amplitud. El tipo de interferencia que se produce en un punto del medio depende de la diferencia de caminos recorridos por las ondas hasta dicho punto.

Diferencia de caminos

Se define la diferencia de caminos Δr como la diferencia entre las distancias recorridas por las ondas desde sus respectivas fuentes hasta el punto de observación:

$$\Delta r = r_2 - r_1$$

Esta magnitud permite determinar el desfase entre las ondas en el punto considerado.

Relación entre diferencia de caminos y desfase

La diferencia de caminos está relacionada con el desfase $\Delta\varphi$ mediante la expresión:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\,\Delta r$$

Esta relación conecta el análisis geométrico con el comportamiento ondulatorio.

Interferencia constructiva

Se produce interferencia constructiva cuando las ondas llegan al punto de observación en fase, de modo que sus amplitudes se suman.

La condición de interferencia constructiva puede expresarse de dos formas equivalentes:

$$\Delta r = n\lambda \ (n = 0,1,2, \dots)$$
$$\Delta\varphi = 2\pi n$$

En este caso se obtiene un máximo de interferencia, con amplitud máxima.

Interferencia destructiva

Se produce interferencia destructiva cuando las ondas llegan al punto de observación en oposición de fase, de modo que una cresta coincide con un valle.

Las condiciones son:

$$\Delta r = \left(n+\frac{1}{2}\right)\lambda \quad (n = 0,1,2, \dots)$$
$$\Delta\varphi = (2n+1)\pi$$

En este caso se obtiene un mínimo de interferencia, pudiendo producirse anulación total si las amplitudes son iguales.

Amplitud resultante

Si dos ondas de igual amplitud A interfieren:

En interferencia constructiva, la amplitud resultante es $2A$;

En interferencia destructiva total, la amplitud resultante es nula.

Estos resultados son útiles en problemas conceptuales de PAU.

Difracción

La difracción es el fenómeno que se produce cuando una onda encuentra un obstáculo o una abertura cuyas dimensiones son comparables a su longitud de onda. En estas condiciones, la onda se desvía de la propagación rectilínea y se dispersa en distintas direcciones.

La difracción es tanto más apreciable cuanto mayor es la longitud de onda respecto al tamaño del obstáculo o la abertura.

Interpretación mediante el principio de Huygens

El principio de Huygens permite explicar la difracción considerando que cada punto del frente de onda actúa como foco emisor de ondas secundarias. La superposición de estas ondas da lugar a un frente de onda que se extiende más allá de la dirección inicial de propagación.

Relación entre interferencia y difracción

La difracción puede interpretarse como un caso particular de interferencia en el que intervienen un gran número de ondas secundarias. Ambos fenómenos se basan en el principio de superposición y evidencian el carácter ondulatorio de la propagación.

Importancia en la PAU

En la PAU, la interferencia y la difracción aparecen: en cuestiones conceptuales, en la identificación de máximos y mínimos de interferencia, en la aplicación de las condiciones sobre la diferencia de caminos.

Un error frecuente consiste en confundir la diferencia de caminos con la distancia recorrida por una sola onda.

La interferencia y la difracción son fenómenos ondulatorios esenciales que permiten comprender cómo las ondas interactúan entre sí y con los obstáculos. Su descripción, basada en el principio de superposición, proporciona herramientas claras y operativas para el análisis de situaciones físicas habituales en la PAU.

4. Ondas estacionarias

Las ondas estacionarias se producen como resultado de la superposición de dos ondas armónicas de la misma frecuencia, amplitud y velocidad, que se propagan en sentidos opuestos a lo largo de un mismo medio. A diferencia de las ondas progresivas, las ondas estacionarias no se desplazan, sino que originan un patrón espacial fijo con zonas que permanecen en reposo y zonas que oscilan con máxima amplitud.

Este fenómeno aparece de forma natural cuando una onda se refleja en un extremo del medio y la onda reflejada interfiere con la onda incidente. Las ondas estacionarias son fundamentales en el estudio de cuerdas vibrantes, columnas de aire y sistemas resonantes, y tienen una presencia clara en la PAU.

Origen de las ondas estacionarias

Consideremos dos ondas armónicas que se propagan a lo largo del eje x:

$$y_1(x,t) = A\cos(\omega t - kx)$$
$$y_2(x,t) = A\cos(\omega t + kx)$$

Ambas ondas:

Tienen la misma amplitud A, la misma pulsación ω, el mismo número de onda k, pero se propagan en sentidos opuestos.

La onda resultante se obtiene aplicando el principio de superposición.

Ecuación general de la onda estacionaria

La superposición de las dos ondas anteriores da lugar a una onda estacionaria cuya expresión es:

$$\boxed{y(x,t) = 2A\cos(kx)\cos(\omega t)}$$

Esta expresión muestra claramente la naturaleza de la onda estacionaria:

La dependencia espacial está contenida en $\cos(kx)$,

La dependencia temporal está contenida en $\cos(\omega t)$.

La onda no se desplaza: la forma espacial del patrón permanece fija.

Amplitud de la onda estacionaria

La amplitud de la onda estacionaria no es constante, sino que depende de la posición:

$$\boxed{A_{\text{ef}}(x) = 2A\ |\cos(kx)|}$$

Esto implica que: Hay puntos donde la amplitud es máxima, y puntos donde la amplitud es nula.

Esta característica distingue claramente a las ondas estacionarias de las ondas progresivas.

Nodos

Se llaman nodos a los puntos del medio en los que la elongación es siempre nula. En estos puntos, el sistema permanece en reposo.

Los nodos se obtienen imponiendo que la amplitud sea cero:

$$\cos(kx) = 0$$

Esto ocurre cuando:

$$kx = \frac{\pi}{2} + n\pi (n = 0,1,2, \dots)$$

Por tanto, las posiciones de los nodos son:

$$\boxed{x_n = \frac{(2n+1)\lambda}{4}}$$

Vientres o antinodos

Se llaman vientres o antinodos a los puntos del medio en los que la amplitud es máxima.

Esto ocurre cuando:

$$|\cos(kx)| = 1$$

es decir, cuando:

$$kx = n\pi (n = 0,1,2, \dots)$$

Las posiciones de los vientres son:

$$\boxed{x_v = \frac{n\lambda}{2}}$$

En estos puntos, la oscilación tiene la máxima amplitud posible.

Numeración de nodos y vientres

Es habitual numerar los nodos y vientres a partir de un extremo del sistema: nodo 0: primer nodo, nodo 1: segundo nodo, vientre 0: primer vientre, vientre 1: segundo vientre, etc.

Esta numeración resulta muy útil en problemas de PAU para identificar posiciones concretas dentro del sistema.

Distancia entre nodos y vientres

De las expresiones anteriores se deduce que:

La distancia entre dos nodos consecutivos es $\lambda/2$,

La distancia entre un nodo y el vientre más próximo es $\lambda/4$.

Estas relaciones permiten determinar la longitud de onda a partir del patrón estacionario.

Condiciones de contorno y forma de la ecuación

La forma concreta de la ecuación de la onda estacionaria depende de las condiciones de contorno, es decir, de lo que ocurre en los extremos del medio.

Extremo fijo (nodo obligado)

Si el extremo del medio está fijo, la elongación en ese punto debe ser nula:

$$y(0,t) = 0$$

Esto obliga a que la parte espacial sea un seno, y la ecuación toma la forma:

$$\boxed{y(x,t) = 2A\sin(kx)\cos(\omega t)}$$

Este es el caso típico de una cuerda fija en un extremo, y es el más frecuente en la PAU.

Extremo libre (antinodo obligado)

Si el extremo es libre, la amplitud es máxima en ese punto, por lo que aparece un coseno:

$$\boxed{y(x,t) = 2A\cos(kx)\cos(\omega t)}$$

Este caso se interpreta cualitativamente en Bachillerato y se utiliza para razonar la posición de nodos y vientres.

Ondas estacionarias en una cuerda fija por ambos extremos

En una cuerda de longitud Lfija por ambos extremos, solo son posibles aquellas longitudes de onda que cumplen:

$$\boxed{\lambda_n = \frac{2L}{n}}\ (n = 1,2,3,\dots)$$

Las frecuencias asociadas son:

$$\boxed{f_n = \frac{nv}{2L}}$$

Cada valor de n corresponde a un armónico distinto.

Distribución de energía

En una onda estacionaria: la energía no se transporta a lo largo del medio, queda distribuida entre nodos y vientres, el sistema intercambia energía localmente, pero no globalmente.

Este hecho explica por qué el patrón espacial es fijo.

Importancia en la PAU

En la PAU, las ondas estacionarias aparecen: en la identificación de nodos y vientres, en el cálculo de longitudes de onda y frecuencias, en la interpretación de condiciones de contorno, en preguntas conceptuales sobre transporte de energía.

Un error frecuente es confundir la longitud del sistema con la longitud de onda o no identificar correctamente los nodos.

Las ondas estacionarias son el resultado de la superposición de ondas opuestas y dan lugar a patrones espaciales fijos caracterizados por nodos y vientres. La dependencia espacial

de la amplitud, junto con las condiciones de contorno, determina las formas posibles del movimiento y las frecuencias permitidas.

Con este epígrafe queda completado el Capítulo 10. Fenómenos ondulatorios de forma completa, rigurosa y plenamente alineada con la PAU.

Capítulo 11. Ondas electromagnéticas

1. Naturaleza y propagación de las ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas son perturbaciones físicas que se propagan en el espacio como consecuencia de la variación conjunta de un campo eléctrico y un campo magnético. A diferencia de las ondas mecánicas, las ondas electromagnéticas no necesitan un medio material para propagarse, lo que permite explicar fenómenos como la llegada de la radiación solar a la Tierra o la transmisión de señales a través del vacío.

El estudio de la naturaleza de las ondas electromagnéticas constituye un punto clave en la Física moderna, ya que unifica fenómenos eléctricos, magnéticos y ópticos en un único marco teórico. Esta unificación fue lograda en el siglo XIX por James Clerk Maxwell, cuyas ecuaciones predijeron la existencia de ondas electromagnéticas y permitieron identificar la luz como una de ellas.

Campos eléctrico y magnético variables

Una onda electromagnética está formada por un campo eléctrico variable **E** y un campo magnético variable **B**, que se generan mutuamente y se propagan conjuntamente en el espacio. Estos campos no existen de forma aislada en la onda, sino que están acoplados.

La característica fundamental es que: un campo eléctrico variable genera un campo magnético, un campo magnético variable genera un campo eléctrico.

Este acoplamiento dinámico permite la propagación de la perturbación sin necesidad de cargas eléctricas ni corrientes.

Carácter transversal de las ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas son ondas transversales. Esto significa que:

El campo eléctrico **E** oscila perpendicularmente a la dirección de propagación,

El campo magnético **B** oscila perpendicularmente a la dirección de propagación,

Los campos **E** y **B** son perpendiculares entre sí.

Si la onda se propaga en una dirección determinada, por ejemplo, a lo largo del eje x, los campos **E** y **B** oscilan en direcciones perpendiculares al eje xy entre sí. Esta disposición geométrica es una característica esencial de la radiación electromagnética.

Propagación en el vacío

Una de las propiedades más importantes de las ondas electromagnéticas es que pueden propagarse en el vacío. Esto las distingue de las ondas mecánicas, que requieren siempre un medio material.

La propagación en el vacío demuestra que la radiación electromagnética no necesita soporte material y que el propio campo electromagnético es el medio de propagación de la onda.

Velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas

En el vacío, todas las ondas electromagnéticas se propagan con la misma velocidad, denominada velocidad de la luz en el vacío, cuyo valor es:

$$\boxed{c = 3{,}0 \times 10^8 \text{ m/s}}$$

Maxwell demostró que esta velocidad puede expresarse en función de dos constantes fundamentales del vacío:

$$\boxed{c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \, \varepsilon_0}}}$$

donde:

$\varepsilon_0$es la permitividad eléctrica del vacío, y $\mu_0$es la permeabilidad magnética del vacío.

Este resultado tuvo una enorme importancia histórica, ya que permitió identificar la luz como una onda electromagnética.

Relación entre los campos eléctrico y magnético

En una onda electromagnética que se propaga en el vacío, los módulos de los campos eléctrico y magnético están relacionados mediante la expresión:

$$\boxed{E = c\,B}$$

Esta relación indica que: ambos campos alcanzan sus valores máximos simultáneamente, los campos están en fase, el campo eléctrico es proporcional al campo magnético.

Esta expresión aparece con frecuencia en cuestiones teóricas y problemas de la EBAU.

Propagación en medios materiales

Cuando una onda electromagnética se propaga en un medio material, su velocidad es menor que en el vacío y depende de las propiedades del medio. La relación entre la velocidad en el medio y la velocidad en el vacío viene dada por:

$$v = \frac{c}{n}$$

donde n es el índice de refracción del medio.

Al pasar de un medio a otro: la frecuencia de la onda permanece constante, cambia la velocidad de propagación, cambia la longitud de onda.

Este hecho será fundamental en el estudio de la refracción de la luz en óptica geométrica.

Relación entre frecuencia, longitud de onda y velocidad

Como cualquier onda, las ondas electromagnéticas cumplen la relación fundamental:

$$\boxed{v = \lambda f}$$

En el vacío, esta expresión adopta la forma:

$$\boxed{c = \lambda f}$$

Esta relación permite clasificar las distintas radiaciones electromagnéticas según su frecuencia o su longitud de onda.

Naturaleza física de la radiación electromagnética

Desde el punto de vista clásico, la radiación electromagnética es una perturbación del campo electromagnético que se propaga transportando energía. Esta descripción explica correctamente fenómenos como: la propagación rectilínea de la luz, la reflexión y la refracción, la interferencia y la difracción.

Algunos fenómenos microscópicos requerirán una descripción cuántica, que se abordará en el bloque de Física Cuántica.

Importancia en la EBAU

En la EBAU, la naturaleza de las ondas electromagnéticas aparece: en preguntas teóricas de desarrollo, en cuestiones sobre campos **E** y **B**, en el uso de las relaciones $E = cB$ y $c = \lambda f$, en la comparación entre ondas mecánicas y electromagnéticas.

Un error frecuente consiste en suponer que las ondas electromagnéticas necesitan un medio material para propagarse.

Las ondas electromagnéticas son ondas transversales formadas por campos eléctrico y magnético variables y acoplados, capaces de propagarse en el vacío con velocidad constante. Su estudio permite unificar electricidad, magnetismo y óptica, y constituye la base para comprender tanto los fenómenos ópticos como el desarrollo posterior de la Física Cuántica.

2.Energía e intensidad de la radiación electromagnética

Las ondas electromagnéticas, además de propagarse en el espacio, transportan energía. Esta energía puede ser absorbida por la materia, produciendo efectos físicos como el calentamiento, la ionización o la emisión de electrones, según la frecuencia de la radiación. El estudio de la energía asociada a la radiación electromagnética es fundamental para comprender tanto fenómenos clásicos como desarrollos posteriores de la Física Cuántica.

Transporte de energía en una onda electromagnética

Una onda electromagnética transporta energía debido a la presencia simultánea de un campo eléctrico **E** y un campo magnético **B**, ambos variables. La energía no está asociada a partículas materiales, sino al propio campo electromagnético.

Al propagarse la onda: la energía se transmite en la dirección de propagación, no se produce transporte de materia, la energía puede transferirse a los sistemas materiales con los que interactúa.

Intensidad de una onda electromagnética

Se define la intensidad I de una onda electromagnética como la energía transportada por unidad de tiempo y por unidad de superficie, perpendicular a la dirección de propagación:

$$\boxed{I = \frac{E}{S\,t}}$$

En el Sistema Internacional, la intensidad se mide en vatios por metro cuadrado ($\mathrm{W}\cdot m^{-2}$).

La intensidad permite cuantificar el efecto energético de la radiación electromagnética sobre un sistema.

Relación entre intensidad y amplitud del campo eléctrico

En el vacío, la intensidad de una onda electromagnética es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico:

$$\boxed{I \propto E^2}$$

Esto implica que: si la amplitud del campo eléctrico se duplica, la intensidad se cuadruplica, pequeñas variaciones del campo producen cambios importantes en la energía transportada.

Esta relación aparece con frecuencia en cuestiones conceptuales de la EBAU.

Reparto de la energía entre los campos

La energía transportada por una onda electromagnética se reparte entre el campo eléctrico y el campo magnético. En el vacío: la energía asociada al campo eléctrico es igual a la asociada al campo magnético, ambos campos contribuyen por igual al transporte energético.

Este reparto equilibrado es una consecuencia directa de la relación entre ambos campos en la propagación de la onda.

Dependencia con la distancia a la fuente

Cuando una fuente emite radiación electromagnética de forma aproximadamente esférica, la energía se distribuye sobre superficies cada vez mayores al aumentar la distancia a la fuente. Como consecuencia, la intensidad disminuye con la distancia.

Este comportamiento explica, por ejemplo, por qué la intensidad de la radiación solar disminuye al alejarnos del Sol.

Energía e interacción con la materia

La energía transportada por una onda electromagnética puede: ser absorbida por la materia, transformarse en energía térmica, producir excitaciones o ionizaciones, dependiendo de la frecuencia de la radiación.

El análisis detallado de estos efectos requiere una descripción cuántica, que se abordará en el bloque de Física Cuántica.

Importancia en la EBAU

En la EBAU, la energía de la radiación electromagnética aparece: en preguntas conceptuales sobre intensidad, en la interpretación de efectos energéticos de la radiación, en relaciones cualitativas entre intensidad y campo eléctrico, en la conexión entre energía y frecuencia.

Un error frecuente consiste en confundir intensidad con frecuencia o suponer que radiaciones de mayor frecuencia siempre tienen mayor intensidad.

Las ondas electromagnéticas transportan energía asociada a sus campos eléctrico y magnético. La intensidad permite cuantificar este transporte energético y relacionarlo con la amplitud del campo eléctrico y con los efectos producidos sobre la materia. Este análisis constituye el puente natural entre la descripción ondulatoria clásica y la interpretación cuántica de la radiación.

3. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el conjunto de todas las radiaciones electromagnéticas posibles, ordenadas según su frecuencia o, de forma equivalente, según su

longitud de onda. Aunque todas las ondas electromagnéticas comparten la misma naturaleza física y se propagan en el vacío con la misma velocidad, sus efectos sobre la materia son muy distintos, lo que hace necesario clasificarlas.

El estudio del espectro electromagnético es fundamental en la EBAU, ya que permite relacionar conceptos ondulatorios clásicos con ideas energéticas que preparan el camino hacia la Física Cuántica.

Criterio de clasificación del espectro

Las distintas radiaciones electromagnéticas se clasifican atendiendo a: su frecuencia f, su longitud de onda λ, y, de forma indirecta, a la energía que transportan.

Todas ellas cumplen la relación fundamental:

$$\boxed{c = \lambda f}$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío.

A mayor frecuencia: menor longitud de onda, y mayor energía asociada a la radiación.

Unidad del espectro electromagnético

Desde el punto de vista físico, no existen fronteras estrictas entre unas regiones del espectro y otras. La división en bandas es una clasificación convencional, basada en: los métodos de generación, los efectos sobre la materia, y los instrumentos de detección.

Todas las radiaciones del espectro: son ondas electromagnéticas, se propagan en el vacío con velocidad c, presentan carácter transversal.

Ondas de radio

Las ondas de radio son las radiaciones electromagnéticas de menor frecuencia y mayor longitud de onda del espectro.

Características principales: longitudes de onda desde kilómetros hasta metros, bajas frecuencias, baja energía.

Estas ondas se generan mediante corrientes eléctricas alternas y son capaces de propagarse a grandes distancias, lo que las hace especialmente útiles para la transmisión de información.

Desde el punto de vista físico, su baja frecuencia implica que sus efectos sobre la materia son suaves y no producen alteraciones estructurales en los átomos o moléculas.

Microondas

Las microondas ocupan la región del espectro situada entre las ondas de radio y la radiación infrarroja.

Características: longitudes de onda del orden de centímetros y milímetros, mayor frecuencia que las ondas de radio, mayor energía.

Las microondas interactúan de forma eficaz con ciertas moléculas, como el agua, lo que explica su capacidad para producir calentamiento. Desde el punto de vista ondulatorio, presentan propiedades muy similares al resto de radiaciones electromagnéticas.

Radiación infrarroja

La radiación infrarroja se sitúa inmediatamente por debajo de la luz visible en frecuencia.

Características: longitudes de onda mayores que las de la luz visible, asociada a procesos térmicos, emitida por todos los cuerpos cuya temperatura sea superior al cero absoluto.

Desde el punto de vista físico, la radiación infrarroja está relacionada con la agitación térmica de las partículas. Cuanto mayor es la temperatura de un cuerpo, mayor es la intensidad de la radiación infrarroja emitida.

Luz visible

La luz visible constituye una pequeña franja del espectro electromagnético, pero es de enorme importancia, ya que es la única radiación perceptible por el ojo humano.

Características: longitudes de onda aproximadamente entre 400 nm y 700 nm, corresponde a distintas sensaciones de color, se sitúa entre el infrarrojo y el ultravioleta.

Dentro de la luz visible: el rojo corresponde a longitudes de onda mayores, el violeta corresponde a longitudes de onda menores.

Esta región del espectro ha sido tradicionalmente estudiada mediante la óptica geométrica y la óptica física.

Radiación ultravioleta

La radiación ultravioleta tiene mayor frecuencia y energía que la luz visible.

Características: longitudes de onda menores que las del violeta, mayor capacidad de interacción con la materia, responsable de efectos fotoquímicos.

La radiación ultravioleta puede producir alteraciones en las moléculas y en los tejidos biológicos, lo que explica tanto sus aplicaciones como la necesidad de protección frente a exposiciones prolongadas.

Desde el punto de vista histórico, el estudio del ultravioleta fue clave en el desarrollo de la Física Cuántica.

Rayos X

Los rayos X son radiaciones electromagnéticas de alta frecuencia y elevada energía.

Características: longitudes de onda muy pequeñas, gran poder de penetración, capacidad para atravesar materiales opacos a la luz visible.

Los rayos X se producen cuando electrones de alta energía se frenan bruscamente o cuando se producen transiciones electrónicas en átomos pesados.

Su estudio conecta directamente con fenómenos cuánticos y con la estructura atómica.

Rayos gamma

Los rayos gamma constituyen la región del espectro electromagnético de mayor frecuencia y energía.

Características: longitudes de onda extremadamente pequeñas, energía muy elevada, gran capacidad de ionización.

A diferencia de otras radiaciones, los rayos gamma suelen tener origen nuclear, lo que los vincula estrechamente con la Física Nuclear.

Relación entre frecuencia, longitud de onda y energía

A lo largo del espectro electromagnético: la frecuencia aumenta progresivamente, la longitud de onda disminuye, la energía de la radiación aumenta.

Este hecho permite comprender por qué: las radiaciones de alta frecuencia tienen efectos más intensos sobre la materia, las radiaciones de baja frecuencia producen efectos más suaves.

Esta relación será formalizada posteriormente mediante la expresión cuántica de la energía.

Espectro electromagnético y Física Cuántica

El estudio del espectro electromagnético puso de manifiesto que la descripción puramente ondulatoria no era suficiente para explicar ciertos fenómenos, como: el efecto fotoeléctrico, la emisión y absorción de radiación por los átomos.

Estos problemas condujeron al nacimiento de la Física Cuántica, que se abordará en el bloque siguiente.

Importancia en la EBAU

En la EBAU, el espectro electromagnético aparece: en preguntas de desarrollo teórico, en la ordenación de radiaciones por frecuencia o longitud de onda, en la relación entre tipo de radiación y energía, en conexiones con Física Cuántica y Nuclear.

Un error frecuente consiste en pensar que las distintas radiaciones son fenómenos distintos; todas son manifestaciones de la misma realidad física.

El espectro electromagnético muestra la enorme diversidad de radiaciones electromagnéticas existentes, todas ellas unificadas por una misma naturaleza física. Su clasificación según la frecuencia y la longitud de onda permite comprender los distintos efectos de la radiación sobre la materia y establece un puente natural entre la Física clásica y la Física moderna.

Radio → Microondas → Infrarrojo → Visible → Ultravioleta → Rayos X → Rayos γ

λ grande ---------- λ pequeña

f pequeña ---------- f grande

Capítulo 12. Óptica geométrica

1. Propagación rectilínea de la luz

La óptica geométrica estudia la propagación de la luz considerando que esta se comporta como un conjunto de rayos luminosos. Este modelo es válido cuando las dimensiones de los obstáculos y aberturas con los que interactúa la luz son mucho mayores que su longitud de onda, lo que permite despreciar los efectos ondulatorios estudiados en capítulos anteriores.

En este enfoque, la luz no se describe como una onda, sino como líneas ideales que indican la dirección de propagación de la energía luminosa. La óptica geométrica constituye la base para el estudio de espejos, lentes y sistemas ópticos, y tiene una presencia muy importante en la EBAU.

Modelo de rayo luminoso

Un rayo luminoso es una línea imaginaria que representa la dirección en la que se propaga la luz. En óptica geométrica: la energía luminosa se propaga a lo largo de los rayos, los rayos son perpendiculares a los frentes de onda, el comportamiento de la luz se analiza siguiendo la trayectoria de estos rayos.

Este modelo no describe la naturaleza física de la luz, sino su comportamiento macroscópico.

Propagación rectilínea de la luz

En un medio homogéneo y transparente, la luz se propaga en línea recta. Este principio se conoce como principio de propagación rectilínea de la luz y explica fenómenos cotidianos como: la formación de sombras, los eclipses, la imposibilidad de ver objetos ocultos tras un obstáculo opaco.

Este principio es una consecuencia directa del carácter ondulatorio de la luz cuando los efectos de difracción son despreciables.

Independencia de los rayos luminosos

En óptica geométrica se considera que los rayos luminosos son independientes entre sí. Esto significa que: dos rayos que se cruzan no se afectan mutuamente, cada rayo puede estudiarse de forma independiente.

Este supuesto simplifica enormemente el análisis de sistemas ópticos y es válido en las condiciones habituales de estudio en Bachillerato.

Medios transparentes, translúcidos y opacos

Según su comportamiento frente a la luz, los materiales pueden clasificarse en: transparentes, si permiten el paso de la luz sin desviarla apreciablemente; translúcidos, si permiten el paso de la luz pero la dispersan en distintas direcciones; opacos, si no permiten el paso de la luz.

La óptica geométrica se aplica fundamentalmente al estudio de la luz en medios transparentes.

Haz de rayos luminosos

Un haz luminoso es un conjunto de rayos que se propagan conjuntamente. Pueden distinguirse varios tipos de haces: haz paralelo, cuando los rayos son paralelos entre sí; haz divergente, cuando los rayos se separan al propagarse; haz convergente, cuando los rayos tienden a reunirse en un punto.

La clasificación de los haces es esencial para el estudio de espejos y lentes.

Eje óptico

En los sistemas ópticos se define un eje óptico, que es una línea de referencia alrededor de la cual se describe la propagación de la luz. Generalmente: coincide con un eje de simetría del sistema, sirve para medir distancias y definir posiciones de objetos e imágenes.

El uso del eje óptico permite establecer un sistema de signos coherente, fundamental en la resolución de problemas.

Aproximación paraxial

La óptica geométrica se apoya en la aproximación paraxial, que consiste en considerar únicamente rayos que forman ángulos pequeños con el eje óptico. Bajo esta aproximación: los cálculos se simplifican, las ecuaciones utilizadas son válidas, se obtienen resultados fiables en sistemas ópticos habituales.

Esta aproximación es implícita en todas las ecuaciones que se utilizarán posteriormente.

Velocidad de la luz y cambio de medio

Cuando la luz pasa de un medio a otro: su velocidad cambia, su frecuencia permanece constante, su longitud de onda se modifica.

Este hecho es la base de los fenómenos de reflexión y refracción, que se estudiarán en el siguiente epígrafe.

Límites del modelo de óptica geométrica

El modelo de óptica geométrica deja de ser válido cuando: las dimensiones del sistema son comparables a la longitud de onda, los efectos de difracción e interferencia son apreciables.

En esos casos es necesario recurrir a la óptica física, ya estudiada anteriormente.

Importancia en la EBAU

En la EBAU, la propagación rectilínea de la luz aparece: en preguntas teóricas, como base para justificar la formación de sombras, como punto de partida para el estudio de espejos y lentes.

Un error frecuente consiste en olvidar que este modelo es una aproximación y aplicarlo fuera de su dominio de validez.

La óptica geométrica describe la propagación de la luz mediante rayos luminosos que se desplazan en línea recta en medios homogéneos. Este modelo, basado en la aproximación paraxial, permite analizar de forma sencilla y eficaz los sistemas ópticos que se estudiarán en los siguientes epígrafes.

2. Reflexión y refracción de la luz. Ley de Snell

Cuando un rayo luminoso incide sobre la superficie de separación entre dos medios distintos, su propagación puede verse modificada. En función de las propiedades de los medios y de la naturaleza de la superficie, la luz puede reflejarse, refractarse o experimentar ambos fenómenos simultáneamente. El estudio de la reflexión y la refracción constituye uno de los pilares de la óptica geométrica y tiene una presencia central en la EBAU.

Plano de incidencia y normal

Para analizar la reflexión y la refracción es necesario definir algunos elementos geométricos fundamentales:

> El plano de incidencia es el plano definido por el rayo incidente y la normal a la superficie en el punto de incidencia.

La normal es la recta perpendicular a la superficie de separación en el punto donde incide el rayo.

Todos los rayos implicados en el fenómeno (incidente, reflejado y refractado) se encuentran en el mismo plano de incidencia.

Reflexión de la luz

La reflexión es el fenómeno por el cual la luz cambia de dirección al incidir sobre una superficie, permaneciendo en el mismo medio. Este fenómeno se produce tanto en superficies pulidas como en superficies rugosas, aunque con consecuencias diferentes.

En la óptica geométrica se estudia principalmente la reflexión especular, que tiene lugar en superficies lisas y pulidas.

Leyes de la reflexión

La reflexión de la luz obedece a dos leyes fundamentales:

1. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal pertenecen al mismo plano.
2. El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión:

$$\boxed{\theta_i = \theta_r}$$

donde: θ_i es el ángulo de incidencia, θ_r es el ángulo de reflexión.

Ambos ángulos se miden siempre respecto a la normal a la superficie.

Reflexión en superficies rugosas

Cuando la superficie no es perfectamente lisa, cada punto de la superficie tiene una normal distinta, lo que provoca que los rayos reflejados se dispersen en múltiples direcciones. Este fenómeno explica la reflexión difusa, responsable de que los objetos sean visibles desde distintas posiciones.

Refracción de la luz

La refracción es el fenómeno por el cual la luz cambia de dirección al pasar de un medio a otro en el que su velocidad de propagación es distinta. Este cambio de dirección se debe a la variación de la velocidad de la luz al atravesar la superficie de separación entre los dos medios.

La refracción solo se produce si el rayo incide oblicuamente sobre la superficie. Si el rayo incide perpendicularmente, no cambia de dirección, aunque sí de velocidad.

Índice de refracción

El índice de refracción n de un medio se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y su velocidad en dicho medio:

$$\boxed{n = \frac{c}{v}}$$

El índice de refracción es siempre mayor o igual que la unidad y depende de la naturaleza del medio.

Ley de Snell de la refracción

La refracción de la luz está gobernada por la ley de Snell, que establece la relación entre los ángulos de incidencia y refracción y los índices de refracción de los medios:

$$\boxed{n_1 \sin\ \theta_1 = n_2 \sin\ \theta_2}$$

donde: n_1 y n_2 son los índices de refracción de los medios, θ_1 es el ángulo de incidencia, θ_2 es el ángulo de refracción.

Esta ley es una de las expresiones más importantes de la óptica geométrica y aparece con mucha frecuencia en problemas de la EBAU.

Interpretación física de la ley de Snell

La ley de Snell puede interpretarse teniendo en cuenta que: la frecuencia de la luz no cambia al pasar de un medio a otro, la velocidad sí cambia, como consecuencia, cambia la longitud de onda.

El cambio de velocidad es el responsable de la desviación del rayo luminoso.

Casos particulares de la refracción

Si $n_2 > n_1$, el rayo refractado se acerca a la normal.

Si $n_2 < n_1$, el rayo refractado se aleja de la normal.

Estos criterios permiten predecir cualitativamente la dirección del rayo refractado sin necesidad de realizar cálculos.

Ángulo límite y reflexión total

Cuando la luz pasa de un medio más refringente a otro menos refringente, existe un ángulo de incidencia para el cual el ángulo de refracción es de 90°. Este ángulo se denomina ángulo límite θ_L y cumple:

$$\boxed{\sin\ \theta_L = \frac{n_2}{n_1} (n_1 > n_2)}$$

Si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite, no se produce refracción y toda la luz se refleja. Este fenómeno se denomina reflexión total.

Importancia en la EBAU

En la EBAU, la reflexión y la refracción aparecen: en problemas numéricos con la ley de Snell, en cuestiones teóricas sobre ángulo límite y reflexión total, en el razonamiento cualitativo sobre la trayectoria de los rayos.

Un error frecuente consiste en medir los ángulos respecto a la superficie en lugar de respecto a la normal.

La reflexión y la refracción describen cómo se modifica la propagación de la luz al interactuar con las superficies de separación entre medios. Las leyes que gobiernan estos fenómenos, en particular la ley de Snell, permiten analizar con rigor el comportamiento de los rayos luminosos y constituyen la base para el estudio de espejos, lentes y sistemas ópticos.

3. Espejos planos y espejos esféricos

Los espejos son superficies reflectantes que permiten modificar la trayectoria de los rayos luminosos mediante el fenómeno de la reflexión. El estudio de los espejos constituye uno de los apartados fundamentales de la óptica geométrica, ya que introduce de forma sistemática el concepto de formación de imágenes, junto con el uso de ecuaciones que aparecen de forma recurrente en la EBAU.

Espejo plano

Un espejo plano es una superficie reflectante plana en la que se cumple estrictamente la ley de la reflexión. Aunque su estudio es sencillo, resulta esencial para introducir las propiedades básicas de las imágenes ópticas.

Formación de imágenes en un espejo plano

Cuando un objeto se coloca frente a un espejo plano, los rayos luminosos reflejados parecen proceder de un punto situado detrás del espejo. Ese punto define la imagen del objeto.

Las características de la imagen formada por un espejo plano son: es virtual (no se puede proyectar sobre una pantalla), es derecha, tiene el mismo tamaño que el objeto, está situada a la misma distancia del espejo que el objeto, pero detrás de él.

Si el objeto se encuentra a una distancia s del espejo, la imagen se forma a una distancia s'tal que:

$$\boxed{s' = s}$$

Aumento lateral en el espejo plano

El aumento lateral se define como el cociente entre el tamaño de la imagen y el tamaño del objeto:

$$\boxed{M = \frac{y'}{y}}$$

En el espejo plano:

$$\boxed{M = +1}$$

El signo positivo indica que la imagen es derecha.

Espejos esféricos

Los espejos esféricos son superficies reflectantes que forman parte de una esfera. Se clasifican en función de la posición de la superficie reflectante: espejos cóncavos y espejos convexos.

El estudio de los espejos esféricos se realiza bajo la aproximación paraxial, considerando solo rayos cercanos al eje óptico.

Elementos geométricos de un espejo esférico

En un espejo esférico se definen los siguientes elementos:

Centro de curvatura (C): centro de la esfera a la que pertenece el espejo.

Radio de curvatura (R): distancia entre el vértice del espejo y el centro de curvatura.

Vértice (V): punto central del espejo.

Eje óptico: recta que pasa por el vértice y el centro de curvatura.

Foco (F): punto del eje óptico donde convergen (o del que parecen divergir) los rayos paralelos al eje tras la reflexión.

La distancia focal f se relaciona con el radio de curvatura mediante:

$$\boxed{f = \frac{R}{2}}$$

Espejo cóncavo

Un espejo cóncavo tiene la superficie reflectante en la parte interior de la esfera. Puede formar imágenes reales o virtuales, según la posición del objeto.

Rayos principales en el espejo cóncavo

Para construir la imagen se utilizan tres rayos principales:

1. Rayo paralelo al eje óptico → se refleja pasando por el foco.
2. Rayo que pasa por el foco → se refleja paralelo al eje óptico.

3. Rayo que pasa por el centro de curvatura → se refleja sobre sí mismo.

Ecuación del espejo esférico.

La relación entre la distancia del objeto s, la distancia de la imagen s'y la distancia focal $f$viene dada por:

$$\boxed{\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{f}}$$

Esta ecuación es fundamental en la EBAU.

Aumento lateral en espejos esféricos

El aumento lateral viene dado por:

$$\boxed{M=\frac{y'}{y}=-\frac{s'}{s}}$$

El signo del aumento permite determinar la orientación de la imagen:

$M > 0$: imagen derecha,

$M < 0$: imagen invertida.

Naturaleza de la imagen en el espejo cóncavo

Si el objeto está más allá del foco: la imagen es **real e invertida**.

Si el objeto está entre el foco y el espejo: la imagen es **virtual y derecha**.

Espejo convexo

Un espejo convexo tiene la superficie reflectante en la parte exterior de la esfera. En este caso:

La imagen es siempre virtual, es derecha, es de menor tamaño que el objeto.

La ecuación del espejo sigue siendo válida, teniendo en cuenta el criterio de signos.

Importancia en la EBAU

En la EBAU, los espejos esféricos aparecen: en problemas numéricos con la ecuación del espejo,en cuestiones sobre aumento y naturaleza de la imagen, en razonamientos cualitativos con rayos principales.

Errores frecuentes: olvidar el signo de f, confundir imagen real con virtual, interpretar mal el aumento.

Los espejos planos y esféricos permiten analizar la formación de imágenes mediante leyes geométricas simples. El uso de rayos principales y de la ecuación del espejo proporciona un método riguroso y eficaz para resolver problemas ópticos en el nivel exigido por la EBAU.

4. Lentes delgadas

Las lentes son sistemas ópticos transparentes que modifican la trayectoria de los rayos luminosos mediante el fenómeno de la refracción. A diferencia de los espejos, que actúan por reflexión, las lentes forman imágenes gracias a los cambios de dirección que experimenta la luz al atravesar sus superficies.

El estudio de las lentes delgadas es fundamental en la óptica geométrica y tiene una presencia constante en la EBAU, tanto en cuestiones teóricas como en problemas numéricos.

Lente delgada: definición y aproximación

Una lente delgada es una lente cuyo espesor es muy pequeño en comparación con las distancias a las que se sitúan el objeto y la imagen. Bajo esta aproximación: se considera que la refracción se produce en un único plano, se simplifica el análisis geométrico, se obtienen ecuaciones sencillas y muy operativas.

Todas las expresiones que se utilizarán a continuación se basan en esta aproximación.

Tipos de lentes

Según su forma y comportamiento óptico, las lentes se clasifican en dos tipos fundamentales:

Lentes convergentes: hacen converger los rayos paralelos al eje óptico,

Lentes divergentes: hacen divergir los rayos paralelos al eje óptico.

Esta clasificación es independiente del material de la lente y depende únicamente de su geometría.

Elementos geométricos de una lente

En una lente delgada se definen los siguientes elementos:

Centro óptico (O): punto de la lente por el que un rayo atraviesa sin desviarse.

Eje óptico: recta que pasa por el centro óptico y define la simetría del sistema.

Focos (F y F′): puntos del eje óptico asociados a la convergencia o divergencia de los rayos.

Distancia focal (f): distancia entre el centro óptico y el foco.

Por convenio:

$f > 0$ en lentes convergentes,

$f < 0$ en lentes divergentes.

Rayos principales en una lente convergente

Para construir imágenes en una lente convergente se utilizan tres rayos principales:

1. Rayo paralelo al eje óptico → emerge pasando por el foco imagen.
2. Rayo que pasa por el foco objeto → emerge paralelo al eje óptico.
3. Rayo que pasa por el centro óptico → no se desvía.

Estos rayos permiten determinar gráficamente la posición y naturaleza de la imagen.

Rayos principales en una lente divergente

En una lente divergente:

1. Rayo paralelo al eje óptico → emerge como si procediera del foco.
2. Rayo dirigido hacia el foco → emerge paralelo al eje óptico.
3. Rayo que pasa por el centro óptico → no se desvía.

En este caso, los rayos emergentes divergen y la imagen se obtiene por prolongación.

Ecuación de las lentes delgadas

La relación entre la distancia del objeto s, la distancia de la imagen s'y la distancia focal f viene dada por:

$$\boxed{\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{f}}$$

Esta ecuación es idéntica formalmente a la de los espejos esféricos y es una de las más importantes de la óptica geométrica en la EBAU.

Aumento lateral en lentes

El aumento lateral se define como:

$$\boxed{M=\frac{y'}{y}=-\frac{s'}{s}}$$

El signo del aumento indica:

Imagen derecha si $M > 0$,

Imagen invertida si $M < 0$.

El valor absoluto del aumento indica si la imagen es mayor o menor que el objeto.

Naturaleza de la imagen en una lente convergente

Según la posición del objeto: Si el objeto está más allá del foco, la imagen es real e invertida, Si el objeto está entre el foco y la lente, la imagen es virtual y derecha.

Este comportamiento es completamente análogo al del espejo cóncavo.

Naturaleza de la imagen en una lente divergente

En una lente divergente: La imagen es siempre virtual, es derecha, es de menor tamaño que el objeto.

Este resultado es independiente de la posición del objeto.

Potencia de una lente

Se define la potencia P de una lente como el inverso de su distancia focal, expresada en metros:

$$\boxed{P = \frac{1}{f}}$$

La unidad de potencia es la dioptría (D).

Lentes convergentes → potencia positiva,

Lentes divergentes → potencia negativa.

Importancia en la EBAU

En la EBAU, las lentes delgadas aparecen: en problemas numéricos con la ecuación de la lente, en cálculos de aumento y potencia, en razonamientos sobre la naturaleza de la imagen.

Errores frecuentes: no aplicar correctamente el criterio de signos, confundir foco objeto y foco imagen, interpretar mal el aumento.

Las lentes delgadas permiten formar imágenes mediante la refracción de la luz. El uso de rayos principales y de la ecuación de las lentes proporciona un método sencillo y riguroso para analizar sistemas ópticos, constituyendo una parte esencial de la óptica geométrica en la EBAU.

5. Formación de imágenes

La formación de imágenes es el objetivo central de la óptica geométrica. Tanto los espejos como las lentes permiten obtener imágenes de los objetos mediante la reflexión o la refracción de la luz. Aunque los sistemas ópticos estudiados son distintos, el análisis de la formación de imágenes sigue un método común, basado en el trazado de rayos principales y en el uso de ecuaciones algebraicas.

Este epígrafe integra y sistematiza los resultados obtenidos en los apartados anteriores, proporcionando un marco unificado para resolver problemas típicos de la EBAU.

Objeto e imagen

Se denomina objeto al punto o conjunto de puntos desde los que parten los rayos luminosos que inciden sobre el sistema óptico. Se denomina imagen al punto o conjunto de puntos donde convergen los rayos emergentes o desde donde parecen divergir.

La imagen puede ser:

Real, si los rayos emergentes convergen realmente en ella,

Virtual, si la imagen se obtiene por prolongación de los rayos.

Imágenes reales e imágenes virtuales

Las imágenes reales: se forman por intersección real de rayos, pueden proyectarse sobre una pantalla, suelen ser invertidas.

Las imágenes virtuales: no se forman por intersección real de rayos, no pueden proyectarse sobre una pantalla, suelen ser derechas.

Esta distinción es fundamental y aparece de forma recurrente en la EBAU.

Criterio de signos

Para aplicar correctamente las ecuaciones de espejos y lentes es imprescindible utilizar un criterio de signos coherente. El más habitual en Bachillerato es: distancias medidas en el sentido de propagación de la luz: positivas, distancias medidas en sentido contrario: negativas, distancia focal positiva en sistemas convergentes, distancia focal negativa en sistemas divergentes.

Un uso incorrecto de los signos conduce a errores incluso con planteamientos conceptualmente correctos.

Ecuaciones fundamentales

Tanto en espejos esféricos como en lentes delgadas se utiliza la misma ecuación formal:

$$\boxed{\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{f}}$$

donde: s es la distancia del objeto, s' es la distancia de la imagen, f es la distancia focal del sistema.

El aumento lateral viene dado por:

$$\boxed{M = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}}$$

Estas dos expresiones constituyen el núcleo matemático de la óptica geométrica en la EBAU.

Procedimiento general para la formación de imágenes

En cualquier problema de formación de imágenes se recomienda seguir el siguiente procedimiento:

1. Identificar el sistema óptico (espejo o lente).
2. Determinar el tipo de sistema (convergente o divergente).
3. Asignar correctamente las distancias sy f, teniendo en cuenta el criterio de signos.
4. Aplicar la ecuación fundamental para calcular s'.
5. Calcular el aumento lateral M.
6. Interpretar el signo y el valor del aumento para describir la imagen.

Este método sistemático reduce errores y es especialmente eficaz en situaciones de examen.

Formación de imágenes en espejos.

En los espejos esféricos, la imagen se forma por reflexión. Según el tipo de espejo y la posición del objeto:

El espejo cóncavo puede formar imágenes reales o virtuales,

El espejo convexo forma siempre imágenes virtuales, derechas y de menor tamaño.

El trazado de rayos principales permite anticipar cualitativamente el resultado antes de realizar cálculos.

Formación de imágenes en lentes

En las lentes delgadas, la imagen se forma por refracción:

Las lentes convergentes pueden formar imágenes reales o virtuales,

Las lentes divergentes forman siempre imágenes virtuales, derechas y reducidas.

El paralelismo formal con los espejos permite aplicar procedimientos idénticos.

Imagen aumentada, reducida o del mismo tamaño

El tamaño de la imagen se determina a partir del valor absoluto del aumento lateral:

$|M| > 1$: imagen aumentada,

$|M| = 1$: imagen del mismo tamaño,

$|M| < 1$: imagen reducida.

El signo de M indica la orientación de la imagen.

Análisis cualitativo previo

Antes de aplicar las ecuaciones, es recomendable realizar un análisis cualitativo mediante rayos principales. Este análisis permite: prever si la imagen será real o virtual, anticipar su orientación, comprobar la coherencia del resultado numérico.

En la EBAU se valora especialmente la coherencia entre razonamiento físico y cálculo matemático.

Errores frecuentes en la EBAU

Entre los errores más habituales se encuentran: confundir objeto real con imagen real, olvidar el signo negativo del aumento, aplicar mal el criterio de signos, no interpretar físicamente el resultado obtenido.

Evitar estos errores es tan importante como resolver correctamente las ecuaciones.

La formación de imágenes constituye el núcleo de la óptica geométrica. El uso conjunto de ecuaciones y razonamiento geométrico permite analizar de forma rigurosa el comportamiento de espejos y lentes, proporcionando herramientas sólidas para la resolución de problemas típicos de la EBAU.

BLOQUE D. FÍSICA RELATIVISTA, CUÁNTICA, NUCLEAR Y DE PARTÍCULAS

Capítulo 13. Origen de la Física Cuántica

1. Crisis de la Física Clásica

Durante el siglo XIX, la Física clásica parecía capaz de explicar la mayoría de los fenómenos naturales conocidos. Las leyes de la mecánica de Newton, la termodinámica y el electromagnetismo permitían describir con precisión el movimiento de los cuerpos, la propagación de las ondas y los fenómenos eléctricos y magnéticos. En este marco teórico, la energía se consideraba una magnitud continua, capaz de intercambiarse en cualquier cantidad.

Sin embargo, al estudiar fenómenos relacionados con la radiación electromagnética y su interacción con la materia, comenzaron a aparecer resultados experimentales que no podían explicarse mediante las leyes clásicas. Estas dificultades dieron lugar a la denominada crisis de la Física clásica, que marcó el inicio de la Física Cuántica.

Ámbito de validez de la Física clásica

La Física clásica describe correctamente los fenómenos macroscópicos, caracterizados por: dimensiones grandes frente a la escala atómica, velocidades pequeñas comparadas con la velocidad de la luz, intercambio continuo de energía.

En este contexto, no existe ninguna restricción teórica sobre los valores que puede tomar la energía. Esta hipótesis resulta adecuada para sistemas macroscópicos, pero se revela incorrecta cuando se aplica a procesos microscópicos.

Radiación térmica y cuerpo negro

Todos los cuerpos emiten radiación electromagnética como consecuencia de su temperatura. Para estudiar este fenómeno de forma idealizada se introduce el concepto de cuerpo negro, definido como un sistema que absorbe toda la radiación que incide sobre él y cuya radiación emitida depende exclusivamente de su temperatura.

Experimentalmente se observa que la radiación emitida por un cuerpo negro presenta una distribución espectral, es decir, la energía emitida depende de la frecuencia de la radiación. Para una temperatura dada, la intensidad presenta un máximo a una frecuencia determinada y disminuye para frecuencias menores y mayores.

Predicción clásica de la radiación del cuerpo negro

La Física clásica intentó explicar este comportamiento aplicando las leyes del electromagnetismo y de la termodinámica. Según el principio clásico de equipartición de la

energía, cada modo de vibración del campo electromagnético debía tener una energía media proporcional a la temperatura:

$$\boxed{E = kT}$$

donde: k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta.

Este resultado implica que todos los modos, independientemente de su frecuencia, contribuyen con la misma energía media.

La catástrofe ultravioleta

Al aumentar la frecuencia de la radiación, el número de modos posibles crece rápidamente. Como consecuencia, la Física clásica predecía que la energía total emitida por el cuerpo negro debía crecer sin límite a altas frecuencias.

De forma cualitativa, la intensidad espectral prevista por la teoría clásica aumenta indefinidamente con la frecuencia, de modo que:

$$\boxed{I(f) \longrightarrow \infty \quad \text{cuando} f \longrightarrow \infty}$$

Este resultado contradice de forma clara los datos experimentales, que muestran que la intensidad disminuye a altas frecuencias. Esta contradicción se conoce como la catástrofe ultravioleta.

Contradicción con los resultados experimentales

Los experimentos muestran que: la intensidad de la radiación es finita, existe una frecuencia para la cual la intensidad es máxima, la posición del máximo depende de la temperatura.

La Física clásica no puede justificar matemáticamente la existencia de este máximo ni la caída de la intensidad a altas frecuencias.

Otros fenómenos incompatibles con la Física clásica

El problema del cuerpo negro no fue un caso aislado. Otros fenómenos relacionados con la interacción entre la radiación y la materia tampoco podían explicarse mediante el modelo clásico.

En los espectros atómicos, los átomos emiten radiación únicamente a ciertas frecuencias bien definidas, lo que da lugar a espectros de líneas, en lugar de espectros continuos.

En el efecto fotoeléctrico, se observa que la emisión de electrones depende de la frecuencia de la radiación incidente y no de su intensidad, lo que contradice las predicciones clásicas.

Fracaso del modelo energético continuo

En todos estos fenómenos aparece un rasgo común: la energía no parece intercambiarse de forma continua. La hipótesis clásica de continuidad energética conduce a resultados que no coinciden con la experiencia.

Este fracaso puso de manifiesto que el modelo clásico solo es válido dentro de un dominio limitado y que debía ser modificado para describir los procesos microscópicos.

Necesidad de una nueva hipótesis

La acumulación de resultados experimentales incompatibles con la Física clásica condujo a la necesidad de introducir una nueva hipótesis fundamental: la energía no se intercambia de forma continua, sino en cantidades discretas.

Esta idea será formulada en el siguiente epígrafe mediante la hipótesis de Planck, que introduce una relación directa entre la energía y la frecuencia de la radiación.

Fórmulas asociadas a este epígrafe (nivel PAU)

En la PAU, este epígrafe puede requerir conocer y utilizar las siguientes expresiones:

$$\boxed{E = kT}$$

(energía media clásica por modo)

$$\boxed{I(f) \to \infty \text{ al aumentar } f \text{ (predicción clásica)}}$$

(catástrofe ultravioleta, de forma cualitativa)

Estas fórmulas no se aplican numéricamente, pero sí deben interpretarse correctamente.

Qué preguntas pueden caer en PAU

Este contenido suele aparecer en preguntas de teoría como: explicar la crisis de la Física clásica, definir el cuerpo negro, describir la catástrofe ultravioleta, justificar la necesidad de una nueva teoría, relacionar estos problemas con el origen de la Física Cuántica.

La crisis de la Física clásica puso de manifiesto los límites del modelo continuo de la energía y la incapacidad de las teorías clásicas para explicar la interacción entre la radiación y la materia. El estudio de la radiación del cuerpo negro y otros fenómenos microscópicos hizo necesaria la introducción de nuevas ideas que darían lugar al nacimiento de la Física Cuántica.

2. Hipótesis de Planck

La hipótesis de Planck marca el inicio formal de la Física Cuántica. Fue propuesta para explicar la radiación del cuerpo negro, un fenómeno que la Física clásica no podía describir

correctamente. La clave de la propuesta de Planck consiste en abandonar la idea clásica de intercambio continuo de energía e introducir la cuantización de la energía.

Esta hipótesis no surge como una teoría general, sino como una solución concreta a un problema experimental muy preciso, aunque sus consecuencias serán profundas y revolucionarias.

Cuantización de la energía

Según la Física clásica, un sistema puede intercambiar energía en cualquier cantidad. Planck propuso que, en ciertos procesos microscópicos, la energía no se emite ni se absorbe de forma continua, sino en cantidades discretas llamadas cuantos de energía.

La energía asociada a cada cuanto es proporcional a la frecuencia de la radiación electromagnética y viene dada por la expresión:

$$\boxed{E = hf}$$

donde: E es la energía del cuanto, f es la frecuencia de la radiación, h es la constante de Planck.

Esta relación es fundamental en la PAU.

Constante de Planck

La constante de Planck es una constante fundamental de la naturaleza cuyo valor es:

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34}\, J \cdot s$$

Su pequeño valor explica por qué los efectos cuánticos no son apreciables a escala macroscópica y por qué la Física clásica funciona correctamente en ese dominio.

Energía emitida por un oscilador

Planck consideró que los sistemas materiales responsables de emitir radiación solo podían intercambiar energía en múltiplos enteros de un cuanto elemental. La energía total emitida o absorbida viene dada por:

$$\boxed{E_n = nhf\,(n = 1,2,3, \dots\ )}$$

Esta expresión indica que: la energía está cuantizada, no se admiten valores intermedios, el intercambio energético se produce "a saltos".

Consecuencias físicas de la hipótesis

La hipótesis de Planck permite explicar: la existencia de un máximo en el espectro del cuerpo negro, la ausencia de la catástrofe ultravioleta, la dependencia de la radiación con la frecuencia.

Al limitar la energía intercambiada a altas frecuencias, se evita la divergencia predicha por la Física clásica.

Interpretación física

Planck no afirmó inicialmente que la radiación estuviera formada por partículas, sino que la emisión y absorción de energía por parte de la materia estaba cuantizada. No obstante, esta idea abrió la puerta a una nueva concepción de la radiación electromagnética que se desarrollará en epígrafes posteriores.

Es importante destacar que la cuantización afecta al intercambio de energía, no a la propagación de la onda, que sigue describiéndose mediante ecuaciones ondulatorias clásicas.

Importancia de la frecuencia

La expresión $E = hf$ muestra que la energía de la radiación depende exclusivamente de su frecuencia y no de su intensidad. Esto supone un cambio radical respecto a la Física clásica y será clave para explicar fenómenos como el efecto fotoeléctrico.

Radiaciones de mayor frecuencia transportan cuantos de mayor energía.

Conexión con los espectros atómicos

La cuantización de la energía sugiere que los sistemas microscópicos solo pueden emitir o absorber radiación a ciertas frecuencias bien definidas. Esta idea permitirá explicar posteriormente la existencia de espectros atómicos de líneas, que no pueden interpretarse con un modelo clásico.

Fórmulas asociadas a este epígrafe (PAU)

Las expresiones fundamentales que pueden pedirse explícitamente son:

$$\boxed{E = hf}$$

$$\boxed{E_n = nhf}$$

Es esencial interpretar correctamente estas fórmulas y saber explicar su significado físico.

Preguntas típicas de teoría en PAU

En este epígrafe se puede pedir: enunciar la hipótesis de Planck, explicar qué significa que la energía esté cuantizada, escribir y explicar la expresión $E = hf$, justificar por qué esta hipótesis resuelve el problema del cuerpo negro, indicar el significado físico de la constante de Planck.

La hipótesis de Planck introduce la cuantización de la energía y rompe con la concepción continua de la Física clásica. Esta idea, propuesta inicialmente para explicar la radiación del cuerpo negro, constituye el punto de partida de la Física Cuántica y será esencial para comprender los fenómenos estudiados en los siguientes epígrafes.

3. Espectros atómicos

El estudio de los espectros atómicos proporcionó una de las evidencias experimentales más claras de que la Física clásica no era válida a escala microscópica. Al analizar la radiación emitida o absorbida por los átomos, se observó un comportamiento que solo puede explicarse suponiendo que la energía de los sistemas atómicos está cuantizada.

Este epígrafe es especialmente importante en la PAU porque conecta directamente los resultados experimentales con la necesidad de introducir modelos cuánticos del átomo.

Emisión y absorción de radiación por los átomos

Cuando un átomo se excita, puede emitir radiación electromagnética. De forma inversa, un átomo puede absorber radiación incidente si esta cumple ciertas condiciones. Experimentalmente se observa que esta emisión o absorción no se produce a cualquier frecuencia, sino únicamente a frecuencias muy concretas.

Este comportamiento es incompatible con el modelo clásico del átomo, según el cual un electrón en movimiento debería emitir radiación de forma continua.

Espectros continuos y espectros de líneas

Existen dos tipos fundamentales de espectros:

Un espectro continuo, en el que aparecen todas las longitudes de onda dentro de un intervalo. Este tipo de espectro es característico de sólidos incandescentes y gases a alta presión.

Un espectro de líneas, en el que solo aparecen ciertas longitudes de onda bien definidas. Este es el tipo de espectro característico de los gases atómicos a baja presión.

Los átomos no emiten radiación de forma continua, sino en forma de líneas espectrales.

Espectros de emisión

Un espectro de emisión se obtiene cuando un gas excitado emite radiación. Al analizar la luz emitida con un espectroscopio, se observan una serie de líneas brillantes sobre fondo oscuro.

Cada elemento químico presenta un espectro de emisión característico, lo que permite identificarlo de forma inequívoca.

Espectros de absorción

Un espectro de absorción se obtiene cuando una radiación continua atraviesa un gas frío. En este caso, el espectro observado es continuo, pero presenta líneas oscuras correspondientes a las frecuencias absorbidas por el gas.

Las líneas de absorción coinciden exactamente con las líneas de emisión del mismo elemento.

Interpretación energética de los espectros

La existencia de espectros de líneas indica que los átomos solo pueden emitir o absorber energía en cantidades discretas. Esto implica que los estados energéticos del átomo no son continuos, sino que están cuantizados.

Cuando un átomo emite radiación, pasa de un estado de mayor energía a otro de menor energía. La energía del fotón emitido viene dada por:

$$\boxed{E = hf}$$

Esta expresión relaciona directamente la frecuencia de la radiación con la diferencia de energía entre los estados atómicos.

Relación entre niveles energéticos y frecuencia

Si un átomo pasa de un nivel energético E_i a otro E_f, con $E_i > E_f$, la energía del fotón emitido es:

$$\boxed{E = E_i - E_f}$$

Combinando esta expresión con la hipótesis de Planck se obtiene:

$$\boxed{E_i - E_f = hf}$$

Esta relación es clave en la PAU y debe saberse interpretar correctamente.

Espectro del hidrógeno

El átomo de hidrógeno presenta uno de los espectros más simples y mejor estudiados. Experimentalmente se observa que sus líneas espectrales se agrupan en series, cada una correspondiente a transiciones que terminan en un mismo nivel energético.

La relación entre la longitud de onda de las líneas del espectro del hidrógeno viene dada por la fórmula de Rydberg:

$$\boxed{\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)}$$

donde: R es la constante de Rydberg, n_i y n_f son números enteros con $n_i > n_f$.

Esta expresión es empírica y precede al modelo de Bohr.

Significado físico de la fórmula de Rydberg

La fórmula de Rydberg muestra que: solo ciertas longitudes de onda son posibles, los valores observados siguen una regularidad matemática, la energía del átomo solo puede tomar ciertos valores.

Este resultado experimental fue una de las principales motivaciones para desarrollar un modelo cuántico del átomo.

Fracaso del modelo clásico del átomo

Según la Física clásica, un electrón en órbita debería emitir radiación continuamente y perder energía de forma progresiva, lo que provocaría el colapso del átomo. Además, la radiación emitida debería ser continua.

Los espectros de líneas muestran que esta descripción es incorrecta y que el átomo posee una estructura energética discreta.

Importancia en la PAU

En la PAU, este epígrafe aparece: en preguntas de desarrollo sobre espectros de emisión y absorción, en la interpretación de líneas espectrales, en el uso de la relación $E = hf$, en la explicación cualitativa del significado de la fórmula de Rydberg.

No se exige deducir las fórmulas, pero sí saber explicarlas y aplicarlas conceptualmente.

Los espectros atómicos proporcionan una evidencia experimental directa de la cuantización de la energía en los átomos. La existencia de líneas espectrales solo puede explicarse suponiendo que los estados energéticos atómicos son discretos, lo que conduce de forma natural al desarrollo de modelos cuánticos del átomo, como el modelo de Bohr.

4. Modelo atómico de Bohr

El modelo atómico de Bohr fue propuesto para explicar la estabilidad del átomo y la existencia de espectros atómicos de líneas, fenómenos que no podían interpretarse mediante la Física clásica. Aunque hoy se sabe que es un modelo limitado, constituye un paso fundamental en el desarrollo de la Física Cuántica y tiene una gran importancia en la PAU, especialmente aplicado al átomo de hidrógeno.

Problemas del modelo clásico del átomo

Según la Física clásica, el átomo se concebía como un núcleo positivo alrededor del cual giraban los electrones en órbitas circulares. Sin embargo, este modelo presenta dos problemas graves:

En primer lugar, un electrón en movimiento circular está acelerado y, según el electromagnetismo clásico, debería emitir radiación de forma continua, perdiendo energía y cayendo rápidamente sobre el núcleo.

En segundo lugar, la radiación emitida debería ser continua, en contradicción con los espectros atómicos de líneas observados experimentalmente.

Estos problemas muestran que el modelo clásico del átomo es inestable y no puede explicar los resultados experimentales.

Postulados del modelo de Bohr

Para resolver estas dificultades, Bohr propuso un modelo basado en una serie de postulados, introduciendo ideas cuánticas de forma explícita.

El primer postulado establece que el electrón solo puede moverse alrededor del núcleo en órbitas circulares estacionarias en las que no emite energía, a pesar de estar acelerado.

El segundo postulado afirma que solo están permitidas aquellas órbitas para las cuales el momento angular del electrón está cuantizado:

$$\boxed{L = mvr = n\hbar = \frac{nh}{2\pi}}$$

donde: m es la masa del electrón, v su velocidad, r el radio de la órbita, n es un número entero positivo, h es la constante de Planck.

Este postulado introduce la cuantización de forma directa.

Emisión y absorción de radiación

El tercer postulado establece que la radiación se emite o se absorbe cuando el electrón pasa de una órbita estacionaria a otra. La energía del fotón emitido o absorbido viene dada por:

$$\boxed{E = hf = E_i - E_f}$$

donde E_i y E_f son las energías de los niveles inicial y final, respectivamente.

Este postulado conecta el modelo de Bohr con la hipótesis de Planck y con los espectros atómicos.

Fuerza centrípeta y equilibrio dinámico

En el átomo de hidrógeno, el electrón se mueve bajo la acción de la fuerza eléctrica atractiva entre el núcleo y el electrón, que actúa como fuerza centrípeta:

$$\boxed{F_e = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\ \frac{e^2}{r^2}}$$

Esta fuerza proporciona la aceleración centrípeta necesaria para el movimiento circular:

$$\boxed{F_c = \frac{mv^2}{r}}$$

Igualando ambas expresiones se obtiene la condición de equilibrio dinámico del electrón en la órbita.

Radios permitidos de las órbitas

Combinando la condición de equilibrio dinámico con la cuantización del momento angular, se obtiene que solo ciertos valores del radio están permitidos:

$$\boxed{r_n = n^2 a_0}$$

donde a_0 es el radio de Bohr, cuyo valor es:

$$\boxed{a_0 = 5{,}29 \times 10^{-11}\ \text{m}}$$

Este resultado muestra que las órbitas electrónicas no son continuas, sino discretas.

Energía de los niveles del átomo de hidrógeno

La energía total del electrón en una órbita es la suma de su energía cinética y su energía potencial eléctrica. El resultado final para los niveles energéticos es:

$$\boxed{E_n = -\frac{13{,}6\ \text{eV}}{n^2}}$$

Este es uno de los resultados más importantes del modelo de Bohr y aparece con mucha frecuencia en la PAU.

El signo negativo indica que el electrón está ligado al núcleo.

Explicación de los espectros atómicos

Cuando el electrón pasa de un nivel n_i a otro n_f con $n_i > n_f$, se emite un fotón cuya energía cumple:

$$\boxed{hf = E_{n_i} - E_{n_f}}$$

Esta expresión permite explicar: la existencia de líneas espectrales, la regularidad observada en la fórmula de Rydberg, el origen energético de las distintas series espectrales.

Ionización del átomo de hidrógeno

La energía de ionización del átomo de hidrógeno es la energía necesaria para llevar el electrón desde el estado fundamental $n = 1$ hasta el infinito:

$$\boxed{E_{\text{ionización}} = 13{,}6 \text{ eV}}$$

Este resultado también es directamente preguntable en la PAU.

Limitaciones del modelo de Bohr

El modelo de Bohr: explica correctamente el espectro del hidrógeno, introduce la cuantización de forma clara, fracasa para átomos con más de un electrón, no explica algunos detalles finos de los espectros.

A pesar de estas limitaciones, su importancia histórica y didáctica es fundamental.

Qué puede caer en la PAU

En este epígrafe pueden pedirse: los postulados de Bohr, la expresión del momento angular cuantizado, la fórmula de los niveles energéticos, la explicación de los espectros atómicos, el significado físico de la energía de ionización.

El modelo atómico de Bohr introduce la cuantización de las órbitas electrónicas y permite explicar la estabilidad del átomo de hidrógeno y la existencia de espectros atómicos de líneas. Aunque limitado, constituye un paso esencial en el desarrollo de la Física Cuántica y es un contenido clave en la PAU.

5. Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un metal cuando sobre su superficie incide radiación electromagnética de frecuencia suficientemente alta. Este fenómeno no puede explicarse mediante la Física clásica y constituye una de las pruebas experimentales más claras del carácter corpuscular de la radiación electromagnética.

El estudio del efecto fotoeléctrico tuvo un papel decisivo en el desarrollo de la Física Cuántica y es un contenido central en la PAU, tanto en preguntas teóricas como en problemas numéricos sencillos.

Observaciones experimentales fundamentales

El estudio experimental del efecto fotoeléctrico revela una serie de hechos que contradicen directamente las predicciones de la Física clásica.

En primer lugar, se observa que no se produce emisión de electrones si la frecuencia de la radiación incidente es menor que un cierto valor, independientemente de la intensidad de la radiación. Este valor se denomina frecuencia umbral.

En segundo lugar, cuando la frecuencia es mayor que la frecuencia umbral, la energía cinética máxima de los electrones emitidos aumenta con la frecuencia, pero no con la intensidad de la radiación.

En tercer lugar, el fenómeno es prácticamente instantáneo: la emisión de electrones se produce sin retraso apreciable, incluso a intensidades muy bajas.

Estas observaciones no pueden explicarse suponiendo que la energía de la radiación se distribuye de forma continua.

Fracaso de la explicación clásica

Según la Física clásica, la energía transportada por la radiación depende de su intensidad. Por tanto, al aumentar la intensidad de la luz incidente, los electrones deberían adquirir mayor energía cinética, independientemente de la frecuencia.

Sin embargo, los resultados experimentales muestran que: aumentar la intensidad solo aumenta el número de electrones emitidos, la energía de los electrones depende exclusivamente de la frecuencia, existe una frecuencia mínima por debajo de la cual no hay emisión.

Este comportamiento es incompatible con el modelo clásico ondulatorio de la luz.

Interpretación cuántica del efecto fotoeléctrico

La explicación correcta del efecto fotoeléctrico se obtiene aplicando la hipótesis de Planck a la radiación electromagnética. Según esta interpretación, la radiación está formada por cuantos de energía, llamados fotones, cuya energía viene dada por:

$$\boxed{E = hf}$$

Cada fotón interacciona con un único electrón del metal, transfiriéndole toda su energía.

Trabajo de extracción

Para que un electrón pueda abandonar el metal, es necesario suministrarle una cierta energía mínima, denominada trabajo de extracción W. Este trabajo depende exclusivamente del material y no de la radiación incidente.

La energía del fotón se reparte de la siguiente forma: una parte se emplea en vencer el trabajo de extracción, el resto se transforma en energía cinética del electrón emitido.

Ecuación fundamental del efecto fotoeléctrico

El balance energético del proceso viene dado por la ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico:

$$\boxed{hf = W + E_{c,\text{máx}}}$$

donde: hf es la energía del fotón incidente, W es el trabajo de extracción del metal, $E_{c,\text{máx}}$ es la energía cinética máxima de los electrones emitidos.

Esta ecuación es clave absoluta en la PAU.

Frecuencia umbral

La frecuencia umbral f_0 es la frecuencia mínima necesaria para que se produzca el efecto fotoeléctrico. Se define por la condición de que la energía cinética máxima sea nula:

$$\boxed{hf_0 = W}$$

De esta expresión se obtiene:

$$\boxed{f_0 = \frac{W}{h}}$$

Si $f < f_0$, no hay emisión de electrones, aunque la intensidad sea muy grande.

Energía cinética máxima de los electrones

La energía cinética máxima de los electrones emitidos puede expresarse como:

$$\boxed{E_{c,\text{máx}} = hf - W}$$

En términos de velocidad máxima:

$$\boxed{E_{c,\text{máx}} = \frac{1}{2}mv_{\text{máx}}^2}$$

Estas expresiones permiten resolver problemas numéricos sencillos en la PAU.

Papel de la intensidad de la radiación

La intensidad de la radiación no influye en la energía de los electrones emitidos. Su efecto es aumentar el número de fotones incidentes y, por tanto, el número de electrones emitidos, siempre que la frecuencia sea mayor que la frecuencia umbral.

Este resultado es uno de los aspectos más importantes del efecto fotoeléctrico y suele preguntarse de forma conceptual en los exámenes.

Significado físico del efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico demuestra que la radiación electromagnética no puede describirse únicamente como una onda. En la interacción con la materia, la luz se comporta como un conjunto de partículas que transfieren energía de forma localizada.

Este fenómeno constituye una prueba experimental directa del carácter corpuscular de la radiación electromagnética y complementa su descripción ondulatoria.

Qué se pregunta en la PAU

En la PAU, el efecto fotoeléctrico aparece muy frecuentemente en: preguntas de desarrollo teórico, cuestiones conceptuales sobre frecuencia e intensidad, problemas

numéricos con la ecuación $hf = W + E_c$, interpretación de la frecuencia umbral, justificación del carácter corpuscular de la luz.

Es fundamental saber explicar el fenómeno con palabras y con ecuaciones.

El efecto fotoeléctrico muestra que la energía de la radiación electromagnética está cuantizada y depende de su frecuencia. La explicación cuántica del fenómeno, basada en la interacción entre fotones y electrones, puso fin a la crisis de la Física clásica y consolidó el nacimiento de la Física Cuántica.

Capítulo 14. Principios cuánticos

1. Dualidad onda-corpúsculo

Este epígrafe es conceptual pero muy examinable. Aquí se consolida la idea de que ni la luz ni la materia pueden describirse exclusivamente como ondas o como partículas. La dualidad onda-corpúsculo constituye uno de los principios fundamentales de la Física Cuántica y aparece de forma recurrente en preguntas teóricas de la PAU.

Límites de las descripciones clásicas

En la Física clásica: las ondas se caracterizan por fenómenos como interferencia y difracción, las partículas se describen como objetos localizados que siguen trayectorias bien definidas.

Sin embargo, a comienzos del siglo XX se observó que esta separación dejaba de ser válida cuando se estudiaban fenómenos microscópicos.

La luz, tradicionalmente considerada una onda electromagnética, muestra comportamientos propios de partículas en el efecto fotoeléctrico. Por otro lado, partículas materiales como los electrones muestran propiedades ondulatorias en determinados experimentos.

Dualidad en la radiación electromagnética

La radiación electromagnética presenta: comportamiento ondulatorio en fenómenos como interferencia y difracción, comportamiento corpuscular en procesos de intercambio energético, como el efecto fotoeléctrico.

La energía de la radiación se intercambia en cuantos, llamados fotones, cuya energía viene dada por:

$$\boxed{E = hf}$$

Este resultado no elimina el carácter ondulatorio de la luz, sino que muestra que ambos modelos son necesarios.

Hipótesis de de Broglie

Louis de Broglie propuso que esta dualidad no es exclusiva de la radiación, sino que también se extiende a la materia. Según su hipótesis, a toda partícula material en movimiento se le puede asociar una onda.

La longitud de onda asociada a una partícula de cantidad de movimiento $p$viene dada por:

$$\boxed{\lambda = \frac{h}{p}}$$

donde: h es la constante de Planck, $p = mv$ es la cantidad de movimiento de la partícula.

Esta expresión es clave en la PAU.

Interpretación de la longitud de onda de de Broglie

La expresión de de Broglie muestra que: para partículas macroscópicas, la longitud de onda es despreciable, para partículas microscópicas, la longitud de onda puede ser apreciable.

Esto explica por qué los efectos ondulatorios solo se observan en partículas muy pequeñas, como electrones o neutrones.

Confirmación experimental

La hipótesis de de Broglie fue confirmada experimentalmente al observarse fenómenos de interferencia y difracción con electrones. Estos resultados demuestran que las partículas materiales pueden comportarse como ondas en determinadas condiciones.

No obstante, la detección de las partículas se realiza siempre de forma localizada, lo que confirma también su carácter corpuscular.

Complementariedad de los modelos

La dualidad onda-corpúsculo no significa que una partícula sea simultáneamente una onda y una partícula en el sentido clásico. Significa que: el comportamiento observado depende del tipo de experimento realizado, ambos modelos son necesarios para describir la realidad microscópica.

Esta idea será esencial para comprender el principio de incertidumbre.

Importancia en la PAU

En la PAU, este epígrafe aparece: en preguntas de desarrollo teórico, en cuestiones sobre la hipótesis de de Broglie, en la interpretación de la dualidad onda-corpúsculo, en la escritura y explicación de la expresión $\lambda = h/p$.

No se exige un tratamiento matemático avanzado, pero sí una explicación clara y coherente.

La dualidad onda-corpúsculo muestra que ni la radiación ni la materia pueden describirse mediante los conceptos clásicos de onda o partícula de forma exclusiva. La Física Cuántica introduce una nueva visión en la que ambos modelos son complementarios y necesarios para describir los fenómenos microscópicos.

2. Principio de incertidumbre

El principio de incertidumbre, formulado por Werner Heisenberg, establece una limitación fundamental al conocimiento simultáneo de ciertas magnitudes físicas en el ámbito microscópico. Este principio no es consecuencia de imperfecciones experimentales, sino una propiedad intrínseca de la naturaleza a escala cuántica.

En la PAU, el principio de incertidumbre se evalúa principalmente desde un punto de vista conceptual, aunque es imprescindible conocer y saber interpretar sus expresiones matemáticas.

Medición y descripción clásica

En la Física clásica se supone que es posible conocer simultáneamente y con precisión arbitraria: la posición y la velocidad de una partícula, la energía y el tiempo asociado a un proceso.

Esta suposición deja de ser válida cuando se estudian sistemas microscópicos, como electrones o fotones.

Planteamiento del principio de incertidumbre

El principio de incertidumbre establece que existen pares de magnitudes físicas conjugadas cuyo conocimiento simultáneo está limitado. En particular, no es posible determinar de forma simultánea y exacta la posición y la cantidad de movimiento de una partícula.

Esta limitación es fundamental y no puede eliminarse mejorando los instrumentos de medida.

Incertidumbre posición–cantidad de movimiento

La expresión matemática del principio de incertidumbre para la posición xy la cantidad de movimiento p es:

$$\boxed{\Delta x \, \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}}$$

donde: Δx es la incertidumbre en la posición, Δp es la incertidumbre en la cantidad de movimiento, h es la constante de Planck.

Esta es la expresión clave en la PAU.

Interpretación física

La expresión anterior indica que: cuanto menor sea la incertidumbre en la posición, mayor será la incertidumbre en la cantidad de movimiento, no es posible hacer simultáneamente $\Delta x = 0$ y $\Delta p = 0$.

No se trata de un problema de precisión experimental, sino de una característica esencial del comportamiento cuántico.

Relación con la dualidad onda-corpúsculo

El principio de incertidumbre está estrechamente relacionado con la dualidad onda-corpúsculo. Al asociar una onda a una partícula, la localización espacial precisa implica la superposición de ondas con diferentes longitudes de onda, lo que introduce una dispersión en la cantidad de movimiento.

Esta conexión muestra la coherencia interna de los principios cuánticos.

Incertidumbre energía–tiempo

Existe una relación análoga entre la incertidumbre en la energía E y la incertidumbre en el tiempo t:

$$\boxed{\Delta E\, \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}}$$

Esta expresión indica que, en procesos que ocurren en intervalos de tiempo muy pequeños, la energía del sistema no puede estar perfectamente definida.

Significado físico de la relación energía–tiempo

A diferencia de la posición y el momento, el tiempo no es una magnitud dinámica del sistema, sino un parámetro externo. Por ello, esta relación se interpreta como una limitación en la definición energética de estados que existen durante intervalos de tiempo muy cortos.

En la PAU se pide normalmente una interpretación cualitativa, no cálculos numéricos.

Consecuencias del principio de incertidumbre

El principio de incertidumbre implica que: no existen trayectorias bien definidas para las partículas microscópicas, conceptos clásicos como posición exacta o velocidad exacta pierden sentido, la descripción determinista de la Física clásica debe sustituirse por una descripción probabilista.

Estas consecuencias marcan una ruptura profunda con la Física clásica.

Errores frecuentes en la PAU

Algunos errores habituales son: interpretar la incertidumbre como un fallo instrumental, pensar que se puede reducir simultáneamente ambas incertidumbres, confundir incertidumbre con error experimental.

Es importante insistir en que la incertidumbre es una propiedad fundamental del sistema.

Qué puede caer en la PAU

Este epígrafe aparece en: preguntas de desarrollo teórico, cuestiones conceptuales sobre límites de la medida, interpretación de las expresiones matemáticas, comparación entre Física clásica y cuántica.

Se valora especialmente una explicación clara del significado físico, más que la manipulación algebraica.

El principio de incertidumbre establece un límite fundamental al conocimiento simultáneo de determinadas magnitudes físicas y pone de manifiesto la imposibilidad de describir los sistemas microscópicos con los conceptos clásicos. Junto con la dualidad onda-corpúsculo, constituye uno de los pilares básicos de la Física Cuántica.

Capítulo 15. Física nuclear

1. El núcleo atómico

La Física nuclear se ocupa del estudio del núcleo atómico, la región central del átomo donde se concentra prácticamente toda su masa y su carga positiva. A pesar de su tamaño extremadamente pequeño, el núcleo es responsable de fenómenos físicos de enorme importancia, como la radiactividad natural, la fisión y la fusión nuclear, así como de la liberación de grandes cantidades de energía. El conocimiento de la estructura y propiedades del núcleo es esencial para comprender estos procesos, que forman parte habitual de los contenidos evaluados en la PAU.

El núcleo está formado por partículas llamadas nucleones, que pueden ser protones o neutrones. Los protones poseen carga eléctrica positiva, mientras que los neutrones son eléctricamente neutros. Aunque los electrones también forman parte del átomo, no se consideran partículas nucleares, ya que se encuentran en la región externa del átomo y su contribución a la masa total es despreciable frente a la del núcleo.

Número atómico y número másico

Para describir un núcleo se utilizan dos magnitudes fundamentales. El número atómico, representado por Z, indica el número de protones presentes en el núcleo. Este número determina la identidad química del elemento, ya que todos los átomos con el mismo número atómico pertenecen al mismo elemento químico.

El número másico, representado por A, indica el número total de nucleones del núcleo. Se obtiene sumando el número de protones y el número de neutrones, de modo que se cumple la relación:

$$A = Z + N$$

donde N es el número de neutrones. La notación habitual para representar un núcleo es:

$$^{A}_{Z}X$$

donde Xes el símbolo químico del elemento.

Isótopos

Existen núcleos que tienen el mismo número atómico pero distinto número másico. Estos núcleos se denominan isótopos. Los isótopos corresponden a un mismo elemento químico, ya que tienen el mismo número de protones, pero difieren en el número de neutrones.

La existencia de isótopos muestra que el número de neutrones influye en las propiedades nucleares, como la estabilidad, sin modificar las propiedades químicas fundamentales del elemento. Algunos isótopos son estables, mientras que otros son radiactivos.

Dimensiones del núcleo

El tamaño del núcleo es extremadamente pequeño comparado con el tamaño total del átomo. Experimentalmente se ha comprobado que el radio nuclear depende del número másico según la expresión empírica:

$$R = R_0 A^{1/3}$$

donde R_0 es una constante cuyo valor aproximado es:

$$R_0 \approx 1{,}2 \times 10^{-15}\ \text{m}$$

Esta relación indica que el volumen del núcleo es proporcional al número de nucleones, lo que implica que la densidad nuclear es aproximadamente constante para todos los núcleos. Este resultado es uno de los hechos fundamentales de la Física nuclear.

Masa del núcleo

La masa de un núcleo es del orden de la suma de las masas de sus protones y neutrones. Sin embargo, medidas experimentales precisas muestran que la masa real del núcleo es ligeramente menor que dicha suma. Esta diferencia de masa es un hecho fundamental que no puede explicarse desde un punto de vista clásico y está relacionada con la energía necesaria para mantener unidos a los nucleones.

Este fenómeno conduce al concepto de defecto de masa, que será desarrollado en el siguiente epígrafe, y constituye una de las bases de la liberación de energía en los procesos nucleares.

Fuerza nuclear

Los nucleones se mantienen unidos en el núcleo gracias a la llamada fuerza nuclear fuerte. Esta interacción presenta características muy diferentes de las fuerzas clásicas conocidas. Es una fuerza extremadamente intensa, capaz de vencer la repulsión eléctrica entre los protones, pero actúa solo a distancias muy pequeñas, del orden del tamaño del núcleo.

La fuerza nuclear es atractiva entre protones y neutrones, así como entre pares de protones o de neutrones, y no depende de la carga eléctrica de las partículas. Su corto alcance explica por qué solo actúa de forma efectiva dentro del núcleo y no se manifiesta a distancias mayores.

Estabilidad nuclear

La estabilidad de un núcleo depende del equilibrio entre la fuerza nuclear atractiva y la repulsión eléctrica entre protones. En núcleos ligeros, la estabilidad se alcanza aproximadamente cuando el número de neutrones es similar al número de protones. En núcleos más pesados, es necesario un mayor número de neutrones para compensar la repulsión eléctrica creciente entre protones.

Cuando este equilibrio no se alcanza, el núcleo resulta inestable y puede transformarse espontáneamente mediante procesos de desintegración radiactiva.

Importancia del núcleo en la Física nuclear

El estudio del núcleo atómico permite comprender por qué algunos núcleos son estables y otros no, así como el origen de los procesos de liberación de energía nuclear. Las propiedades nucleares no pueden explicarse mediante modelos clásicos simples, sino que requieren conceptos específicos de la Física nuclear y, en última instancia, de la Física Cuántica.

En la PAU, este epígrafe se evalúa principalmente mediante preguntas teóricas en las que se pide definir y relacionar conceptos como núcleo, nucleones, número atómico, número másico, isótopos, radio nuclear y estabilidad.

El núcleo atómico es una estructura extremadamente pequeña y densa formada por protones y neutrones, unida por la fuerza nuclear fuerte. Su descripción mediante los números atómico y másico permite clasificar los núcleos y analizar su estabilidad, sentando las bases para el estudio del defecto de masa, la energía de enlace y los procesos nucleares que se desarrollarán en los siguientes epígrafes.

2. Defecto de masa y energía de enlace

Uno de los resultados más profundos de la Física nuclear es la constatación de que la masa de un núcleo atómico no coincide exactamente con la suma de las masas de los protones y neutrones que lo constituyen cuando estos se consideran partículas libres. Esta diferencia, aparentemente pequeña, tiene consecuencias físicas enormes, ya que está directamente relacionada con la energía que mantiene unido el núcleo y con la liberación de energía en los procesos nucleares. El estudio del defecto de masa y de la energía de enlace constituye un contenido central de la Física nuclear y aparece con frecuencia en la PAU tanto en preguntas teóricas como en cuestiones de razonamiento físico.

Desde un punto de vista clásico, cabría esperar que la masa de un sistema compuesto fuese igual a la suma de las masas de sus componentes. Sin embargo, las medidas experimentales precisas realizadas sobre los núcleos atómicos muestran que esta suposición no es válida en el ámbito nuclear. La masa real del núcleo resulta ser menor que la suma de las masas de los nucleones que lo forman, lo que indica que una parte de la masa se ha transformado en energía durante el proceso de formación del núcleo.

Concepto de defecto de masa

Se denomina defecto de masa a la diferencia entre la suma de las masas de los protones y neutrones libres que formarían un núcleo y la masa real del núcleo ya formado. Matemáticamente, el defecto de masa se expresa como:

$$\Delta m = Z m_p + N m_n - m_{\text{núcleo}}$$

donde m_p es la masa del protón, m_n es la masa del neutrón, Z es el número de protones, N es el número de neutrones y $m_{\text{núcleo}}$ es la masa del núcleo. Para núcleos estables, el defecto de masa es siempre positivo, lo que significa que la masa del núcleo es menor que la suma de las masas de los nucleones aislados.

Este resultado experimental muestra que la masa no se conserva de forma independiente en los procesos nucleares, sino que está íntimamente ligada a la energía del sistema.

Equivalencia entre masa y energía

La relación entre el defecto de masa y la energía asociada al núcleo se comprende gracias al principio de equivalencia entre masa y energía, expresado por la ecuación fundamental:

$$E = mc^2$$

Aplicada al defecto de masa, esta relación indica que la masa que "falta" se ha transformado en energía. La energía correspondiente recibe el nombre de energía de enlace nuclear y viene dada por:

$$E_{\text{enlace}} = \Delta m\, c^2$$

Esta ecuación es una de las más importantes de la Física nuclear a nivel de Bachillerato y debe saberse interpretar correctamente en la PAU.

Energía de enlace nuclear

La energía de enlace de un núcleo es la energía que sería necesario suministrar para separar completamente el núcleo en protones y neutrones libres. De forma equivalente, es la energía que se libera cuando el núcleo se forma a partir de nucleones aislados.

Cuanto mayor es la energía de enlace de un núcleo, más fuerte es la unión entre sus nucleones y, por tanto, mayor es su estabilidad. La energía de enlace es una magnitud macroscópica que resume el efecto conjunto de la fuerza nuclear fuerte y de la repulsión eléctrica entre protones.

En Física nuclear es habitual expresar la energía de enlace en megaelectronvoltios (MeV). Para facilitar la conversión entre masa y energía se utiliza la equivalencia:

$$1\ \text{u} = 931{,}5\ \text{MeV}/c^2$$

Esta relación permite calcular directamente la energía de enlace a partir del defecto de masa expresado en unidades de masa atómica.

Energía de enlace por nucleón

Para comparar la estabilidad de núcleos de distinto tamaño se introduce la energía de enlace por nucleón, definida como el cociente entre la energía de enlace total del núcleo y su número másico:

$$\frac{E_{\text{enlace}}}{A}$$

Esta magnitud permite analizar la estabilidad relativa de distintos núcleos sin que el tamaño del núcleo sea un factor determinante. Experimentalmente se observa que los núcleos más estables son aquellos cuya energía de enlace por nucleón es mayor.

Curva de energía de enlace

Al representar la energía de enlace por nucleón en función del número másico se obtiene la llamada curva de energía de enlace, que presenta un comportamiento característico. Para núcleos ligeros, la energía de enlace por nucleón aumenta rápidamente al aumentar el número de nucleones. A partir de cierto valor, la curva alcanza un máximo en la región de núcleos de masa intermedia y posteriormente desciende lentamente para núcleos muy pesados.

Este comportamiento refleja el equilibrio entre la fuerza nuclear fuerte, de corto alcance y atractiva, y la repulsión eléctrica entre protones, que aumenta con el tamaño del

núcleo. La forma de esta curva es fundamental para comprender los procesos de fisión y fusión nuclear.

Estabilidad nuclear y energía de enlace

La estabilidad de un núcleo está directamente relacionada con su energía de enlace por nucleón. Los núcleos situados cerca del máximo de la curva son especialmente estables, mientras que los núcleos con valores menores de energía de enlace por nucleón tienden a transformarse en otros más estables mediante procesos nucleares.

Este criterio energético permite explicar por qué ciertos núcleos son radiactivos y por qué otros permanecen estables durante tiempos muy largos.

Relación con los procesos nucleares

La existencia del defecto de masa y de la energía de enlace explica el origen de la energía liberada en los procesos nucleares. En las transformaciones nucleares, los núcleos iniciales y finales presentan distintas energías de enlace. La diferencia entre estas energías se manifiesta como energía liberada o absorbida en el proceso.

Este principio es común tanto a la radiactividad como a la fisión y la fusión nuclear, que se estudiarán en epígrafes posteriores.

Importancia en la PAU

En la PAU, el defecto de masa y la energía de enlace aparecen de forma recurrente en preguntas teóricas y de razonamiento. Es habitual que se pida definir ambos conceptos, explicar su significado físico o relacionarlos con la estabilidad nuclear y la liberación de energía en los procesos nucleares.

Aunque los cálculos numéricos suelen ser sencillos, es fundamental comprender el sentido físico de las magnitudes implicadas y saber interpretar correctamente las expresiones matemáticas.

El defecto de masa y la energía de enlace ponen de manifiesto la profunda relación entre masa y energía en el interior del núcleo atómico. La transformación de masa en energía es la responsable de la estabilidad nuclear y del enorme poder energético de los procesos nucleares. El análisis de la energía de enlace por nucleón proporciona un criterio fundamental para comprender la estabilidad de los núcleos y constituye la base para el estudio de la radiactividad, la fisión y la fusión nuclear.

3. Radiactividad

La radiactividad es el fenómeno por el cual ciertos núcleos atómicos inestables se transforman espontáneamente en otros núcleos más estables mediante la emisión de radiación. Este proceso tiene lugar sin intervención externa y va acompañado de la liberación de energía. El estudio de la radiactividad permitió descubrir la estructura interna del núcleo

y puso de manifiesto que los núcleos pueden transformarse unos en otros, lo que supuso una ruptura profunda con la concepción clásica del átomo.

Desde el punto de vista de la PAU, la radiactividad es un contenido fundamental, tanto por su importancia conceptual como por la presencia habitual de reacciones nucleares, leyes de desintegración y cuestiones de interpretación física.

Núcleos radiactivos e inestabilidad nuclear

Un núcleo es radiactivo cuando la combinación de protones y neutrones que lo constituye no permite alcanzar una configuración estable. Esta inestabilidad puede deberse a un exceso de protones, a un exceso de neutrones o a un tamaño nuclear demasiado grande, que hace que la repulsión eléctrica entre protones no pueda ser compensada eficazmente por la fuerza nuclear.

Como consecuencia, el núcleo se transforma espontáneamente emitiendo radiación y dando lugar a otro núcleo diferente, denominado núcleo hijo.

Tipos de radiación nuclear

La radiactividad natural se manifiesta principalmente mediante tres tipos de radiación: alfa, beta y gamma. Cada una de ellas corresponde a un mecanismo físico distinto y produce transformaciones nucleares diferentes.

Desintegración alfa

La desintegración alfa consiste en la emisión de una partícula alfa por parte del núcleo. Una partícula alfa está formada por dos protones y dos neutrones, es decir, es un núcleo de helio:

$$^{4}_{2}\alpha$$

Cuando un núcleo emite una partícula alfa, su número másico disminuye en cuatro unidades y su número atómico disminuye en dos unidades. La reacción nuclear general se expresa como:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}X + ^{4}_{2}\alpha$$

Este tipo de desintegración es característico de núcleos pesados, en los que la emisión de una partícula alfa permite reducir la repulsión eléctrica interna y aumentar la estabilidad del núcleo resultante.

La radiación alfa tiene gran poder de ionización, pero escasa capacidad de penetración, ya que las partículas alfa son relativamente masivas y están cargadas positivamente.

Desintegración beta

La desintegración beta se produce cuando existe un desequilibrio entre protones y neutrones en el núcleo. Existen dos tipos fundamentales de desintegración beta, aunque en la PAU se trabaja principalmente con la desintegración beta negativa.

En la desintegración beta negativa, un neutrón del núcleo se transforma en un protón, emitiendo un electrón y un antineutrino. El número másico del núcleo permanece constante, pero el número atómico aumenta en una unidad. La reacción nuclear se expresa como:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}_{Z+1}{}^{A}Y + {}^{0}_{-1}e + \bar{\upsilon}$$

Este proceso permite reducir un exceso de neutrones y desplazar el núcleo hacia una región de mayor estabilidad.

La radiación beta tiene un poder de penetración mayor que la radiación alfa, pero menor que la radiación gamma.

Desintegración beta positiva

En la desintegración beta positiva, un protón se transforma en un neutrón, emitiendo un positrón y un neutrino. El número másico permanece constante y el número atómico disminuye en una unidad. La reacción se escribe como:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}_{Z-1}{}^{A}Y + {}^{0}_{+1}e + \upsilon$$

Este tipo de desintegración es menos frecuente en los núcleos naturales y suele darse en núcleos con exceso de protones.

Radiación gamma

La radiación gamma consiste en la emisión de un fotón de alta energía por parte del núcleo. A diferencia de las desintegraciones alfa y beta, la emisión gamma no modifica ni el número másico ni el número atómico del núcleo.

La reacción nuclear se expresa como:

$$^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma$$

La radiación gamma suele acompañar a una desintegración alfa o beta, cuando el núcleo hijo queda inicialmente en un estado excitado y se desexcita emitiendo radiación electromagnética de alta frecuencia.

La radiación gamma tiene un poder de penetración muy elevado y una gran capacidad para atravesar materiales.

Ley de conservación en las reacciones nucleares

En todas las reacciones nucleares se cumplen dos principios fundamentales que son esenciales en la PAU. El primero es la conservación del número másico, y el segundo es la

conservación del número atómico. Estas leyes permiten escribir y comprobar correctamente cualquier reacción nuclear.

Además, se conserva la energía total del sistema, aunque una parte de ella puede aparecer en forma de energía cinética de las partículas emitidas o de radiación electromagnética.

Serie radiactiva

En muchos casos, el núcleo hijo obtenido tras una desintegración sigue siendo inestable. Como consecuencia, se produce una sucesión de desintegraciones denominada serie radiactiva, que finaliza cuando se alcanza un núcleo estable.

Estas series explican la presencia de distintos núcleos radiactivos en la naturaleza y tienen especial importancia en el estudio de elementos pesados.

Actividad radiactiva

La actividad de una muestra radiactiva mide el número de desintegraciones nucleares que se producen por unidad de tiempo. Se representa por Ay viene dada por la expresión:

$$A = \lambda N$$

donde λ es la constante de desintegración y N es el número de núcleos radiactivos presentes.

La unidad de actividad en el Sistema Internacional es el becquerelio (Bq).

Importancia en la PAU

En la PAU, la radiactividad aparece de forma recurrente en: escritura e interpretación de reacciones alfa, beta y gamma, aplicación de las leyes de conservación, explicación conceptual de los distintos tipos de radiación,Nrelación entre estabilidad nuclear y desintegración.

Es fundamental saber escribir correctamente las reacciones nucleares y explicar el significado físico de cada proceso.

La radiactividad es un fenómeno nuclear espontáneo mediante el cual los núcleos inestables se transforman en otros más estables emitiendo radiación. El estudio de las desintegraciones alfa, beta y gamma permite comprender la estructura interna del núcleo y constituye una parte esencial de la Física nuclear evaluada en la PAU.

4. Ley de desintegración radiactiva

La ley de desintegración radiactiva describe matemáticamente cómo evoluciona en el tiempo una muestra de núcleos radiactivos. A diferencia de otros procesos físicos, la desintegración nuclear es un fenómeno espontáneo y aleatorio, imposible de predecir para un núcleo individual, pero que presenta un comportamiento estadístico muy regular cuando se

considera un gran número de núcleos. Esta ley constituye uno de los pilares de la Física nuclear y es un contenido clásico y recurrente en la PAU.

Desde el punto de vista físico, la ley de desintegración permite relacionar la inestabilidad nuclear con magnitudes medibles como la actividad de una muestra, el número de núcleos que permanecen sin desintegrar y el tiempo característico del proceso.

Carácter estadístico de la desintegración

Cada núcleo radiactivo tiene una cierta probabilidad de desintegrarse en un intervalo de tiempo determinado. Esta probabilidad es constante para un núcleo dado y no depende del tiempo que haya existido previamente. Como consecuencia, no es posible predecir cuándo se desintegrará un núcleo concreto, pero sí es posible describir el comportamiento medio de una gran población de núcleos idénticos.

Este carácter probabilístico es una manifestación directa de la Física cuántica aplicada al núcleo atómico.

Constante de desintegración

La probabilidad de desintegración se caracteriza mediante la constante de desintegración, representada por λ. Esta magnitud depende únicamente del tipo de núcleo y mide la probabilidad de que un núcleo se desintegre por unidad de tiempo.

Cuanto mayor es el valor de λ, más inestable es el núcleo y más rápidamente se produce la desintegración.

Ecuación diferencial de la desintegración

El número de núcleos radiactivos que se desintegran en un intervalo de tiempo es proporcional al número de núcleos presentes en ese instante. Esta afirmación se expresa mediante la ecuación diferencial:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

El signo negativo indica que el número de núcleos radiactivos disminuye con el tiempo.

Esta ecuación es fundamental en la descripción matemática de la radiactividad.

Ley exponencial de desintegración

La solución de la ecuación diferencial anterior conduce a la ley de desintegración radiactiva, que expresa el número de núcleos no desintegrados en función del tiempo:

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

donde N_0 es el número inicial de núcleos radiactivos en el instante $t = 0$.

Esta expresión muestra que el número de núcleos disminuye de forma exponencial con el tiempo, lo que implica que la desintegración nunca se completa totalmente, aunque el número de núcleos pueda llegar a ser prácticamente nulo.

Interpretación física de la ley

La ley exponencial indica que, en intervalos de tiempo iguales, se desintegra siempre la misma fracción de núcleos, no el mismo número absoluto. Este hecho explica por qué la desintegración es rápida al comienzo, cuando hay muchos núcleos disponibles, y se ralentiza progresivamente con el tiempo.

Esta propiedad es esencial para comprender conceptos como el periodo de semidesintegración y la vida media.

Actividad radiactiva

La actividad de una muestra mide el número de desintegraciones que se producen por unidad de tiempo. Se representa por Ay se define como:

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

Sustituyendo la ecuación de desintegración se obtiene:

$$\boxed{A = \lambda N}$$

Esta expresión muestra que la actividad es proporcional al número de núcleos radiactivos presentes en la muestra.

La unidad de actividad en el Sistema Internacional es el becquerelio (Bq), que corresponde a una desintegración por segundo.

Evolución temporal de la actividad

Dado que el número de núcleos disminuye con el tiempo, la actividad también disminuye siguiendo una ley exponencial:

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

donde A_0es la actividad inicial. Esta relación es muy utilizada en problemas teóricos y de interpretación en la PAU.

Periodo de semidesintegración

El periodo de semidesintegración, representado por $T_{1/2}$, es el tiempo necesario para que el número de núcleos radiactivos de una muestra se reduzca a la mitad de su valor inicial.

Imponiendo la condición $N = \frac{N_0}{2}$ en la ley de desintegración se obtiene la relación:

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

El periodo de semidesintegración es una magnitud característica de cada núcleo radiactivo y no depende de la cantidad inicial de sustancia.

Vida media

La vida media, representada por τ, es el tiempo medio que un núcleo permanece sin desintegrarse. Se relaciona con la constante de desintegración mediante la expresión:

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

La vida media proporciona una medida alternativa de la estabilidad nuclear y se utiliza en algunos contextos teóricos.

Relación entre vida media y periodo de semidesintegración

Ambas magnitudes están relacionadas entre sí por:

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

Esta relación es importante para interpretar correctamente los datos nucleares y aparece de forma habitual en la PAU.

Conservación de la energía en la desintegración

En los procesos de desintegración radiactiva se conserva la energía total. La energía liberada en la desintegración se reparte entre la energía cinética de las partículas emitidas, la energía de la radiación gamma y, en algunos casos, la energía asociada a partículas casi indetectables, como los neutrinos.

Este reparto energético explica por qué las partículas emitidas presentan espectros de energía característicos.

Importancia en la PAU

En la PAU, la ley de desintegración radiactiva aparece con frecuencia en: preguntas de desarrollo teórico, interpretación de la ley exponencial, relación entre actividad, número de núcleos y tiempo, significado físico del periodo de semidesintegración, comparación entre vida media y periodo de semidesintegración.

No se exige un tratamiento matemático avanzado, pero sí una comprensión clara del comportamiento exponencial.

La ley de desintegración radiactiva describe el comportamiento temporal de los núcleos inestables mediante una ley exponencial que refleja el carácter estadístico del proceso.

Las magnitudes asociadas, como la actividad, el periodo de semidesintegración y la vida media, permiten caracterizar la estabilidad nuclear y constituyen herramientas fundamentales en el estudio de la Física nuclear.

Capítulo 16. Fisión, fusión e interacciones fundamentales

1. Fisión nuclear

La fisión nuclear es un proceso en el que un núcleo atómico pesado se divide en dos núcleos de masa intermedia como consecuencia de la captura de un neutrón. Esta transformación va acompañada de la emisión de varios neutrones adicionales y de una liberación muy grande de energía. La fisión constituye uno de los fenómenos fundamentales de la Física nuclear y se comprende a partir de los conceptos de defecto de masa y energía de enlace por nucleón desarrollados en el capítulo anterior.

Desde el punto de vista energético, la fisión es posible porque los núcleos resultantes presentan una energía de enlace por nucleón mayor que la del núcleo inicial. Al producirse la transformación, el sistema pasa a una configuración más estable, liberándose energía como consecuencia de la transformación de una fracción de la masa en energía, de acuerdo con la relación fundamental:

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

Núcleos pesados y fisibilidad

La fisión no se produce en cualquier núcleo, sino fundamentalmente en núcleos muy pesados, en los que la repulsión eléctrica entre protones es considerable. En estos núcleos, la fuerza nuclear fuerte, de corto alcance, tiene dificultades para mantener la cohesión del sistema cuando el núcleo se deforma.

Al capturar un neutrón, el núcleo adquiere energía adicional y puede alcanzar un estado inestable en el que se rompe en dos fragmentos. Algunos isótopos presentan una mayor probabilidad de experimentar este proceso, siendo especialmente relevantes ciertos isótopos del uranio y del plutonio.

Reacción general de fisión inducida

La fisión inducida por un neutrón se representa mediante una reacción nuclear en la que se cumplen estrictamente las leyes de conservación del número másico y del número atómico. La forma general de la reacción es:

$$^{A}_{Z}X \;+\; ^{1}_{0}n \;\longrightarrow\; ^{A_1}_{Z_1}X \;+\; ^{A_2}_{Z_2}Y' \;+\; k\,^{1}_{0}n \;+\; E$$

donde el núcleo inicial $^{A}_{Z}X$ se divide en dos núcleos más ligeros $^{A_1}_{Z_1}X$, $^{A_2}_{Z_2}Y'$ y se emiten k neutrones y se libera una energía E.

Las condiciones de conservación son:

$$A + 1 = A_1 + A_2 + k$$
$$Z = Z_1 + Z_2$$

Estas igualdades deben cumplirse siempre y constituyen un criterio esencial para escribir correctamente las reacciones nucleares en la PAU.

Origen de la energía liberada

La energía liberada en la fisión tiene su origen en la diferencia entre la masa total de los reactivos y la masa total de los productos. Los fragmentos de fisión presentan una energía de enlace por nucleón mayor que la del núcleo inicial, lo que implica que el sistema final es más estable desde el punto de vista energético.

La diferencia de masa se transforma en energía según la expresión:

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

Esta energía se manifiesta principalmente como energía cinética de los fragmentos de fisión y de los neutrones emitidos, así como en forma de radiación electromagnética.

Emisión de neutrones y reacción en cadena

Un aspecto esencial de la fisión nuclear es la emisión de neutrones durante el proceso. Estos neutrones pueden ser capturados por otros núcleos fisibles, provocando nuevas fisiones. De este modo se puede establecer una reacción en cadena, en la que el número de reacciones aumenta progresivamente.

El comportamiento de la reacción en cadena depende del número medio de neutrones que consiguen producir nuevas fisiones. Si este número es inferior a la unidad, la reacción se extingue; si es igual a la unidad, la reacción se mantiene estable; y si es superior, la reacción crece rápidamente.

Neutrones rápidos y neutrones lentos

Los neutrones emitidos en la fisión son inicialmente neutrones rápidos, con alta energía cinética. Sin embargo, la probabilidad de que un neutrón provoque una nueva fisión depende de su energía. En muchos núcleos fisibles, como el uranio-235, la fisión es más probable cuando los neutrones tienen baja energía.

Por esta razón, es necesario reducir la velocidad de los neutrones mediante colisiones con núcleos ligeros, proceso que permite transformar neutrones rápidos en neutrones lentos, aumentando la probabilidad de nuevas fisiones.

Control de la fisión

Para que la fisión pueda utilizarse de forma controlada, es necesario regular el número de neutrones que producen nuevas fisiones. El control de la reacción en cadena se basa en la

absorción de parte de los neutrones emitidos, de modo que el sistema se mantenga en condiciones estables.

Desde el punto de vista físico, el control de la fisión consiste en ajustar el balance entre producción y absorción de neutrones.

Balance energético del proceso

El balance energético global de la fisión se obtiene comparando la energía total antes y después de la reacción. La energía liberada por cada fisión es muy grande en comparación con las reacciones químicas, lo que explica el enorme interés energético del proceso.

Esta energía procede exclusivamente de la transformación de masa en energía y no de enlaces químicos.

Productos de fisión y radiactividad

Los núcleos producidos en la fisión suelen ser núcleos inestables de masa intermedia. Estos núcleos pueden sufrir posteriormente desintegraciones radiactivas hasta alcanzar configuraciones más estables.

Este hecho explica la presencia de productos radiactivos asociados a los procesos de fisión nuclear y está directamente relacionado con el estudio de la radiactividad desarrollado en el capítulo anterior.

Importancia de la fisión en la Física nuclear

La fisión nuclear constituye una prueba experimental directa de la equivalencia entre masa y energía y muestra de forma clara cómo pequeñas variaciones de masa pueden dar lugar a enormes liberaciones de energía. Desde el punto de vista teórico, la fisión confirma la validez de los conceptos de energía de enlace y estabilidad nuclear.

En la PAU, la fisión nuclear se evalúa principalmente mediante preguntas de desarrollo conceptual en las que se pide describir el proceso, justificar el origen de la energía liberada y escribir correctamente las reacciones nucleares.

La fisión nuclear es un proceso en el que un núcleo pesado se divide en núcleos más ligeros tras capturar un neutrón, liberando una gran cantidad de energía como consecuencia del aumento de la energía de enlace por nucleón. La emisión de neutrones permite la aparición de reacciones en cadena, lo que hace posible su aplicación energética. El estudio de la fisión constituye una parte esencial de la Física nuclear y proporciona una comprensión profunda de la relación entre masa, energía y estabilidad nuclear.

2. Fusión nuclear

La fusión nuclear es un proceso en el que dos núcleos atómicos ligeros se unen para formar un núcleo más pesado, liberándose una gran cantidad de energía. Este proceso es responsable de la energía emitida por las estrellas y constituye uno de los fenómenos más

importantes de la Física nuclear y de la astrofísica. Al igual que en la fisión, la energía liberada en la fusión tiene su origen en la transformación de masa en energía, de acuerdo con la relación fundamental entre ambas magnitudes.

Desde el punto de vista energético, la fusión es posible porque los núcleos ligeros presentan una energía de enlace por nucleón menor que la de los núcleos de masa intermedia. Al fusionarse, el sistema resultante alcanza una configuración más estable, aumentando la energía de enlace por nucleón y liberándose la diferencia en forma de energía.

Fundamento energético de la fusión

El origen de la energía liberada en la fusión se comprende a partir de la curva de energía de enlace por nucleón. Para núcleos ligeros, la energía de enlace por nucleón aumenta al aumentar el número másico. Cuando dos núcleos ligeros se unen para formar uno más pesado, el núcleo final tiene una energía de enlace por nucleón mayor, lo que implica que el sistema es más estable desde el punto de vista energético.

La diferencia entre la masa total de los núcleos iniciales y la masa del núcleo final se transforma en energía según la expresión:

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

Esta relación es válida para cualquier proceso nuclear y explica la enorme cantidad de energía liberada en la fusión, muy superior a la de las reacciones químicas.

Reacciones de fusión nuclear

Las reacciones de fusión más relevantes a nivel de Bachillerato son aquellas que implican isótopos del hidrógeno. Estos núcleos tienen una carga eléctrica pequeña, lo que reduce la repulsión eléctrica entre ellos y facilita la aproximación necesaria para que actúe la fuerza nuclear fuerte.

Una reacción de fusión típica es la que se produce entre el deuterio y el tritio, que puede escribirse de la siguiente forma:

$$^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n + E$$

En esta reacción se conservan el número másico y el número atómico, y se libera una gran cantidad de energía debido al aumento de la energía de enlace del núcleo de helio formado.

Otra reacción de fusión relevante es la que tiene lugar entre dos núcleos de deuterio:

$$^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{1}_{0}n + E$$

Estas reacciones ilustran cómo núcleos ligeros pueden transformarse en núcleos más estables liberando energía.

Barreras a la fusión nuclear

A pesar de su gran interés energético, la fusión nuclear no se produce fácilmente. Los núcleos atómicos poseen carga eléctrica positiva y, por tanto, se repelen entre sí mediante la interacción electromagnética. Para que dos núcleos puedan fusionarse es necesario que se acerquen lo suficiente como para que la fuerza nuclear fuerte, de corto alcance, pueda actuar.

Esta dificultad se describe mediante la barrera coulombiana, que representa la energía mínima necesaria para vencer la repulsión eléctrica entre los núcleos. Solo cuando los núcleos poseen suficiente energía cinética pueden superar esta barrera y fusionarse.

Condiciones necesarias para la fusión

Para que la fusión nuclear tenga lugar de forma apreciable es necesario alcanzar temperaturas extremadamente elevadas, del orden de millones de grados. A estas temperaturas, la energía cinética media de los núcleos es suficiente para que una fracción de ellos supere la barrera coulombiana.

Además de la temperatura, influyen otros factores como la densidad del material y el tiempo durante el cual se mantienen las condiciones adecuadas. Estos requisitos hacen que la fusión sea un proceso difícil de controlar en laboratorio.

Fusión en el interior de las estrellas

En el interior de las estrellas se dan de forma natural las condiciones necesarias para la fusión nuclear. Las altísimas temperaturas y presiones existentes en su núcleo permiten que los núcleos de hidrógeno se fusionen, dando lugar a núcleos de helio y liberando energía de forma continua.

Este proceso es el responsable de la energía emitida por el Sol y por el resto de las estrellas. La energía liberada en las reacciones de fusión compensa la pérdida de energía por radiación y mantiene el equilibrio de la estrella durante gran parte de su vida.

Reacciones de fusión estelar

En las estrellas como el Sol, la fusión del hidrógeno en helio se produce a través de una serie de reacciones encadenadas. El resultado global del proceso puede resumirse de forma simplificada como:

$$4\ {}_{1}^{1}H \longrightarrow\ {}_{2}^{4}He + 2\ {}_{+1}^{0}e + 2\,\nu + E$$

En este proceso se conservan el número másico y el número atómico, y se libera una gran cantidad de energía que se manifiesta en forma de radiación electromagnética.

Comparación entre fisión y fusión

Tanto la fisión como la fusión nuclear son procesos en los que se libera energía debido al aumento de la energía de enlace por nucleón de los productos finales. Sin embargo,

presentan diferencias importantes. En la fisión se divide un núcleo pesado en núcleos más ligeros, mientras que en la fusión se unen núcleos ligeros para formar uno más pesado.

Desde el punto de vista energético, la fusión libera más energía por unidad de masa de combustible y produce menos residuos radiactivos de larga vida, lo que la convierte en un proceso especialmente atractivo desde el punto de vista teórico y tecnológico.

Dificultades técnicas de la fusión controlada

A pesar de sus ventajas, la fusión nuclear presenta grandes dificultades técnicas. Mantener un sistema a temperaturas extremadamente altas sin que entre en contacto con las paredes del recipiente es un desafío tecnológico considerable. Además, es necesario mantener las condiciones adecuadas durante un tiempo suficiente para que la energía liberada sea mayor que la energía suministrada al sistema.

Estas dificultades explican por qué, a pesar de décadas de investigación, la fusión controlada no se utiliza todavía de forma generalizada para la producción de energía eléctrica.

Importancia de la fusión en la Física nuclear

La fusión nuclear constituye una prueba clara de la relación entre masa y energía y del papel fundamental de la energía de enlace por nucleón en la estabilidad nuclear. Además, conecta la Física nuclear con la astrofísica y permite comprender el origen de la energía de las estrellas.

En la PAU, la fusión nuclear se evalúa principalmente desde un punto de vista conceptual. Es habitual que se pida explicar el proceso, escribir reacciones de fusión sencillas, justificar el origen de la energía liberada y comparar la fusión con la fisión.

La fusión nuclear es un proceso en el que núcleos ligeros se unen para formar núcleos más estables, liberando una gran cantidad de energía como consecuencia del aumento de la energía de enlace por nucleón. Este fenómeno es responsable de la energía de las estrellas y representa una de las aplicaciones más prometedoras de la Física nuclear. Su estudio permite comprender la estabilidad nuclear, la relación entre masa y energía y el funcionamiento energético del Universo.

3. Interacciones fundamentales

La Física moderna describe todos los fenómenos naturales conocidos mediante un conjunto reducido de interacciones fundamentales. Estas interacciones explican desde el movimiento de los cuerpos celestes hasta los procesos que tienen lugar en el interior del núcleo atómico. El estudio de las interacciones fundamentales permite unificar la descripción de la naturaleza y proporciona un marco coherente para comprender la diversidad de fenómenos físicos observados.

En el nivel de Bachillerato y en la PAU, el objetivo principal de este epígrafe es reconocer cuáles son las interacciones fundamentales, identificar su ámbito de actuación y

comprender su papel en los distintos fenómenos estudiados a lo largo del curso, especialmente en relación con la Física nuclear.

Concepto de interacción fundamental

Una interacción fundamental es un mecanismo básico mediante el cual las partículas se influyen mutuamente. Todas las fuerzas conocidas en la naturaleza pueden explicarse como manifestaciones de un número muy reducido de interacciones fundamentales. Estas interacciones actúan entre partículas elementales y se caracterizan por su intensidad, su alcance y las partículas sobre las que actúan.

Desde el punto de vista físico, las interacciones determinan la estructura de la materia y el comportamiento dinámico de los sistemas, tanto a escala macroscópica como microscópica.

Interacción gravitatoria

La interacción gravitatoria actúa entre todas las partículas que poseen masa. Es siempre atractiva y su intensidad viene dada por la ley de gravitación universal:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

donde m_1 y m_2 son las masas de los cuerpos, r es la distancia que los separa y G es la constante de gravitación universal.

La interacción gravitatoria tiene alcance infinito, aunque su intensidad es muy débil a escala microscópica. Por esta razón, no desempeña un papel significativo en los procesos nucleares o atómicos, pero domina completamente el comportamiento de los sistemas astronómicos, como planetas, estrellas y galaxias.

Interacción electromagnética

La interacción electromagnética actúa entre partículas que poseen carga eléctrica. Puede ser atractiva o repulsiva, dependiendo del signo de las cargas, y su expresión básica es la ley de Coulomb:

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Esta interacción tiene también alcance infinito y es mucho más intensa que la gravitatoria. Es responsable de los fenómenos eléctricos y magnéticos, de la estructura de los átomos y de los enlaces químicos entre átomos.

En el contexto de la Física nuclear, la interacción electromagnética es la responsable de la repulsión eléctrica entre protones dentro del núcleo, repulsión que debe ser compensada por otra interacción más intensa para que el núcleo sea estable.

Interacción nuclear fuerte

La interacción nuclear fuerte es la interacción responsable de la cohesión del núcleo atómico. Actúa entre nucleones y es extremadamente intensa, mucho más que la interacción electromagnética, pero tiene un alcance muy corto, del orden del tamaño del núcleo.

Gracias a la interacción nuclear fuerte, los protones y neutrones pueden permanecer unidos en el núcleo a pesar de la intensa repulsión eléctrica entre protones. Esta interacción es esencial para la existencia de los núcleos atómicos y, por tanto, de la materia tal como la conocemos.

Desde el punto de vista energético, la interacción nuclear fuerte es la responsable del defecto de masa y de la energía de enlace nuclear estudiados en el capítulo anterior.

Interacción nuclear débil

La interacción nuclear débil es responsable de ciertos procesos de transformación de partículas, especialmente de los procesos de desintegración beta. Su intensidad es menor que la de la interacción nuclear fuerte y la electromagnética, pero mayor que la gravitatoria.

Esta interacción tiene un alcance extremadamente corto y actúa a nivel subatómico. En la desintegración beta, la interacción débil permite la transformación de un neutrón en un protón o viceversa, acompañada de la emisión de electrones, positrones y neutrinos.

La interacción nuclear débil desempeña un papel fundamental en la radiactividad natural y en los procesos nucleares que modifican la composición de los núcleos.

Comparación cualitativa de las interacciones

Cada una de las interacciones fundamentales presenta características propias que determinan su ámbito de actuación. La gravedad domina a gran escala debido a su alcance infinito, a pesar de su debilidad. La interacción electromagnética gobierna los fenómenos atómicos y moleculares. La interacción nuclear fuerte asegura la estabilidad del núcleo, y la interacción nuclear débil permite las transformaciones nucleares que conducen a la radiactividad.

La combinación de estas interacciones explica la estructura jerárquica de la materia, desde las partículas elementales hasta los sistemas astronómicos.

Interacciones y estabilidad de la materia

La estabilidad de la materia es el resultado del equilibrio entre distintas interacciones. En el núcleo atómico, la interacción nuclear fuerte debe compensar la repulsión electromagnética entre protones. En los átomos, la interacción electromagnética mantiene a los electrones ligados al núcleo. A gran escala, la gravedad gobierna la organización del Universo.

Este equilibrio entre interacciones explica por qué la materia adopta las formas y estructuras que observamos.

Unificación de las interacciones

Uno de los objetivos de la Física moderna es la unificación de las interacciones fundamentales. Se ha logrado unificar la interacción electromagnética y la interacción nuclear débil en una descripción común conocida como interacción electrodébil. Sin embargo, la interacción nuclear fuerte y la gravitatoria todavía se describen mediante teorías independientes.

Aunque estos aspectos exceden el nivel de Bachillerato, es importante reconocer que la búsqueda de una teoría unificada constituye una de las líneas principales de investigación en Física.

Importancia en la PAU

En la PAU, este epígrafe aparece principalmente en preguntas de desarrollo conceptual. Se puede pedir identificar las interacciones fundamentales, describir sus características generales o relacionarlas con fenómenos físicos concretos, como la estabilidad del núcleo, la radiactividad o el movimiento de los cuerpos celestes.

No se requiere un tratamiento matemático avanzado, pero sí una comprensión clara del papel físico de cada interacción.

Las interacciones fundamentales constituyen la base de la descripción física del Universo. La gravedad, la interacción electromagnética, la interacción nuclear fuerte y la interacción nuclear débil explican, en conjunto, todos los fenómenos estudiados en la Física de Bachillerato, desde el movimiento de los planetas hasta los procesos nucleares. Con el estudio de estas interacciones se completa el recorrido por la Física moderna y se cierra el desarrollo del manual.

FORMULARIO RESUMEN AMPLIADO

BLOQUE A · CAMPO GRAVITATORIO

Capítulo 1. Interacción gravitatoria y campo gravitatorio.

Ley de Gravitación Universal (forma vectorial).

$$\mathbf{F} = -\,G\,\frac{m_1 m_2}{r^2}\,\hat{\mathbf{r}}$$

Módulo de la fuerza gravitatoria.

$$F = G\,\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Intensidad de campo gravitatorio.

$$\mathbf{g} = \frac{\mathbf{F}}{m}$$

Campo gravitatorio creado por una masa puntual.

$$\mathbf{g} = -\,G\,\frac{M}{r^2}\,\hat{\mathbf{r}}$$

Relación fuerza–campo gravitatorio.

$$\mathbf{F} = m\,\mathbf{g}$$

Principio de superposición del campo gravitatorio.

$$\mathbf{g}_{\text{total}} = \sum_i \mathbf{g}_i$$

Capítulo 2. Energía potencial gravitatoria.

Energía potencial gravitatoria.

$$E_p = -\,G\,\frac{Mm}{r}$$

Trabajo de la fuerza gravitatoria.

$$W = -\,\Delta E_p$$

Energía cinética.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Energía mecánica.

$$E_m = E_c + E_p$$

Teorema de conservación de la energía mecánica.

$$E_{m,i} = E_{m,f}$$

Trabajo de fuerzas no conservativas.

$$\Delta E_m = W_{\text{nc}}$$

Teorema de las fuerzas vivas.

$$\Delta E_c = W_{\text{total}}$$

Capítulo 3. Movimiento orbital.

Fuerza gravitatoria como fuerza centrípeta..

$$G\,\frac{Mm}{r^2} = m\,\frac{v^2}{r}$$

Velocidad orbital.

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Periodo orbital.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM}}$$

Velocidad angular orbital.

$$\omega = \sqrt{\frac{GM}{r^3}}$$

Velocidad de escape.

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

Momento lineal.

$$\mathbf{p} = m\,\mathbf{v}$$

Momento angular.

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$$

Conservación del momento angular.

$$\mathbf{L} = \text{cte}$$

Segunda ley de Kepler.

$$\frac{dA}{dt} = \text{cte}$$

Tercera ley de Kepler.

$$\frac{T^2}{r^3} = \text{cte}$$

Energía mecánica orbital.

$$E_m = -\frac{GMm}{2r}$$

Energía cinética orbital.

$$E_c = \frac{GMm}{2r}$$

Energía potencial orbital.

$$E_p = -\frac{GMm}{r}$$

BLOQUE B · CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

Capítulo 4. Campo eléctrico.

Ley de Coulomb (forma vectorial).

$$\mathbf{F} = k\,\frac{q_1 q_2}{r^2}\,\hat{\mathbf{r}}$$

Módulo de la fuerza eléctrica.

$$F = k\,\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Campo eléctrico.

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}$$

Campo eléctrico creado por una carga puntual.

$$\mathbf{E} = k\,\frac{Q}{r^2}\,\hat{\mathbf{r}}$$

Relación fuerza–campo eléctrico.

$$\mathbf{F} = q\,\mathbf{E}$$

Principio de superposición del campo eléctrico.

$$\mathbf{E}_{\text{total}} = \sum_i \mathbf{E}_i$$

Energía potencial eléctrica.

$$E_p = k\,\frac{Qq}{r}$$

Potencial eléctrico.

$$V = \frac{E_p}{q}$$

Potencial eléctrico creado por una carga puntual.

$$V = k\,\frac{Q}{r}$$

Relación campo–potencial eléctrico (1D).

$$E = -\,\frac{\Delta V}{\Delta x}$$

Trabajo del campo eléctrico.

$$W = -\,\Delta E_p$$

Capítulo 5. Movimiento de cargas en campos.

Energía cinética.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Trabajo del campo eléctrico sobre una carga.

$$W = q\,\Delta V$$

Conservación de la energía mecánica.

$$\Delta E_c = -\,\Delta E_p$$

Fuerza magnética sobre una carga en movimiento.

$$\mathbf{F}_m = q\,\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Módulo de la fuerza magnética.

$$F_m = qvB\sin\,\theta$$

Movimiento circular uniforme en campo magnético.

$$qvB = m\,\frac{v^2}{r}$$

Radio de la trayectoria.

$$r = \frac{mv}{qB}$$

Periodo del movimiento circular.

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

Fuerza de Lorentz.

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Capítulo 6. Campo magnético creado por corrientes.

Campo magnético creado por una corriente rectilínea.

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}\,\widehat{\boldsymbol{\varphi}}$$

Fuerza sobre un conductor rectilíneo en un campo magnético.

$$\mathbf{F} = I\,\mathbf{l} \times \mathbf{B}$$

Módulo de la fuerza sobre un conductor.

$$F = IlB\sin\,\theta$$

Fuerza entre dos conductores rectilíneos paralelos.

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}$$

Principio de superposición del campo magnético.

$$\mathbf{B}_{\text{total}} = \sum_i \mathbf{B}_i$$

Capítulo 7. Inducción electromagnética.

Flujo magnético.

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}$$

Ley de Faraday–Henry.

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Ley de Lenz.

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

FEM inducida media.

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

FEM inducida en una espira.

$$\varepsilon = -\frac{\Delta(BS\cos\,\theta)}{\Delta t}$$

BLOQUE C · VIBRACIONES, ONDAS Y ÓPTICA

Capítulo 8. Movimiento armónico simple.

Ecuación del movimiento armónico simple.

$$x(t) = A\cos\,(\omega t + \varphi)$$

Velocidad en el movimiento armónico simple.

$$v(t) = -A\omega\sin\,(\omega t + \varphi)$$

Aceleración en el movimiento armónico simple.

$$a(t) = -\omega^2 x$$

Relación fuerza–elongación.

$$F = -kx$$

Pulsación del movimiento armónico simple.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Periodo del movimiento armónico simple.

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Frecuencia del movimiento armónico simple.

$$f = \frac{1}{T}$$

Energía cinética en el movimiento armónico simple.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Energía potencial elástica.

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2$$

Energía mecánica del oscilador armónico.

$$E_m = \frac{1}{2}kA^2$$

Capítulo 9. Ondas mecánicas.

Ecuación de onda armónica.

$$y(x,t) = A\cos\left(kx - \omega t + \varphi\right)$$

Número de onda.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Relación fundamental de las ondas.

$$v = \lambda f$$

Velocidad de propagación de una onda.

$$v = \frac{\omega}{k}$$

Periodo de una onda.

$$T = \frac{1}{f}$$

Capítulo 10. Fenómenos ondulatorios.

Principio de superposición.

$$y = y_1 + y_2$$

Condición de interferencia constructiva.

$$\Delta r = n\lambda$$

Condición de interferencia destructiva.

$$\Delta r = \left(n+\frac{1}{2}\right)\lambda$$

Ecuación de onda estacionaria.

$$y(x,t) = 2A\sin(kx)\cos(\omega t)$$

Longitudes de onda en extremos fijos.

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}$$

Frecuencias propias en extremos fijos.

$$f_n = \frac{nv}{2L}$$

Posición de los nodos.

$$x_n = \frac{n\lambda}{2}$$

Posición de los vientres.

$$x_v = \frac{(2n+1)\lambda}{4}$$

Capítulo 11. Ondas electromagnéticas.

Relación entre campo eléctrico y campo magnético.

$$E = cB$$

Velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas..

$$c = \lambda f$$

Índice de refracción.

$$n = \frac{c}{v}$$

Capítulo 12. Óptica geométrica.

Ley de la reflexión.

$$\theta_i = \theta_r$$

Ley de Snell.

$$n_1 \sin\ \theta_1 = n_2 \sin\ \theta_2$$

Ecuación de los espejos esféricos.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

Aumento lateral.

$$M = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

Ecuación de las lentes delgadas.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

BLOQUE D · FÍSICA CUÁNTICA Y NUCLEAR

Capítulo 13. Origen de la Física Cuántica.

Constante de Planck

$$h = 6{,}63 \times 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s}$$

Energía de un fotón.

$$E = h\nu$$
$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Relación entre energía, frecuencia y longitud de onda de la radiación electromagnética.

Efecto fotoeléctrico – ecuación fundamental.

$$h\nu = W_0 + E_{c,\text{máx}}$$

Energía cinética máxima del electrón.

$$E_{c,\text{máx}} = \frac{1}{2}mv^2$$

Frecuencia umbral.

$$\nu_0 = \frac{W_0}{h}$$

Condición de emisión.

$$\nu \geq \nu_0$$

Longitud de onda umbral.

$$\lambda_0 = \frac{hc}{W_0}$$

Capítulo 14. Principios cuánticos.

Dualidad onda–corpúsculo (de Broglie).

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Cantidad de movimiento.

$$p = mv$$

(válido en régimen no relativista)

Principio de incertidumbre (posición–cantidad de movimiento).

$$\Delta x \, \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

Principio de incertidumbre (energía–tiempo).

$$\Delta E \, \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

Capítulo 15. Física nuclear.

Número másico.

$$A = Z + N$$

Radio nuclear.

$$R = R_0 A^{1/3} (R_0 \approx 1{,}2 \times 10^{-15} \text{ m})$$

Defecto de masa.

$$\Delta m = Z m_p + N m_n - m_{\text{núcleo}}$$

Equivalencia masa–energía.

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

Conversión masa–energía.

$$1\ \text{u} = 931{,}5\ \text{MeV}/c^2$$

Energía de enlace nuclear.

$$E_{\text{enlace}} = \Delta m c^2$$

Energía de enlace por nucleón.

$$\frac{E_{\text{enlace}}}{A}$$

Radiactividad.

Ley de desintegración radiactiva.

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

Actividad.

$$A = \lambda N$$

Actividad inicial.

$$A_0 = \lambda N_0$$

Evolución temporal de la actividad.

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

Periodo de semidesintegración.

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

Vida media.

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

Relación vida media – semiperiodo.

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

Reacciones radiactivas.

Alfa.

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X + {}^{4}_{2}\alpha$$

Beta negativa.

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}_{Z+1}{}^{A}Y + {}_{-1}{}^{0}e + \bar{\upsilon} $$

Beta positiva.

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}_{Z-1}{}^{A}Y + {}_{+1}{}^{0}e + \upsilon $$

Gamma.

$$ {}^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + Y $$

Capítulo 16. Fisión y fusión nuclear.

Fusión nuclear (general)

$$ {}^{A}_{Z}X \; + \; {}^{1}_{0}n \; \longrightarrow \; {}^{A_1}_{Z_1}X \; + \; {}^{A_2}_{Z_2}Y' \; + \; k\,{}^{1}_{0}n \; + \; E $$

Balance masa–energía.

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

Fusión nuclear (deuterio–tritio).

$$ {}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \; \longrightarrow \; {}^{4}_{2}He \; + \; {}^{1}_{0}n \; + \; E $$

Fusión nuclear (deuterio–deuterio).

$$ {}^{2}_{1}H \; + \; {}^{2}_{1}H \; \longrightarrow \; {}^{3}_{2}He \; + \; {}^{1}_{0}n \; + \; E $$

Fusión estelar (resultado global).

$$ 4 \; {}^{1}_{1}H \; \longrightarrow \; {}^{4}_{2}He + 2 \; {}_{+1}{}^{0}e \; + \; 2\,\nu \; + \; E $$

Interacciones fundamentales.

(No hay fórmulas exigibles, pero sí reconocimiento conceptual)

Gravitatoria

Electromagnética

Nuclear fuerte

Nuclear débil

IDEAS CLAVE Y ERRORES QUE SE COMETEN EN LA PAU

Capítulo 1. Interacción gravitatoria y campo gravitatorio.

IDEAS CLAVE

- ☑ La interacción gravitatoria es una interacción fundamental de la naturaleza que actúa entre todos los cuerpos que poseen masa.
- ☑ La interacción gravitatoria es siempre atractiva y nunca puede ser repulsiva.
- ☑ La ley de gravitación universal establece que dos masas puntuales se atraen con una fuerza directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.
- ☑ La constante de gravitación universal tiene el mismo valor en todo el Universo y es independiente del tipo de masas que interactúan.
- ☑ La fuerza gravitatoria es una magnitud vectorial, definida por su módulo, dirección y sentido.
- ☑ La dirección de la fuerza gravitatoria coincide con la recta que une los centros de las masas que interactúan.
- ☑ El sentido de la fuerza gravitatoria es siempre atractivo, dirigido hacia la otra masa.
- ☑ La expresión vectorial de la fuerza gravitatoria incluye un signo negativo que indica su carácter atractivo y el uso del versor radial $\hat{\mathbf{r}}$.
- ☑ La fuerza gravitatoria cumple el principio de acción y reacción: las fuerzas entre dos masas tienen igual módulo y sentidos opuestos.
- ☑ La ley de gravitación universal es válida para masas puntuales y para cuerpos esféricos con distribución simétrica de masa.
- ☑ El campo gravitatorio permite describir la interacción gravitatoria como una propiedad del espacio asociada a la presencia de masa.El campo gravitatorio existe independientemente de que haya o no una masa de prueba en el punto considerado.
- ☑ La intensidad de campo gravitatorio se define como la fuerza gravitatoria por unidad de masa de prueba.
- ☑ La intensidad de campo gravitatorio es una magnitud vectorial y se representa mediante el vector $\mathbf{g}$.

- ☑ El campo gravitatorio creado por una masa puntual es radial y apunta hacia la masa que lo genera.
- ☑ La intensidad del campo gravitatorio depende de la masa que lo genera y de la distancia al punto considerado, pero no depende de la masa de prueba.
- ☑ Las unidades del campo gravitatorio pueden expresarse como $N \cdot kg^{-1}$ o como $m \cdot s^{-2}$.
- ☑ El peso de un cuerpo es la fuerza gravitatoria que actúa sobre él debido al campo gravitatorio terrestre y se expresa como $\mathbf{P} = \mathbf{mg}$.
- ☑ La masa es una propiedad intrínseca del cuerpo, mientras que el peso depende del campo gravitatorio en el que se encuentra.
- ☑ El principio de superposición establece que el campo gravitatorio total creado por varias masas es la suma vectorial de los campos creados por cada masa por separado.
- ☑ El principio de superposición se aplica tanto a fuerzas gravitatorias como a campos gravitatorios.
- ☑ La suma de campos gravitatorios debe realizarse siempre de forma vectorial, teniendo en cuenta direcciones y sentidos.
- ☑ El principio de superposición permite analizar sistemas gravitatorios formados por varias masas de manera sistemática.

ERRORES FRECUENTES

- ☒ Confundir fuerza gravitatoria con campo gravitatorio y utilizarlos indistintamente.
- ☒ Pensar que el campo gravitatorio depende de la masa de prueba utilizada para medirlo.
- ☒ Olvidar que la fuerza gravitatoria es siempre atractiva.
- ☒ No indicar correctamente la dirección y el sentido de la fuerza gravitatoria.
- ☒ Omitir el signo negativo en la expresión vectorial de la fuerza gravitatoria.
- ☒ Confundir el versor $\hat{\mathbf{r}}$ con el vector posición $\mathbf{r}$.
- ☒ Utilizar incorrectamente el centro de referencia al aplicar la ley de gravitación universal.
- ☒ Aplicar la ley de gravitación universal a cuerpos extensos sin justificar el modelo de masa puntual o esférica.
- ☒ Creer que el peso es una propiedad intrínseca del cuerpo y no una fuerza debida al campo gravitatorio.
- ☒ Confundir masa y peso en el planteamiento de problemas.

☒ No realizar la suma vectorial correcta al aplicar el principio de superposición.

☒ Sumar módulos de campos gravitatorios cuando las direcciones no coinciden.

☒ Olvidar que el campo gravitatorio existe, aunque no haya ninguna masa situada en el punto considerado.

☒ Identificar incorrectamente la dirección del campo gravitatorio en esquemas y dibujos.

☒ Interpretar el valor de **g** como una aceleración en situaciones donde actúan otras fuerzas además de la gravedad.

☒ Aplicar expresiones escalares cuando el problema exige un tratamiento vectorial.

☒ No justificar adecuadamente el uso del principio de superposición en problemas con varias masas.

Capítulo 2. Energía potencial gravitatoria.

IDEAS CLAVE

☑ La fuerza gravitatoria es una fuerza conservativa.

☑ El trabajo de la fuerza gravitatoria no depende de la trayectoria seguida entre dos puntos, sino solo de las posiciones inicial y final.

☑ La existencia de una energía potencial gravitatoria está asociada al carácter conservativo de la fuerza gravitatoria.

☑ La energía potencial gravitatoria se define tomando como referencia el infinito, donde su valor se considera nulo.

☑ La energía potencial gravitatoria asociada a una masa en el campo gravitatorio de otra masa es negativa.

☑ El valor negativo de la energía potencial gravitatoria indica que el sistema está ligado gravitatoriamente.

☑ El trabajo de la fuerza gravitatoria es igual al opuesto de la variación de la energía potencial gravitatoria.

☑ El trabajo realizado por la fuerza gravitatoria es positivo cuando el cuerpo se acerca a la masa que genera el campo.

☑ El trabajo realizado por la fuerza gravitatoria es negativo cuando el cuerpo se aleja de la masa que genera el campo.

☑ La energía cinética es la energía asociada al movimiento de un cuerpo.

- ☑ La energía mecánica se define como la suma de la energía cinética y la energía potencial gravitatoria.
- ☑ La energía mecánica de un sistema se conserva cuando solo actúan fuerzas conservativas.
- ☑ La conservación de la energía mecánica permite relacionar posiciones y velocidades sin necesidad de estudiar el movimiento completo.
- ☑ Cuando actúan fuerzas no conservativas, la energía mecánica del sistema no se conserva.
- ☑ La variación de la energía mecánica es igual al trabajo realizado por las fuerzas no conservativas.
- ☑ Las fuerzas de rozamiento son fuerzas no conservativas.
- ☑ El trabajo de las fuerzas de rozamiento es siempre negativo, ya que disipan energía mecánica.
- ☑ El teorema de las fuerzas vivas establece que la variación de la energía cinética es igual al trabajo total realizado sobre el cuerpo.
- ☑ El teorema de las fuerzas vivas es válido tanto si actúan fuerzas conservativas como no conservativas.
- ☑ La formulación energética del movimiento es especialmente útil en problemas de gravitación.
- ☑ El estudio energético permite analizar el movimiento sin necesidad de conocer el tiempo empleado.
- ☑ La energía mecánica total de un sistema gravitatorio aislado permanece constante.

ERRORES FRECUENTES

- ☒ Confundir el signo de la energía potencial gravitatoria.
- ☒ Olvidar que el cero de energía potencial gravitatoria se toma en el infinito.
- ☒ Pensar que la energía potencial gravitatoria puede ser positiva en el campo gravitatorio newtoniano.
- ☒ Confundir trabajo realizado por la fuerza gravitatoria con variación de energía potencial.
- ☒ No cambiar el signo correctamente al relacionar trabajo y variación de energía potencial.

☒ Aplicar el principio de conservación de la energía mecánica cuando existen fuerzas no conservativas sin tenerlas en cuenta.

☒ Olvidar incluir el trabajo de fuerzas exteriores aplicadas como fuerzas no conservativas.

☒ Confundir el teorema de las fuerzas vivas con la conservación de la energía mecánica.

☒ Usar el teorema de las fuerzas vivas solo para fuerzas conservativas.

☒ No identificar correctamente qué fuerzas realizan trabajo sobre el sistema.

☒ Considerar que el rozamiento puede aumentar la energía mecánica del sistema.

☒ Olvidar que el trabajo del rozamiento siempre reduce la energía mecánica.

☒ Mezclar expresiones de energía potencial gravitatoria con expresiones de campo gravitatorio.

☒ No justificar el uso de la formulación energética cuando se solicita explícitamente.

☒ Plantear balances energéticos incompletos, omitiendo alguna forma de energía.

☒ No expresar claramente los estados inicial y final en problemas energéticos.

☒ Confundir energía mecánica con energía cinética.

☒ No distinguir entre sistema aislado y sistema no aislado.

Capítulo 3. Movimiento orbital.

IDEAS CLAVE

☑ El movimiento orbital es consecuencia directa de la interacción gravitatoria entre dos cuerpos.

☑ En un movimiento orbital circular, la fuerza gravitatoria actúa como fuerza centrípeta.

☑ La fuerza centrípeta es una fuerza dirigida hacia el centro de la trayectoria circular.

☑ En el movimiento orbital circular uniforme, el módulo de la velocidad permanece constante, pero su dirección cambia continuamente.

☑ La velocidad orbital depende únicamente de la masa del cuerpo central y del radio de la órbita.

☑ La masa del cuerpo que describe la órbita no influye en el valor de la velocidad orbital.

☑ La expresión de la velocidad orbital se obtiene igualando la fuerza gravitatoria con la fuerza centrípeta.

- ☑ El periodo orbital depende del radio de la órbita y de la masa del cuerpo central.
- ☑ El periodo orbital aumenta al aumentar el radio de la órbita.
- ☑ La tercera ley de Kepler establece una relación entre el cuadrado del periodo orbital y el cubo del radio de la órbita.
- ☑ La tercera ley de Kepler es válida para cuerpos que orbitan alrededor de la misma masa central.
- ☑ La velocidad de escape es la velocidad mínima que debe tener un cuerpo para abandonar definitivamente el campo gravitatorio.
- ☑ La velocidad de escape no depende de la masa del cuerpo que escapa.
- ☑ Un cuerpo con velocidad inferior a la velocidad de escape permanece ligado gravitatoriamente.
- ☑ La energía mecánica de un cuerpo en órbita circular es negativa.
- ☑ Una energía mecánica negativa indica que el sistema está ligado gravitatoriamente.
- ☑ La energía mecánica orbital es constante en ausencia de fuerzas no conservativas.
- ☑ La energía potencial gravitatoria en una órbita circular es el doble, en valor absoluto, de la energía cinética.
- ☑ La conservación del momento angular es una consecuencia de que la fuerza gravitatoria es una fuerza central.
- ☑ El momento angular se conserva cuando el momento de las fuerzas externas es nulo.
- ☑ La segunda ley de Kepler establece que el radio vector barre áreas iguales en tiempos iguales.
- ☑ La segunda ley de Kepler es consecuencia directa de la conservación del momento angular.
- ☑ Las leyes de Kepler describen el movimiento de los planetas, pero son válidas para cualquier sistema gravitatorio análogo.

ERRORES FRECUENTES

- ☒ Confundir fuerza centrípeta con una fuerza adicional distinta de la gravitatoria.
- ☒ Pensar que en el movimiento orbital no actúa ninguna fuerza.
- ☒ Creer que la velocidad orbital depende de la masa del cuerpo que orbita.

☒ Aplicar incorrectamente la expresión de la velocidad orbital sin justificar el modelo de órbita circular.

☒ Confundir velocidad orbital con velocidad de escape.

☒ Pensar que un cuerpo con velocidad igual a la velocidad de escape sigue describiendo una órbita circular.

☒ No reconocer el significado físico de una energía mecánica negativa.

☒ Confundir energía mecánica negativa con energía cinética negativa.

☒ Olvidar que la energía mecánica se conserva solo si no actúan fuerzas no conservativas.

☒ No identificar correctamente la fuerza responsable del movimiento orbital.

☒ Aplicar la tercera ley de Kepler a sistemas que no orbitan alrededor de la misma masa central.

☒ No indicar correctamente las magnitudes que intervienen en la tercera ley de Kepler.

☒ Confundir periodo orbital con frecuencia orbital.

☒ No relacionar la segunda ley de Kepler con la conservación del momento angular.

☒ Pensar que el momento angular solo se conserva en movimientos circulares.

☒ Olvidar que la fuerza gravitatoria es una fuerza central.

☒ No justificar el carácter centrípeto de la fuerza gravitatoria.

☒ Mezclar expresiones energéticas con expresiones dinámicas sin coherencia.

☒ No expresar correctamente las condiciones iniciales en problemas de movimiento orbital.

Capítulo 4. Campo eléctrico.

IDEAS CLAVE

☑ La interacción eléctrica es una interacción fundamental que actúa entre cuerpos que poseen carga eléctrica.

☑ La interacción eléctrica puede ser atractiva o repulsiva, a diferencia de la interacción gravitatoria.

☑ La ley de Coulomb describe la fuerza eléctrica entre cargas puntuales en reposo.

☑ La fuerza eléctrica es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

- ☑ La fuerza eléctrica es una magnitud vectorial definida por módulo, dirección y sentido.
- ☑ La dirección de la fuerza eléctrica coincide con la recta que une las cargas.
- ☑ El sentido de la fuerza eléctrica depende del signo de las cargas que interactúan.
- ☑ La ley de Coulomb es válida para cargas puntuales o distribuciones esféricas de carga.
- ☑ El campo eléctrico permite describir la interacción eléctrica como una propiedad del espacio asociada a la presencia de cargas.
- ☑ El campo eléctrico se define como la fuerza eléctrica por unidad de carga positiva de prueba.
- ☑ El campo eléctrico es una magnitud vectorial y se representa mediante el vector **E**.
- ☑ El campo eléctrico existe independientemente de que haya o no una carga de prueba en el punto considerado.
- ☑ El campo eléctrico creado por una carga puntual es radial.
- ☑ Las líneas de campo eléctrico salen de las cargas positivas y entran en las cargas negativas.
- ☑ La densidad de líneas de campo es proporcional a la intensidad del campo eléctrico.
- ☑ El principio de superposición es aplicable al campo eléctrico.
- ☑ El campo eléctrico total creado por varias cargas es la suma vectorial de los campos creados por cada carga.
- ☑ La fuerza eléctrica que actúa sobre una carga se obtiene multiplicando la carga por el campo eléctrico existente.
- ☑ El campo eléctrico es una herramienta fundamental para el estudio de sistemas con múltiples cargas.

ERRORES FRECUENTES

- ☒ Confundir fuerza eléctrica con campo eléctrico y utilizarlos indistintamente.
- ☒ Pensar que el campo eléctrico depende del valor de la carga de prueba.
- ☒ No indicar correctamente el signo de la carga al calcular la fuerza eléctrica.
- ☒ Confundir la dirección del campo eléctrico con el sentido de la fuerza sobre una carga negativa.
- ☒ Olvidar que el campo eléctrico es una magnitud vectorial.
- ☒ Sumar módulos de campos eléctricos sin tener en cuenta sus direcciones.

☒ Aplicar la ley de Coulomb a cargas que no pueden considerarse puntuales sin justificarlo.

☒ Confundir líneas de campo con trayectorias reales de partículas cargadas.

☒ Creer que el campo eléctrico solo existe si hay una carga en movimiento.

☒ No diferenciar entre campo eléctrico y potencial eléctrico.

☒ Olvidar que el principio de superposición se aplica de forma vectorial.

☒ Usar expresiones escalares cuando el problema requiere un tratamiento vectorial.

☒ No especificar correctamente la dirección y el sentido del campo eléctrico en esquemas.

☒ Confundir el papel del medio en la interacción eléctrica.

☒ Pensar que el campo eléctrico creado por una carga positiva apunta hacia la carga.

☒ No justificar adecuadamente el uso del campo eléctrico en lugar de la fuerza eléctrica.

Capítulo 5. Movimiento de cargas en campos.

IDEAS CLAVE

☑ El movimiento de una carga eléctrica puede analizarse mediante consideraciones energéticas y dinámicas.

☑ En un campo eléctrico, una carga experimenta una fuerza proporcional al valor de la carga y al campo existente.

☑ El campo eléctrico puede realizar trabajo sobre una carga eléctrica.

☑ El trabajo del campo eléctrico produce variaciones en la energía cinética de la carga.

☑ En un campo eléctrico uniforme, la fuerza que actúa sobre la carga es constante.

☑ El movimiento de una carga en un campo eléctrico uniforme puede ser rectilíneo uniformemente acelerado o parabólico, según la velocidad inicial.

☑ La energía potencial eléctrica disminuye cuando una carga positiva se mueve en el sentido del campo eléctrico.

☑ El balance energético permite relacionar variaciones de energía cinética con diferencias de potencial eléctrico.

☑ El campo magnético actúa únicamente sobre cargas eléctricas en movimiento.

- ☑ La fuerza magnética que actúa sobre una carga en movimiento es perpendicular a la velocidad de la carga.
- ☑ La fuerza magnética no realiza trabajo sobre la carga, ya que es perpendicular al desplazamiento.
- ☑ En un campo magnético uniforme, una carga con velocidad perpendicular al campo describe un movimiento circular uniforme.
- ☑ Cuando la velocidad tiene componentes paralela y perpendicular al campo magnético, la trayectoria es helicoidal.
- ☑ El radio de la trayectoria circular depende de la masa de la carga, su velocidad y la intensidad del campo magnético.
- ☑ El periodo del movimiento circular en un campo magnético no depende de la velocidad de la carga.
- ☑ La fuerza magnética depende del valor de la carga, de su velocidad y de la intensidad del campo magnético.
- ☑ El sentido de la fuerza magnética se determina mediante la regla de la mano derecha.
- ☑ La fuerza de Lorentz describe la acción conjunta del campo eléctrico y del campo magnético sobre una carga.
- ☑ La fuerza total que actúa sobre una carga en presencia de campos eléctricos y magnéticos es la suma vectorial de ambas contribuciones.
- ☑ El estudio del movimiento de cargas en campos es fundamental para comprender numerosos dispositivos tecnológicos.

ERRORES FRECUENTES

- ☒ Pensar que el campo magnético puede actuar sobre una carga en reposo.
- ☒ Confundir la dirección del campo magnético con la dirección de la fuerza magnética.
- ☒ Olvidar que la fuerza magnética es perpendicular a la velocidad de la carga.
- ☒ Creer que la fuerza magnética puede modificar la energía cinética de la carga.
- ☒ Aplicar la conservación de la energía mecánica en presencia de un campo magnético sin justificación.
- ☒ Confundir movimiento circular con movimiento helicoidal en campos magnéticos.
- ☒ No identificar correctamente las componentes de la velocidad respecto al campo magnético.

☒ Usar la regla de la mano derecha de forma incorrecta.

☒ Confundir el signo de la carga al determinar el sentido de la fuerza magnética.

☒ Pensar que el radio de la trayectoria en un campo magnético depende de la intensidad del campo eléctrico.

☒ Olvidar que el periodo del movimiento circular no depende de la velocidad de la carga.

☒ Aplicar expresiones energéticas cuando el problema requiere un planteamiento dinámico.

☒ No distinguir entre el efecto del campo eléctrico y del campo magnético en la fuerza de Lorentz.

☒ Sumar escalarmente fuerzas eléctricas y magnéticas cuando deben tratarse vectorialmente.

☒ No justificar correctamente el tipo de trayectoria descrita por la carga.

☒ Confundir velocidad constante con aceleración nula en movimiento circular.

☒ Mezclar condiciones de campos uniformes con campos no uniformes sin indicarlo.

Capítulo 6. Campo magnético creado por corrientes.

IDEAS CLAVE

☑ El campo magnético puede ser generado por cargas eléctricas en movimiento.

☑ Una corriente eléctrica es un conjunto ordenado de cargas eléctricas en movimiento.

☑ Un conductor rectilíneo recorrido por una corriente eléctrica genera un campo magnético en el espacio que lo rodea.

☑ El campo magnético creado por una corriente rectilínea es circular y concéntrico al conductor.

☑ El sentido del campo magnético alrededor de un conductor rectilíneo se determina mediante la regla de la mano derecha.

☑ La intensidad del campo magnético creado por una corriente rectilínea depende del valor de la corriente y de la distancia al conductor.

☑ El campo magnético disminuye al aumentar la distancia al conductor que lo genera.

☑ El campo magnético es una magnitud vectorial y se representa mediante el vector **B**.

☑ Las líneas de campo magnético son siempre cerradas y no tienen principio ni final.

- ☑ El campo magnético ejerce fuerzas sobre conductores recorridos por corriente cuando se encuentran en su interior.
- ☑ La fuerza magnética que actúa sobre un conductor depende de la intensidad de la corriente, de la longitud del conductor y del campo magnético.
- ☑ El sentido de la fuerza que actúa sobre un conductor se determina mediante la regla de la mano derecha o la regla de Fleming.
- ☑ Dos conductores rectilíneos paralelos recorridos por corrientes eléctricas ejercen fuerzas entre sí.
- ☑ Dos corrientes paralelas con el mismo sentido se atraen.
- ☑ Dos corrientes paralelas con sentidos opuestos se repelen.
- ☑ La fuerza entre corrientes es proporcional al producto de las intensidades de corriente.
- ☑ La fuerza entre corrientes es inversamente proporcional a la distancia entre los conductores.
- ☑ La interacción magnética entre corrientes es una manifestación de la interacción electromagnética.
- ☑ La definición clásica del amperio se basa en la fuerza magnética entre dos conductores paralelos.
- ☑ El principio de superposición es aplicable al campo magnético creado por varias corrientes.
- ☑ El campo magnético total es la suma vectorial de los campos magnéticos creados por cada corriente.

ERRORES FRECUENTES

- ☒ Pensar que el campo magnético solo puede existir en presencia de imanes.
- ☒ Confundir la dirección del campo magnético con la dirección de la corriente eléctrica.
- ☒ No aplicar correctamente la regla de la mano derecha para determinar el sentido del campo magnético.
- ☒ Olvidar que las líneas de campo magnético son cerradas.
- ☒ Pensar que el campo magnético creado por una corriente es radial en lugar de circular.
- ☒ Confundir el sentido del campo magnético con el sentido de la fuerza que actúa sobre un conductor.
- ☒ Aplicar incorrectamente la regla de Fleming o la regla de la mano derecha.

☒ Creer que dos corrientes paralelas siempre se repelen.

☒ No distinguir entre corrientes con el mismo sentido y corrientes con sentidos opuestos.

☒ Confundir la fuerza entre corrientes con la fuerza que actúa sobre una carga puntual.

☒ Olvidar que la fuerza entre conductores depende de la distancia entre ellos.

☒ No tener en cuenta la longitud del conductor al analizar la fuerza magnética.

☒ Sumar módulos de campos magnéticos sin considerar sus direcciones.

☒ Aplicar el principio de superposición de forma escalar en lugar de vectorial.

☒ No justificar la validez del modelo de conductor rectilíneo infinito cuando se utiliza.

☒ Confundir campo magnético creado por corrientes con campo magnético externo aplicado.

☒ Interpretar la definición del amperio como una definición experimental directa en la actualidad.

Capítulo 7. Inducción electromagnética.

IDEAS CLAVE

☑ La inducción electromagnética es un fenómeno asociado a la variación del flujo magnético a través de una superficie.

☑ El flujo magnético es una magnitud escalar que depende del campo magnético, de la superficie considerada y de la orientación entre ambos.

☑ El flujo magnético puede variar por cambios en la intensidad del campo magnético, en el área de la superficie o en la orientación de dicha superficie.

☑ La fuerza electromotriz inducida aparece siempre que existe una variación temporal del flujo magnético.

☑ La ley de Faraday establece que la fuerza electromotriz inducida es proporcional a la rapidez de variación del flujo magnético.

☑ La fuerza electromotriz inducida es una magnitud escalar que se mide en voltios.

☑ La ley de Faraday es válida tanto para espiras como para bobinas formadas por varias espiras.

☑ La fuerza electromotriz inducida puede originar una corriente eléctrica si el circuito está cerrado.

☑ La corriente inducida es consecuencia directa de la fuerza electromotriz inducida.

- ☑ La ley de Lenz determina el sentido de la corriente inducida.
- ☑ El sentido de la corriente inducida es tal que el campo magnético que crea se opone a la causa que produce la variación del flujo.
- ☑ La ley de Lenz es una manifestación del principio de conservación de la energía.
- ☑ La oposición al cambio de flujo impide la creación espontánea de energía.
- ☑ La inducción electromagnética no requiere contacto entre los sistemas que interactúan.
- ☑ El movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético puede producir inducción electromagnética.
- ☑ La inducción electromagnética puede producirse tanto por movimiento del conductor como por variación del campo magnético.
- ☑ La inducción electromagnética es el fundamento del funcionamiento de los generadores eléctricos.
- ☑ La inducción electromagnética permite transformar energía mecánica en energía eléctrica.
- ☑ La inducción electromagnética está presente en numerosos dispositivos tecnológicos de uso cotidiano.

ERRORES FRECUENTES

- ☒ Pensar que la inducción electromagnética requiere necesariamente un campo magnético muy intenso.
- ☒ Creer que basta con la presencia de un campo magnético constante para que exista inducción.
- ☒ Confundir campo magnético con flujo magnético.
- ☒ No identificar correctamente qué magnitud está variando cuando se produce inducción.
- ☒ Pensar que el flujo magnético es una magnitud vectorial.
- ☒ Olvidar que el flujo magnético depende de la orientación de la superficie.
- ☒ Aplicar la ley de Faraday sin tener en cuenta el signo asociado a la ley de Lenz.
- ☒ Confundir el sentido de la corriente inducida con el sentido del campo magnético externo.

☒ Interpretar incorrectamente la ley de Lenz como una simple regla de signos sin significado físico.

☒ No relacionar la ley de Lenz con la conservación de la energía.

☒ Creer que la fuerza electromotriz inducida es una fuerza mecánica.

☒ Confundir fuerza electromotriz inducida con diferencia de potencial aplicada externamente.

☒ Pensar que la corriente inducida puede existir en un circuito abierto.

☒ No justificar la aparición de corriente inducida en función del cierre del circuito.

☒ Confundir inducción electromagnética con fuerzas magnéticas sobre cargas en movimiento.

☒ No distinguir entre inducción debida al movimiento del conductor e inducción debida a la variación del campo.

☒ Aplicar expresiones de inducción sin analizar el proceso físico que las origina.

☒ No identificar correctamente la causa del cambio de flujo magnético en problemas de examen.

Capítulo 8. Movimiento armónico simple.

IDEAS CLAVE

☑ El movimiento armónico simple es un movimiento periódico y oscilatorio alrededor de una posición de equilibrio estable.

☑ En el movimiento armónico simple, la fuerza que actúa sobre el sistema es proporcional a la elongación y tiene sentido opuesto a esta.

☑ La condición fundamental para que exista un movimiento armónico simple es la presencia de una fuerza recuperadora lineal.

☑ La posición de equilibrio es aquella para la cual la fuerza resultante sobre el sistema es nula.

☑ La elongación se define como la distancia del sistema respecto a la posición de equilibrio.

☑ El movimiento armónico simple puede describirse mediante funciones seno o coseno.

☑ La amplitud representa el valor máximo de la elongación alcanzada durante el movimiento.

- ☑ El periodo del movimiento armónico simple es el tiempo que tarda el sistema en realizar una oscilación completa.
- ☑ La frecuencia es el número de oscilaciones completas realizadas por unidad de tiempo.
- ☑ El periodo y la frecuencia son magnitudes inversas entre sí.
- ☑ La pulsación es una magnitud característica del movimiento armónico simple y está relacionada con el periodo.
- ☑ La velocidad del sistema es máxima al pasar por la posición de equilibrio.
- ☑ La velocidad del sistema es nula en los extremos de la oscilación.
- ☑ La aceleración del sistema es máxima en los extremos de la oscilación.
- ☑ La aceleración del sistema es nula en la posición de equilibrio.
- ☑ La aceleración en el movimiento armónico simple es proporcional a la elongación y de sentido contrario.
- ☑ El movimiento armónico simple puede interpretarse como la proyección de un movimiento circular uniforme.
- ☑ La energía cinética del sistema depende de la velocidad y varía a lo largo del movimiento.
- ☑ La energía potencial elástica depende de la elongación y es máxima en los extremos de la oscilación.
- ☑ La energía mecánica del movimiento armónico simple se conserva en ausencia de rozamiento.
- ☑ La energía mecánica total del oscilador depende de la amplitud del movimiento.
- ☑ El intercambio continuo entre energía cinética y energía potencial caracteriza al movimiento armónico simple.

ERRORES FRECUENTES

- ☒ Confundir movimiento armónico simple con cualquier movimiento periódico.
- ☒ Pensar que cualquier oscilación es un movimiento armónico simple.
- ☒ Olvidar que la fuerza recuperadora debe ser proporcional a la elongación.
- ☒ Confundir elongación con distancia recorrida.
- ☒ Creer que la velocidad es máxima en los extremos de la oscilación.
- ☒ Pensar que la aceleración es nula en los extremos del movimiento.

☒ Confundir posición de equilibrio con punto medio de la trayectoria sin analizar la fuerza.

☒ No distinguir entre amplitud y elongación instantánea.

☒ Olvidar que el periodo es independiente de la amplitud en el movimiento armónico simple ideal.

☒ Confundir frecuencia con pulsación.

☒ Aplicar expresiones del movimiento armónico simple a sistemas con rozamiento sin justificarlo.

☒ Pensar que la energía mecánica varía durante el movimiento armónico simple ideal.

☒ No identificar correctamente las posiciones de máxima energía cinética y máxima energía potencial.

☒ Confundir energía potencial elástica con energía potencial gravitatoria.

☒ Interpretar incorrectamente la relación entre aceleración y posición.

☒ No relacionar el movimiento armónico simple con su interpretación como proyección de un movimiento circular.

☒ Usar funciones seno y coseno sin justificar la fase inicial.

☒ Confundir condiciones iniciales con parámetros característicos del movimiento.

☒ Mezclar magnitudes cinemáticas y dinámicas sin coherencia.

Capítulo 9. Ondas mecánicas.

IDEAS CLAVE

☑ Una onda mecánica es una perturbación que se propaga a través de un medio material transportando energía sin transporte neto de materia.

☑ La existencia de ondas mecánicas requiere un medio material elástico.

☑ La perturbación que se propaga en una onda puede ser transversal o longitudinal.

☑ En las ondas transversales, la perturbación es perpendicular a la dirección de propagación.

☑ En las ondas longitudinales, la perturbación es paralela a la dirección de propagación.

☑ El sonido es un ejemplo de onda mecánica longitudinal.

- ☑ La velocidad de propagación de una onda depende de las propiedades del medio y no de la fuente que la produce.
- ☑ La elongación describe el desplazamiento instantáneo de un punto del medio respecto a su posición de equilibrio.
- ☑ La amplitud es el valor máximo de la elongación y está relacionada con la energía transportada por la onda.
- ☑ El periodo de una onda es el tiempo que tarda en completarse una oscilación completa en un punto del medio.
- ☑ La frecuencia es el número de oscilaciones por segundo y es una magnitud característica de la fuente.
- ☑ La longitud de onda es la distancia entre dos puntos consecutivos del medio que se encuentran en el mismo estado de vibración.
- ☑ La relación fundamental de las ondas vincula velocidad de propagación, longitud de onda y frecuencia.
- ☑ La ecuación de onda armónica describe la evolución espacial y temporal de la perturbación.
- ☑ El número de onda está relacionado con la longitud de onda y describe la periodicidad espacial.
- ☑ La fase de una onda determina el estado de vibración de un punto del medio en un instante dado.
- ☑ Dos puntos del medio vibran en fase si su diferencia de fase es múltiplo entero de dos pi.
- ☑ Dos puntos vibran en oposición de fase si su diferencia de fase es un múltiplo impar de pi.
- ☑ La energía transportada por una onda es proporcional al cuadrado de la amplitud.
- ☑ La intensidad de una onda está relacionada con la energía transportada por unidad de tiempo y superficie.
- ☑ En una onda mecánica no se transporta materia de forma global, aunque las partículas del medio oscilan alrededor de su posición de equilibrio.

ERRORES FRECUENTES

- ☒ Confundir onda con movimiento de partículas del medio.
- ☒ Pensar que las ondas mecánicas pueden propagarse en el vacío.

☒ Confundir velocidad de propagación de la onda con velocidad de vibración de las partículas.

☒ Creer que la velocidad de una onda depende de la amplitud.

☒ Confundir periodo con longitud de onda.

☒ Pensar que la frecuencia cambia al pasar una onda de un medio a otro.

☒ Olvidar que la frecuencia viene determinada por la fuente emisora.

☒ Confundir ondas transversales con longitudinales en el caso del sonido.

☒ No identificar correctamente la dirección de propagación de la onda.

☒ Interpretar la elongación como distancia recorrida por la partícula.

☒ Confundir fase con frecuencia o con periodo.

☒ No distinguir entre puntos que vibran en fase y puntos que vibran en oposición de fase.

☒ Usar incorrectamente la relación entre velocidad, longitud de onda y frecuencia.

☒ Confundir número de onda con pulsación.

☒ Pensar que la energía transportada por una onda es proporcional a la amplitud y no a su cuadrado.

☒ Creer que las ondas transportan materia de un punto a otro del medio.

☒ Aplicar la ecuación de onda armónica sin identificar correctamente las variables espaciales y temporales.

☒ No justificar el tipo de onda al describir un fenómeno físico concreto.

☒ Mezclar propiedades de la fuente con propiedades del medio.

Capítulo 10. Fenómenos ondulatorios.

IDEAS CLAVE

☑ El principio de superposición establece que cuando dos o más ondas coinciden en un punto, la perturbación resultante es la suma de las perturbaciones individuales.

☑ El principio de superposición es válido únicamente en medios lineales.

☑ La interferencia es un fenómeno ondulatorio que se produce como consecuencia del principio de superposición.

☑ La interferencia puede ser constructiva o destructiva según la diferencia de fase entre las ondas.

- ☑ La interferencia constructiva se produce cuando la diferencia de caminos recorridos por las ondas es un múltiplo entero de la longitud de onda.
- ☑ La interferencia destructiva se produce cuando la diferencia de caminos es un múltiplo impar de media longitud de onda.
- ☑ La interferencia es una manifestación clara del carácter ondulatorio de la propagación.
- ☑ La difracción es el fenómeno por el cual una onda se propaga al atravesar una abertura o rodear un obstáculo.
- ☑ La difracción es apreciable cuando el tamaño del obstáculo o de la abertura es comparable a la longitud de onda.
- ☑ La difracción pone de manifiesto que las ondas no se propagan exclusivamente en línea recta.
- ☑ El principio de Huygens permite interpretar la propagación de las ondas como el resultado de la superposición de ondas secundarias.
- ☑ Según el principio de Huygens, cada punto de un frente de ondas actúa como foco emisor de ondas secundarias.
- ☑ La reflexión es un fenómeno ondulatorio que se produce cuando una onda incide sobre una superficie de separación entre medios.
- ☑ La ley de la reflexión establece que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.
- ☑ La refracción es un fenómeno ondulatorio que se produce cuando una onda pasa de un medio a otro con distinta velocidad de propagación.
- ☑ La refracción implica un cambio en la velocidad y en la dirección de propagación de la onda.
- ☑ La ley de Snell relaciona los ángulos de incidencia y refracción con las velocidades de propagación en ambos medios.
- ☑ La frecuencia de una onda no cambia cuando pasa de un medio a otro.
- ☑ La longitud de onda sí cambia al pasar una onda de un medio a otro.
- ☑ Las ondas estacionarias se producen por la superposición de dos ondas de igual frecuencia y amplitud que se propagan en sentidos opuestos.
- ☑ En una onda estacionaria aparecen nodos y vientres fijos en el espacio.
- ☑ Los nodos son puntos del medio que permanecen en reposo.

- ☑ Los vientres son puntos del medio donde la amplitud de oscilación es máxima.
- ☑ Las condiciones de contorno determinan las longitudes de onda permitidas en una onda estacionaria.

ERRORES FRECUENTES

- ☒ Confundir superposición de ondas con choque de partículas.
- ☒ Pensar que las ondas se destruyen tras interferir.
- ☒ Creer que la interferencia solo puede producirse con ondas luminosas.
- ☒ No diferenciar interferencia constructiva de interferencia destructiva.
- ☒ Confundir diferencia de fase con diferencia de caminos.
- ☒ Aplicar incorrectamente las condiciones de interferencia constructiva y destructiva.
- ☒ Pensar que la difracción solo se produce en rendijas muy estrechas sin relacionarla con la longitud de onda.
- ☒ Confundir difracción con reflexión o con refracción.
- ☒ No interpretar correctamente el principio de Huygens.
- ☒ Pensar que el principio de Huygens contradice la propagación rectilínea de las ondas.
- ☒ Confundir ángulo de incidencia con ángulo de refracción.
- ☒ Aplicar la ley de Snell sin tener en cuenta el cambio de medio.
- ☒ Pensar que la frecuencia cambia al pasar una onda de un medio a otro.
- ☒ Confundir velocidad de propagación con frecuencia.
- ☒ No identificar correctamente nodos y vientres en una onda estacionaria.
- ☒ Pensar que en los nodos no existe energía asociada a la onda.
- ☒ Confundir ondas estacionarias con ondas progresivas.
- ☒ No tener en cuenta las condiciones de contorno al analizar ondas estacionarias.
- ☒ Mezclar fenómenos ondulatorios sin justificar el proceso físico implicado.
- ☒ No relacionar la aparición de ondas estacionarias con la superposición de ondas.

Capítulo 11. Ondas electromagnéticas.

IDEAS CLAVE

- ☑ Las ondas electromagnéticas no requieren un medio material para propagarse.
- ☑ Las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío con velocidad constante.
- ☑ La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío es una constante universal.
- ☑ Una onda electromagnética está formada por un campo eléctrico y un campo magnético variables en el tiempo.
- ☑ El campo eléctrico y el campo magnético son perpendiculares entre sí.
- ☑ Ambos campos son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda.
- ☑ Las ondas electromagnéticas son ondas transversales.
- ☑ La propagación de una onda electromagnética implica transporte de energía.
- ☑ La energía transportada por una onda electromagnética está asociada a la existencia de los campos eléctrico y magnético.
- ☑ La intensidad de una onda electromagnética está relacionada con la energía transportada por unidad de tiempo y superficie.
- ☑ Las ondas electromagnéticas pueden describirse mediante una longitud de onda, una frecuencia y un periodo.
- ☑ La relación entre velocidad de propagación, frecuencia y longitud de onda es válida para las ondas electromagnéticas.
- ☑ Al propagarse en un medio material, la velocidad de una onda electromagnética es menor que en el vacío.
- ☑ El índice de refracción de un medio está relacionado con la velocidad de propagación de la onda electromagnética en dicho medio.
- ☑ La frecuencia de una onda electromagnética no cambia al pasar de un medio a otro.
- ☑ La longitud de onda de una onda electromagnética sí cambia al variar el medio de propagación.
- ☑ El espectro electromagnético ordena las ondas electromagnéticas según su frecuencia o longitud de onda.
- ☑ Las ondas de radio, microondas, infrarrojas, visibles, ultravioletas, rayos X y rayos gamma forman parte del espectro electromagnético.

- ☑ Todas las ondas electromagnéticas tienen la misma naturaleza física y solo se diferencian por su frecuencia o longitud de onda.
- ☑ Las ondas electromagnéticas pueden interactuar con la materia mediante absorción, reflexión, refracción o transmisión.
- ☑ Las ondas electromagnéticas desempeñan un papel fundamental en numerosos procesos físicos y tecnológicos.

ERRORES FRECUENTES

- ☒ Pensar que las ondas electromagnéticas necesitan un medio material para propagarse.
- ☒ Confundir ondas electromagnéticas con ondas mecánicas.
- ☒ Creer que el campo eléctrico y el campo magnético oscilan en la misma dirección que la propagación.
- ☒ Pensar que el campo eléctrico y el campo magnético son paralelos entre sí.
- ☒ Confundir la dirección de propagación con la dirección de oscilación de los campos.
- ☒ Creer que la velocidad de las ondas electromagnéticas depende de su frecuencia en el vacío.
- ☒ Pensar que ondas electromagnéticas de distinta frecuencia se propagan a distinta velocidad en el vacío.
- ☒ Confundir intensidad de una onda electromagnética con su frecuencia.
- ☒ Creer que la frecuencia cambia al pasar de un medio a otro.
- ☒ No relacionar correctamente índice de refracción con velocidad de propagación.
- ☒ Confundir longitud de onda con frecuencia al analizar el espectro electromagnético.
- ☒ Pensar que las distintas regiones del espectro electromagnético corresponden a fenómenos físicos distintos.
- ☒ Creer que solo la luz visible es una onda electromagnética.
- ☒ No identificar correctamente la naturaleza transversal de las ondas electromagnéticas.
- ☒ Confundir energía transportada por la onda con amplitud de los campos sin justificación.
- ☒ Pensar que la energía de una onda electromagnética no depende de su frecuencia en el marco cuántico.
- ☒ Mezclar descripciones clásicas y cuánticas sin especificar el contexto.

☒ No justificar el uso del modelo ondulatorio para describir fenómenos electromagnéticos.

☒ Aplicar propiedades de ondas mecánicas a ondas electromagnéticas sin análisis previo.

Capítulo 12. Óptica geométrica.

IDEAS CLAVE

☑ La óptica geométrica estudia la propagación de la luz suponiendo que se comporta como un conjunto de rayos.

☑ La aproximación de la óptica geométrica es válida cuando la longitud de onda de la luz es mucho menor que las dimensiones de los obstáculos.

☑ En la óptica geométrica, la luz se propaga en línea recta en medios homogéneos e isótropos.

☑ Un rayo luminoso representa la dirección de propagación de la luz.

☑ Un haz de rayos puede ser convergente, divergente o paralelo.

☑ La reflexión es el fenómeno por el cual la luz cambia de dirección al incidir sobre una superficie reflectante.

☑ La ley de la reflexión establece que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

☑ El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie pertenecen al mismo plano.

☑ La reflexión puede ser especular o difusa, dependiendo de la rugosidad de la superficie.

☑ La refracción es el fenómeno por el cual la luz cambia de dirección al pasar de un medio a otro con distinta velocidad de propagación.

☑ La ley de Snell relaciona los ángulos de incidencia y refracción con los índices de refracción de los medios.

☑ El índice de refracción de un medio es una medida de la velocidad de la luz en dicho medio.

☑ La frecuencia de la luz no cambia al pasar de un medio a otro.

☑ La longitud de onda de la luz sí cambia al variar el medio de propagación.

☑ Un espejo plano forma imágenes virtuales, derechas y del mismo tamaño que el objeto.

☑ La distancia imagen en un espejo plano es igual a la distancia objeto.

- ☑ Los espejos esféricos pueden ser cóncavos o convexos.
- ☑ Los espejos cóncavos pueden formar imágenes reales o virtuales según la posición del objeto.
- ☑ Los espejos convexos forman siempre imágenes virtuales, derechas y de menor tamaño.
- ☑ La ecuación de los espejos esféricos relaciona la distancia focal, la distancia objeto y la distancia imagen.
- ☑ Las lentes delgadas pueden ser convergentes o divergentes.
- ☑ Las lentes convergentes pueden formar imágenes reales o virtuales.
- ☑ Las lentes divergentes forman siempre imágenes virtuales, derechas y de menor tamaño.
- ☑ La ecuación de las lentes delgadas es análoga a la ecuación de los espejos esféricos.
- ☑ El aumento lateral relaciona el tamaño de la imagen con el tamaño del objeto.
- ☑ La formación de imágenes puede analizarse mediante trazado de rayos principales.
- ☑ La fibra óptica se basa en el fenómeno de la reflexión total interna.
- ☑ La reflexión total interna solo se produce cuando la luz pasa de un medio más refringente a uno menos refringente.

ERRORES FRECUENTES

- ☒ Confundir rayo luminoso con trayectoria real de una partícula.
- ☒ Aplicar la óptica geométrica en situaciones donde los efectos ondulatorios son relevantes.
- ☒ Pensar que la luz siempre se propaga en línea recta independientemente del medio.
- ☒ Confundir ángulo de incidencia con ángulo de reflexión o de refracción.
- ☒ Medir los ángulos respecto a la superficie en lugar de respecto a la normal.
- ☒ Aplicar incorrectamente la ley de Snell sin tener en cuenta el índice de refracción de cada medio.
- ☒ Pensar que la frecuencia de la luz cambia al pasar de un medio a otro.
- ☒ Confundir cambio de longitud de onda con cambio de frecuencia.
- ☒ No distinguir entre imágenes reales y virtuales.

☒ Pensar que una imagen virtual puede proyectarse sobre una pantalla.

☒ Confundir las características de las imágenes formadas por espejos planos y esféricos.

☒ Aplicar la ecuación de los espejos sin respetar el convenio de signos.

☒ Confundir foco real con foco virtual.

☒ Pensar que todas las lentes forman imágenes reales.

☒ No distinguir entre lentes convergentes y divergentes.

☒ Usar incorrectamente el aumento lateral en problemas de formación de imágenes.

☒ No justificar el trazado de rayos utilizado para obtener una imagen.

☒ Confundir reflexión total interna con reflexión especular.

☒ Pensar que la reflexión total interna puede producirse en cualquier dirección de propagación.

☒ No relacionar el funcionamiento de la fibra óptica con la reflexión total interna.

Capítulo 13. Origen de la Física Cuántica.

IDEAS CLAVE

☑ A finales del siglo XIX la Física Clásica no podía explicar correctamente todos los fenómenos observados.

☑ La crisis de la Física Clásica surge al intentar explicar ciertos fenómenos microscópicos y radiativos.

☑ La radiación del cuerpo negro no podía interpretarse satisfactoriamente mediante la Física Clásica.

☑ La hipótesis de Planck introduce la idea de cuantización de la energía.

☑ Según la hipótesis de Planck, la energía intercambiada por la materia no es continua, sino discreta.

☑ La energía asociada a la radiación electromagnética es proporcional a su frecuencia.

☑ La constante de Planck es una constante fundamental de la naturaleza.

☑ La hipótesis de Planck supuso el origen de la Física Cuántica.

☑ El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un metal al incidir radiación electromagnética sobre él.

☑ El efecto fotoeléctrico no puede explicarse mediante la teoría clásica de la radiación.

- ☑ La existencia de una frecuencia umbral es una característica fundamental del efecto fotoeléctrico.
- ☑ Por debajo de la frecuencia umbral no se produce emisión de electrones, independientemente de la intensidad de la radiación.
- ☑ La energía cinética máxima de los electrones emitidos depende de la frecuencia de la radiación incidente.
- ☑ La intensidad de la radiación influye en el número de electrones emitidos, pero no en su energía cinética máxima.
- ☑ La explicación del efecto fotoeléctrico requiere considerar la naturaleza corpuscular de la radiación.
- ☑ La radiación electromagnética puede describirse como un conjunto de fotones.
- ☑ Un fotón es un cuanto de energía asociado a la radiación electromagnética.
- ☑ La energía de un fotón es proporcional a la frecuencia de la radiación.
- ☑ El efecto fotoeléctrico pone de manifiesto la dualidad onda-corpúsculo de la radiación.
- ☑ La Física Cuántica no invalida la Física Clásica, sino que delimita su dominio de validez.
- ☑ La Física Clásica sigue siendo válida para sistemas macroscópicos y energías bajas.
- ☑ La Física Cuántica es necesaria para describir fenómenos a escala atómica y subatómica.

ERRORES FRECUENTES

- ☒ Pensar que la Física Cuántica sustituye completamente a la Física Clásica.
- ☒ Creer que la crisis de la Física Clásica afectó a todos los fenómenos físicos.
- ☒ Confundir cuantización de la energía con cuantización de la materia.
- ☒ Pensar que la energía de la radiación depende de su intensidad y no de su frecuencia.
- ☒ Creer que aumentar la intensidad de la radiación siempre provoca emisión de electrones en el efecto fotoeléctrico.
- ☒ No reconocer la existencia de una frecuencia umbral en el efecto fotoeléctrico.
- ☒ Confundir intensidad de la radiación con energía de los fotones.
- ☒ Pensar que los electrones emitidos en el efecto fotoeléctrico proceden de la radiación incidente.

- ☒ Creer que el efecto fotoeléctrico se produce de forma retardada.
- ☒ No relacionar el efecto fotoeléctrico con la naturaleza corpuscular de la radiación.
- ☒ Confundir el concepto de fotón con el de electrón.
- ☒ Pensar que los fotones tienen masa en reposo.
- ☒ Mezclar explicaciones ondulatorias y corpusculares sin justificar el contexto.
- ☒ No identificar correctamente el dominio de validez de la Física Clásica.
- ☒ Creer que la hipótesis de Planck se formuló para explicar el efecto fotoeléctrico.
- ☒ No distinguir entre radiación electromagnética clásica y descripción cuántica de la radiación.
- ☒ Interpretar incorrectamente el papel de la constante de Planck.
- ☒ Confundir la frecuencia umbral con la frecuencia de máxima emisión.
- ☒ No justificar la necesidad de la Física Cuántica para explicar fenómenos microscópicos.

Capítulo 14. Principios cuánticos.

IDEAS CLAVE

- ☑ La Física Cuántica introduce una nueva forma de describir los fenómenos microscópicos.
- ☑ La dualidad onda-corpúsculo establece que la radiación y la materia presentan simultáneamente propiedades ondulatorias y corpusculares.
- ☑ La dualidad onda-corpúsculo se manifiesta tanto en la radiación electromagnética como en las partículas materiales.
- ☑ La hipótesis de de Broglie extiende el carácter ondulatorio a las partículas materiales.
- ☑ A toda partícula material en movimiento se le puede asociar una longitud de onda.
- ☑ La longitud de onda asociada a una partícula es inversamente proporcional a su cantidad de movimiento.
- ☑ La dualidad onda-corpúsculo no implica que la partícula sea simultáneamente una onda clásica y un corpúsculo clásico.
- ☑ La descripción cuántica sustituye trayectorias bien definidas por magnitudes probabilísticas.

- ☑ El principio de incertidumbre establece un límite fundamental a la precisión con la que pueden conocerse simultáneamente ciertas magnitudes físicas.
- ☑ El principio de incertidumbre no es consecuencia de imperfecciones experimentales, sino una propiedad intrínseca de la naturaleza.
- ☑ No es posible conocer simultáneamente con precisión arbitraria la posición y la cantidad de movimiento de una partícula.
- ☑ El principio de incertidumbre también se aplica a la energía y al tiempo.
- ☑ El carácter probabilístico de la Mecánica Cuántica contrasta con el determinismo de la Mecánica Clásica.
- ☑ En Mecánica Cuántica no se puede predecir con certeza el resultado individual de una medida, sino la probabilidad de obtenerlo.
- ☑ Las magnitudes físicas se describen mediante distribuciones de probabilidad.
- ☑ El concepto clásico de trayectoria pierde sentido en el dominio cuántico.
- ☑ La Mecánica Cuántica proporciona resultados exactos en términos probabilísticos.
- ☑ El formalismo cuántico es necesario para describir sistemas atómicos y subatómicos.
- ☑ La Física Cuántica y la Física Clásica son compatibles dentro de sus respectivos dominios de validez.
- ☑ La Física Clásica emerge como un caso límite de la Física Cuántica para sistemas macroscópicos.
- ☑ Los principios cuánticos tienen profundas consecuencias conceptuales en la interpretación de la naturaleza.

ERRORES FRECUENTES

- ☒ Pensar que la dualidad onda-corpúsculo implica que una partícula sea literalmente una onda clásica.
- ☒ Confundir la longitud de onda de de Broglie con una onda mecánica real del medio.
- ☒ Creer que la dualidad onda-corpúsculo solo se aplica a la radiación electromagnética.
- ☒ Pensar que las partículas materiales no presentan propiedades ondulatorias.
- ☒ Interpretar el principio de incertidumbre como una limitación instrumental.
- ☒ Creer que es posible reducir arbitrariamente la incertidumbre aumentando la precisión experimental.

☒ Confundir indeterminación cuántica con falta de conocimiento subjetivo.

☒ Pensar que el principio de incertidumbre se debe a la perturbación producida por el proceso de medida.

☒ Creer que en Mecánica Cuántica todo es completamente impredecible.

☒ Confundir carácter probabilístico con ausencia de leyes físicas.

☒ Pensar que la Mecánica Cuántica contradice a la Física Clásica en todos los regímenes.

☒ Aplicar conceptos clásicos como trayectoria definida en sistemas cuánticos.

☒ Mezclar descripciones clásicas y cuánticas sin justificar el contexto físico.

☒ Confundir probabilidad cuántica con probabilidad estadística clásica.

☒ Pensar que la Mecánica Cuántica solo es válida para partículas subatómicas aisladas.

☒ No identificar correctamente el dominio de validez de los principios cuánticos.

☒ Interpretar erróneamente la relación entre incertidumbre en energía y tiempo.

☒ Pensar que la Física Cuántica carece de rigor matemático o predictivo.

☒ No relacionar la dualidad onda-corpúsculo con los experimentos que la evidencian.

Capítulo 15. Física nuclear.

IDEAS CLAVE

☑ El núcleo atómico está formado por protones y neutrones, denominados conjuntamente nucleones.

☑ El número atómico identifica al elemento químico y coincide con el número de protones del núcleo.

☑ El número másico es la suma del número de protones y de neutrones del núcleo.

☑ Los isótopos son núcleos con el mismo número atómico y distinto número másico.

☑ Las dimensiones del núcleo son del orden de 10^{-15}m, mucho menores que las del átomo.

☑ Las fuerzas que mantienen unidos a los nucleones en el núcleo son de origen nuclear y de corto alcance.

☑ La masa de un núcleo es menor que la suma de las masas de sus nucleones libres.

☑ La diferencia entre la masa de los nucleones separados y la masa del núcleo se denomina defecto de masa.

- ☑ El defecto de masa está relacionado con la energía de enlace nuclear mediante la equivalencia masa–energía.
- ☑ La energía de enlace nuclear es la energía necesaria para separar completamente los nucleones del núcleo.
- ☑ La energía de enlace por nucleón es una magnitud indicativa de la estabilidad nuclear.
- ☑ Los núcleos con mayor energía de enlace por nucleón son más estables.
- ☑ La curva de energía de enlace por nucleón presenta un máximo en núcleos de masa intermedia.
- ☑ Los núcleos ligeros pueden liberar energía mediante procesos de fusión.
- ☑ Los núcleos pesados pueden liberar energía mediante procesos de fisión.
- ☑ La radiactividad es un proceso espontáneo de desintegración nuclear.
- ☑ La radiactividad es independiente de factores externos como la temperatura o la presión.
- ☑ En una desintegración radiactiva se conservan el número másico y la carga eléctrica.
- ☑ La radiación alfa está formada por núcleos de helio.
- ☑ La radiación beta implica la transformación de un neutrón en un protón o viceversa.
- ☑ La radiación gamma consiste en la emisión de fotones de alta energía.
- ☑ La ley de desintegración radiactiva describe la evolución temporal del número de núcleos no desintegrados.
- ☑ El periodo de semidesintegración es el tiempo necesario para que se desintegre la mitad de los núcleos iniciales.
- ☑ La actividad radiactiva es proporcional al número de núcleos no desintegrados.
- ☑ Los procesos nucleares implican energías mucho mayores que los procesos químicos.

ERRORES FRECUENTES

- ☒ Confundir núcleo atómico con átomo completo.
- ☒ Pensar que los neutrones no influyen en las propiedades del núcleo.
- ☒ Confundir número atómico con número másico.
- ☒ Pensar que los isótopos tienen propiedades químicas diferentes.
- ☒ No distinguir entre tamaño del átomo y tamaño del núcleo.

☒ Creer que la masa del núcleo es igual a la suma de las masas de los nucleones.

☒ Confundir defecto de masa con error experimental.

☒ Pensar que el defecto de masa es una pérdida de masa física observable.

☒ No relacionar el defecto de masa con la energía de enlace nuclear.

☒ Confundir energía de enlace con energía liberada en una reacción nuclear concreta.

☒ Pensar que un núcleo con mayor número de nucleones es siempre más estable.

☒ No interpretar correctamente la curva de energía de enlace por nucleón.

☒ Confundir procesos de fisión con procesos de fusión.

☒ Pensar que la radiactividad puede controlarse modificando condiciones externas.

☒ Confundir radiación alfa con radiación beta o gamma.

☒ No aplicar correctamente las leyes de conservación en desintegraciones radiactivas.

☒ Pensar que la radiación gamma altera el número atómico o el número másico.

☒ Confundir periodo de semidesintegración con vida media.

☒ Creer que la actividad radiactiva depende del tiempo de forma lineal.

☒ Aplicar expresiones químicas a procesos nucleares.

☒ No distinguir entre energía liberada por núcleo y energía total liberada en una reacción.

☒ Confundir orden de magnitud de energías nucleares con energías químicas.

☒ No justificar el carácter espontáneo de la desintegración radiactiva.

Capítulo 16. Fisión, fusión e interacciones fundamentales.

IDEAS CLAVE

☑ La fisión nuclear es un proceso en el que un núcleo pesado se divide en dos núcleos más ligeros.

☑ La fisión nuclear suele iniciarse tras la captura de un neutrón por un núcleo pesado.

☑ En una reacción de fisión se liberan neutrones adicionales y una gran cantidad de energía.

☑ La energía liberada en la fisión nuclear se debe al defecto de masa entre los productos y el núcleo inicial.

- ☑ La fisión nuclear puede dar lugar a reacciones en cadena.
- ☑ Una reacción en cadena es controlada cuando el número de neutrones efectivos se mantiene constante.
- ☑ Las centrales nucleares de fisión se basan en reacciones en cadena controladas.
- ☑ En una reacción de fisión se conservan el número másico y la carga eléctrica.
- ☑ La fusión nuclear es un proceso en el que dos núcleos ligeros se unen para formar un núcleo más pesado.
- ☑ La fusión nuclear libera energía cuando los núcleos resultantes tienen mayor energía de enlace por nucleón.
- ☑ La fusión nuclear requiere temperaturas muy elevadas para vencer la repulsión eléctrica entre núcleos.
- ☑ Las reacciones de fusión son las responsables de la energía emitida por las estrellas.
- ☑ La fusión nuclear produce residuos menos radiactivos que la fisión.
- ☑ Actualmente no existen reactores de fusión comercialmente operativos para producción de energía eléctrica.
- ☑ La equivalencia masa–energía explica la energía liberada en procesos de fisión y fusión.
- ☑ Las reacciones nucleares deben cumplir las leyes de conservación de la masa–energía y de la carga eléctrica.
- ☑ Existen cuatro interacciones fundamentales en la naturaleza.
- ☑ La interacción gravitatoria actúa entre masas y tiene alcance infinito.
- ☑ La interacción electromagnética actúa entre cargas eléctricas y es responsable de los fenómenos eléctricos, magnéticos y atómicos.
- ☑ La interacción nuclear fuerte mantiene unidos a los nucleones en el núcleo.
- ☑ La interacción nuclear fuerte es de corto alcance y muy intensa.
- ☑ La interacción nuclear débil es responsable de ciertos procesos de desintegración radiactiva.
- ☑ Las interacciones fundamentales explican el comportamiento de la materia desde la escala subatómica hasta la cosmológica.
- ☑ Cada interacción fundamental domina en un determinado rango de distancias y energías.

☑ La Física actual describe las interacciones fundamentales mediante teorías específicas con distintos dominios de validez.

ERRORES FRECUENTES

☒ Confundir fisión nuclear con fusión nuclear.

☒ Pensar que toda reacción nuclear es una reacción en cadena.

☒ Creer que la fisión se produce espontáneamente sin necesidad de neutrones incidentes.

☒ No justificar la liberación de energía en una reacción de fisión o fusión mediante el defecto de masa.

☒ Confundir energía de enlace con energía liberada en una reacción concreta.

☒ Pensar que la fusión nuclear es fácil de controlar en condiciones terrestres.

☒ Creer que las centrales nucleares actuales funcionan mediante fusión.

☒ No aplicar correctamente las leyes de conservación en reacciones nucleares.

☒ Olvidar la conservación del número másico al ajustar una reacción nuclear.

☒ Confundir productos de fisión con productos de desintegración radiactiva.

☒ Pensar que la fusión produce residuos más peligrosos que la fisión.

☒ No distinguir entre reacción en cadena controlada y no controlada.

☒ Confundir interacción nuclear fuerte con interacción electromagnética.

☒ Pensar que la interacción nuclear fuerte tiene alcance infinito.

☒ Creer que la interacción débil actúa solo en fenómenos macroscópicos.

☒ Confundir interacción gravitatoria con interacción electromagnética.

☒ No identificar correctamente qué interacción domina en un fenómeno concreto.

☒ Pensar que todas las interacciones tienen la misma intensidad.

☒ No relacionar las interacciones fundamentales con los procesos estudiados en capítulos anteriores.

☒ Mezclar conceptos de Física nuclear con Física de partículas sin justificación.

CONCLUSIONES FINALES

La Física constituye una de las disciplinas fundamentales para la comprensión del mundo natural. A lo largo de este manual se ha recorrido, de forma sistemática y rigurosa, el conjunto de contenidos que conforman la materia de Física de segundo curso de Bachillerato, atendiendo estrictamente a las directrices establecidas para la Prueba de Evaluación de Bachillerato para el Acceso a la Universidad. El objetivo principal ha sido proporcionar una herramienta de apoyo clara, estructurada y coherente, tanto para el alumnado como para el profesorado, que facilite la comprensión de los conceptos fundamentales y permita una preparación eficaz de la prueba externa.

El estudio de la interacción gravitatoria, con el que se inicia el manual, pone de manifiesto la importancia de los modelos físicos para describir fenómenos naturales de gran escala. El concepto de campo gravitatorio permite superar la visión puramente mecanicista de la interacción a distancia y constituye una introducción esencial al lenguaje moderno de la Física. El enfoque energético, desarrollado a través de la energía potencial gravitatoria y de los teoremas de conservación, ofrece una poderosa herramienta de análisis que reaparece de forma recurrente en otros bloques del currículo. El movimiento orbital, por su parte, ilustra cómo la combinación de leyes dinámicas y principios de conservación permite explicar el movimiento de cuerpos celestes, conectando la Física clásica con la astronomía y la cosmología.

El bloque dedicado al campo electromagnético amplía el marco conceptual introducido por el campo gravitatorio, mostrando cómo el concepto de campo resulta indispensable para describir interacciones fundamentales de naturaleza distinta. El estudio del campo eléctrico y del campo magnético, así como del movimiento de cargas en su presencia, permite comprender una gran variedad de fenómenos físicos y tecnológicos. La inducción electromagnética, en particular, representa uno de los ejemplos más claros de la interrelación entre distintos campos físicos y constituye la base del funcionamiento de numerosos dispositivos de uso cotidiano. Este bloque pone de relieve la capacidad de la Física para unificar fenómenos aparentemente distintos bajo un mismo marco teórico.

El bloque dedicado a vibraciones, ondas y óptica introduce un cambio de perspectiva al centrarse en la propagación de perturbaciones y energía. El movimiento armónico simple constituye un modelo fundamental que aparece en múltiples contextos físicos y que permite introducir conceptos clave como periodicidad, fase y energía oscilatoria. El estudio de las ondas mecánicas y de los fenómenos ondulatorios proporciona una comprensión profunda de procesos como la interferencia, la difracción y la formación de ondas estacionarias, que son esenciales tanto desde el punto de vista conceptual como experimental. La óptica geométrica, por su parte, ofrece una aproximación simplificada pero muy eficaz para el estudio de la propagación de la luz y la formación de imágenes, estableciendo un puente natural con aplicaciones tecnológicas y científicas de gran relevancia.

La introducción a la Física Cuántica marca un punto de inflexión en el recorrido del manual. El análisis de la crisis de la Física Clásica y la introducción de conceptos como la cuantización de la energía, el efecto fotoeléctrico y la dualidad onda-corpúsculo ponen de manifiesto los límites de los modelos clásicos y la necesidad de nuevas ideas para describir el mundo microscópico. El carácter probabilístico de la Mecánica Cuántica y el principio de incertidumbre suponen un cambio profundo en la forma de entender la naturaleza, que no solo tiene consecuencias científicas, sino también filosóficas. En este contexto, se ha insistido en delimitar claramente los dominios de validez de la Física Clásica y de la Física Cuántica, evitando interpretaciones erróneas o simplificaciones excesivas.

El estudio de la Física nuclear completa el recorrido por los contenidos fundamentales del currículo. La descripción del núcleo atómico, el concepto de defecto de masa y la energía de enlace nuclear permiten comprender el origen de la enorme cantidad de energía implicada en los procesos nucleares. La radiactividad, la fisión y la fusión nuclear se han tratado desde una perspectiva fundamentalmente conceptual, haciendo hincapié en las leyes de conservación y en la interpretación física de los procesos. Asimismo, se han abordado las interacciones fundamentales de la naturaleza, proporcionando una visión global que conecta los distintos bloques del manual y sitúa los contenidos estudiados en un marco más amplio.

Un elemento central de este manual ha sido la incorporación sistemática de secciones de ideas clave y errores frecuentes al final de cada capítulo. Estas secciones no pretenden sustituir al estudio detallado de la teoría, sino reforzarlo, ayudando al alumnado a identificar los conceptos esenciales y a evitar los fallos más habituales en la resolución de problemas y en las cuestiones teóricas de examen. De este modo, el manual no se limita a exponer contenidos, sino que acompaña al estudiante en el proceso de aprendizaje y preparación para la prueba externa.

Desde el punto de vista didáctico, el manual ha sido concebido como un texto de apoyo que complementa los libros de texto tradicionales, sin entrar en competencia directa con ellos. La ausencia deliberada de problemas resueltos responde a la intención de centrar el contenido en la comprensión conceptual y en la estructuración del conocimiento, dejando al profesorado y al alumnado la libertad de trabajar la resolución de problemas con otros materiales específicos. Este enfoque favorece una visión más clara y ordenada de la Física, evitando la dispersión y la sobrecarga cognitiva.

En definitiva, este manual aspira a ser una herramienta útil, rigurosa y accesible para el estudio de la Física en segundo curso de Bachillerato. Su estructura, alineada con el currículo oficial y con las exigencias de la PAU, permite un estudio progresivo y coherente de la materia, al tiempo que refuerza los aspectos conceptuales más relevantes. La Física, entendida como una construcción intelectual que busca describir y explicar la realidad mediante modelos y leyes, se presenta aquí no solo como una asignatura académica, sino como una forma de pensar y de interpretar el mundo. Que este manual contribuya a despertar la curiosidad científica, a consolidar conocimientos y a afrontar con confianza la prueba de acceso a la universidad es, en última instancia, su principal propósito.

BIBLIOGRAFÍA

Manuales de Física de Bachillerato

Santillana Educación. (2016). *Física. 2.º Bachillerato*. Santillana.

Anaya Educación. (2016). *Física. 2.º Bachillerato*. Anaya.

SM. (2016). *Física. 2.º Bachillerato*. Ediciones SM.

McGraw-Hill Education. (2016). *Física 2.º Bachillerato*. McGraw-Hill Education.

Manuales universitarios de referencia

Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2014). *Fundamentos de física* (10.ª ed.). Wiley.

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2014). *Física para ciencias e ingeniería* (9.ª ed.). Cengage Learning.

Tipler, P. A., & Mosca, G. (2009). *Física para la ciencia y la tecnología* (6.ª ed.). Reverté.

Young, H. D., & Freedman, R. A. (2016). *Física universitaria con física moderna* (13.ª ed.). Pearson Educación.

Física moderna y nuclear

Beiser, A. (2003). *Conceptos de física moderna* (6.ª ed.). McGraw-Hill.

Krane, K. S. (2012). *Introducción a la física moderna* (2.ª ed.). Wiley.

Eisberg, R., & Resnick, R. (1985). *Física cuántica de átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas*. Limusa.

Obras clásicas y de contexto histórico

Newton, I. (1687/1998). *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (Ed. facsímil). University of California Press.

Einstein, A. (1916/2005). *Relativity: The Special and the General Theory*. Routledge.

Documentación oficial y normativa educativa

Ministerio de Educación y Formación Profesional. (2022). *Real Decreto 243/2022, de 5 de abril, por el que se establece la ordenación y las enseñanzas mínimas del Bachillerato*. BOE.

Ministerio de Educación y Formación Profesional. (2023). *Orientaciones para la evaluación de la materia de Física en Bachillerato*. MEFP.

Universidades públicas españolas. (2025). *Criterios generales de evaluación de la materia de Física en la PAU*. Comisiones de materia.

La presente bibliografía recoge manuales de uso habitual en Bachillerato y en los primeros cursos universitarios, así como textos clásicos y documentación oficial. Todas las obras citadas han servido como referencia conceptual y metodológica para la elaboración de este manual, adaptando siempre los contenidos y el nivel matemático a las exigencias específicas de la materia de Física de 2.º de Bachillerato y de la Prueba de Evaluación de Bachillerato para el Acceso a la Universidad.

ISBN 979-13-88025-41-9