

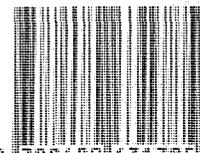
Manuales **GALAXIA**
BACHILLERATO · LOGSE

FÍSICA Y QUÍMICA. 1.º BACHILLERATO

FÍSICA 2.º BACHILLERATO

QUÍMICA 2.º BACHILLERATO

ISBN 84-8063-178-3



9 788480 631785

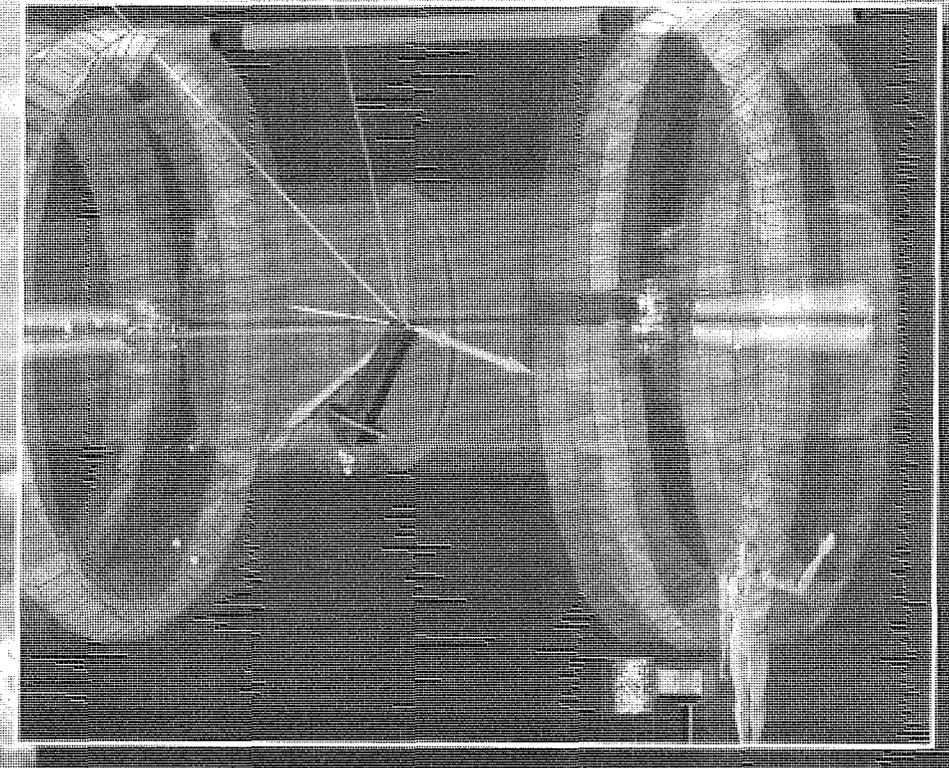
 ediciones
OCTAEDRO

ENSEÑANZA SECUNDARIA POSTOBLIGATORIA

FÍSICA

2.º BACHILLERATO

J. SOLBES - F. TARÍN



OCTAEDRO

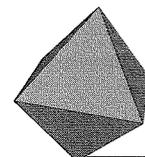
Jordi Solbes - Francisco Tarín

FÍSICA

2.º BACHILLERATO

ENSEÑANZA SECUNDARIA POSTOBLIGATORIA

Jordi Solbes

 **OCTAEDRO**

ADVERTENCIA PRELIMINAR

Los fragmentos de obras escritas o gráficas de otros autores que aparecen en el presente libro, tienen como única finalidad facilitar a los alumnos y alumnas el estudio del lenguaje en su medio de comunicación, y carecen, por tanto, de cualquier intención de promoción comercial o propagandística. Los comentarios sobre estos fragmentos escritos y los juicios críticos que se contienen en este trabajo, al tener un carácter docente, están protegidos por la disposición del artículo 32 de la ley sobre Propiedad Intelectual de 11 de noviembre de 1987 (B.O.E. del 17 de noviembre de 1987).

Primera edición: junio de 1996

© J. Solbes Matarredona, F. Tarín Martínez, 1996

© Derechos exclusivos de edición:
Ediciones OCTAEDRO, S.L.

C/ Bailén, 5, 5.ª - 08010 Barcelona

Tel.: (93) 246 40 02 Fax: (93) 231 18 68

Polígono Industrial San Cayetano, C/ Dalí, nave 13

18194 Churriana de la Vega (Granada)

Tel.: (958) 55 33 24 Fax: (958) 55 33 07

ISBN: 84-8063-178-3

Depósito legal: B. 24.922-1996

Diseño y realización: Servicios Gráficos OCTAEDRO

Impresión: Hurope s.l.

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del *Copyright*, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción parcial o total de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidas la reprografía y el tratamiento informático y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo público.

Impreso en España

Printed in Spain

ÍNDICE GENERAL

Introducción	5
Primera parte. El triunfo de la mecánica	7
1. Interacción gravitatoria	9
2. Vibraciones y ondas	27
Segunda parte. El poder unificador de la física: el electromagnetismo	45
3. Óptica	47
4. La interacción electromagnética	65
Tercera parte. La crisis de la física clásica y el surgimiento de la física moderna	45
5. Elementos de la física relativista	89
6. Elementos de la física cuántica	105
7. Física nuclear y de partículas	125

La Física de este nivel tiene dos objetivos básicos. Primero, adquirir los conocimientos conceptuales, metodológicos, etc., imprescindibles para aquéllos que vayan a seguir más tarde estudios superiores de ciencias e ingeniería. Segundo, contribuir a la formación cultural de los futuros ciudadanos, haciéndoles comprender desde gran parte de los dispositivos cotidianos hasta el cosmos en su globalidad y mostrándoles las **relaciones Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS)** y sus consecuencias en la vida humana y en el medio ambiente.

Para conseguir el primero de ellos, se introducen **actividades problemáticas**, que llevan a emitir hipótesis, elaborar y afianzar conocimientos, explorar alternativas, etc., superando la mera asimilación de conocimientos elaborados. Así mismo, se incluyen **trabajos prácticos y problemas** planteados como **pequeñas investigaciones**, que constituyen una ocasión para familiarizarse con la metodología científica y porque la resolución de problemas abiertos permiten resolver con menos dificultades los problemas con datos, que son simples concreciones de los abiertos. También se utiliza la **historia de la Ciencia** en cuadros y actividades para extraer de ella los problemas significativos y mostrar cómo se construyen y evolucionan los conceptos, modelos y teorías de la física. Por último, se introducen cuestiones y problemas de las **pruebas de selectividad** de la Física del Bachillerato de la Reforma y la LOGSE en las actividades complementarias, para familiarizarse con ellas.

Para conseguir el segundo objetivo se muestra, por un lado, el gran desarrollo de la ciencia en estos últimos años presentando **ideas actuales** en todos los temas, y no sólo en los de física moderna, mediante actividades o cuadros sobre la cosmología, la contaminación acústica,

las fibras ópticas, etc. Por otro lado, se introducen las relaciones CTS, mostrando el creciente impacto de la ciencia en la tecnología y de ambas en la sociedad, en la industria, los servicios, la agricultura, en la política (financiación estatal para la investigación), en el desarrollo de las ideas, en el medio ambiente, etc. Esto permite a los ciudadanos valorar críticamente las ventajas e inconvenientes de la ciencia en la vida del hombre, formarse opiniones justificadas y, en consecuencia, poder tomar decisiones al respecto.

La Física que estudiaremos este curso es una continuación de la vista del curso anterior. Se estructura en torno a tres grandes núcleos: la Mecánica, el Electromagnetismo y la Física moderna. Comenzaremos por completar el edificio teórico que supuso la Mecánica como primera ciencia moderna, realizando una introducción a la teoría de la Gravitación Universal, que permitió derribar la supuesta barrera entre el mundo sublunar y celeste. Seguidamente estudiaremos el movimiento ondulatorio para completar la imagen mecánica del comportamiento de la materia.

A continuación se aborda el estudio de la Óptica, para mostrar posteriormente su integración en el Electromagnetismo, que se convierte así, junto a la Mecánica, en el pilar fundamental del imponente edificio teórico que se conoce como Física clásica. Pero a su vez, esta gran concepción del mundo no pudo explicar una serie de fenómenos y esto originó el surgimiento de la Física moderna (Relatividad, Física cuántica y sus aplicaciones).

En resumen, deseáramos haber contribuido a mostrar la Física como una gran aventura del pensamiento humano y, en consecuencia, como un elemento fundamental de la cultura de nuestro tiempo. Así mismo, al mostrar el impacto social y medioambiental de la física, podemos comprender cómo, en un futuro próximo, las ciencias usadas solidariamente, pueden contribuir a la solución de algunos de los grandes problemas del mundo: la destrucción del medio ambiente, el agotamiento de materias primas y fuentes energéticas, el hambre, la enfermedad, etc., problemas que no se pueden resolver sólo con las ciencias, pero que no serán resueltos sin ellas.

El triunfo de la mecánica

En el curso anterior se abordó la Mecánica, sin detallar el estudio de las interacciones fundamentales, el cual se dejaba, precisamente, para este curso. Empezaremos con la Gravitación Universal, que correlacionó la nueva astronomía de Copérnico, Kepler, etc., con la nueva Dinámica de Galileo, Newton, etc., y que, al derribar la supuesta barrera entre el mundo terrestre y celeste, realizó la primera unificación o síntesis de la Física clásica.

Seguidamente estudiaremos las vibraciones y las ondas en muelles, cuerdas, superficies de líquidos, acústicas, etc., mostrando la potencia de la Mecánica para explicar el comportamiento de la materia.

Esta imagen mecánica explica fenómenos tan dispares como la caída de los cuerpos, la propagación de las ondas sonoras, el movimiento de los astros, los fenómenos caloríficos, etc., constituyéndose en uno de los pilares de la Física clásica.

El éxito de estas leyes durante más de dos siglos (desde mediados del siglo xvii hasta finales del xix) contribuyó a formar una nueva concepción sobre la materia, el mecanicismo, que influyó no sólo en las restantes ciencias, sino también en el pensamiento. Según esta concepción, el conocimiento de las ecuaciones de movimiento de un objeto permite predecir su posición, velocidad, etc., en cualquier instante. Es decir, se trata de una concepción claramente determinista. Subyacente a esta visión está la idea de que todo cambio puede, en último término, reducirse a movimientos mecánicos de las partículas que constituyen la materia.

1. Interacción gravitatoria

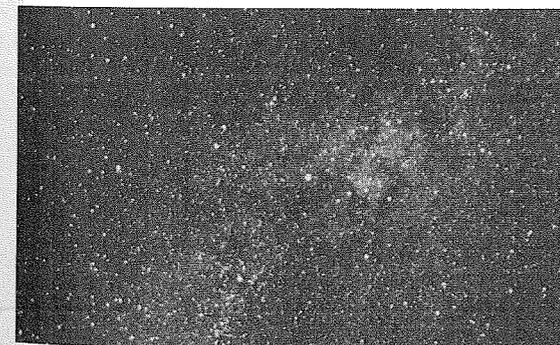
En este capítulo iniciamos el estudio de la gravitación. Fue la primera interacción conocida y estudiada, dado el papel que juega en nuestra vida diaria y el interés que desde antiguo el hombre ha manifestado por la astronomía.

Por ello se puede comenzar el tema con el estudio de la evolución de las concepciones del Universo, desde la antigua Grecia hasta las leyes de Kepler. Esto permite comprender la especial importancia de la ley de Newton de la Gravitación Universal, que terminó con la separación tajante, vigente durante siglos, entre la dinámica terrestre y la celeste, poniendo así fin al proceso de ruptura con la física aristotélica escolástica iniciado por Galileo, vista en cursos anteriores. Seguiremos el desarrollo que se expone a continuación:

1. Los orígenes de la teoría de la gravitación
2. La conservación del momento angular
3. Ley de Newton de la Gravitación Universal
4. Campo gravitatorio
5. Estudio energético de la interacción gravitatoria
6. Movimiento de planetas y satélites
7. La síntesis newtoniana y su extensión al Universo

1. Los orígenes de la teoría de la gravitación

En la actualidad la contaminación atmosférica y la luz de las ciudades impiden, a los que viven en ellas, la observación y el disfrute del cielo estrellado. Pero en la antigüedad la observación y el estudio del movimiento de los astros jugó un papel muy importante en todas las culturas de Oriente y Occidente. Podemos encontrar ejemplos de ello en textos como el siguiente:



A.1 “(Ulises) comenzó a regir hábilmente la nave con el timón,...., fijos los ojos en las Pléyades y el Boyero, que se pone muy tarde, y la Osa, llamada por sobrenombre el Carro, la cual gira siempre en el mismo lugar, acecha a Orión y es la única que no se baña en el océano. Pues Calipso, insigne entre las diosas, le había ordenado que tuviera la Osa a mano izquierda durante la travesía”. (Odisea, canto V, 262-282).

Mencionar dos usos de la astronomía en la antigüedad que aparecen en el texto. ¿Conoces otros?

Sin detenernos en todos los antiguos modelos del Universo, nos centraremos en el modelo aristotélico/ptolemaico del Universo, por su vigencia durante casi 20 siglos.

A.2 Los antiguos griegos sostenían que la Tierra era el centro inmóvil del Universo y que los astros como el Sol, la Luna, etc., se movían alrededor de ella. Indicar observaciones que parezcan apoyar esa concepción.

El siguiente texto muestra las características esenciales del modelo geocéntrico: "Ordenaba los cuerpos celestes hacia afuera, desde la Tierra, según sus periodos aparentes de revolución; a saber, la Luna, el Sol, Venus, Mercurio, Marte, Júpiter y Saturno... la esfera externa de las estrellas fijas era movida por el Primum Mobile... Las cosas por debajo de la Luna estaban hechas a base de los cuatro elementos terrestres: tierra, agua, aire y fuego. Los cielos estaban formados por un quinto elemento más puro, la quintaesencia. Los cuerpos celestes eran incorruptibles y eternos, así como sus movimientos que eran consiguientemente circulares y uniformes. En la Tierra se daba generación y corrupción, por lo que los movimientos terrestres eran rectilíneos y tenían principio y fin." (Mason, vol 1, pp 49-50).

A.3 Comentar en clase el fragmento. ¿Por qué esta concepción se mantuvo en la Europa medieval?

El modelo geocéntrico no fue superado fácilmente. Aunque hubo precursores, como Aristarco de Samos (s. III a. C.), el modelo heliocéntrico fue elaborado por Nicolás Copérnico (1473-1543), nacido en Torun (Polonia). Durante los años 1496-1506 estudió en Italia, cuyo ambiente intelectual favoreció la concepción del nuevo sistema del mundo. En 1543 se publicó el libro *De revolutionibus orbium coelestium* ("Acerca de las revoluciones de las esferas celestes") donde se expone el modelo heliocéntrico.

Un partidario del sistema copernicano fue el astrónomo alemán Johannes Kepler (1571-1630) que en 1600 trabajó con el astrónomo danés Tycho Brahe (1546-1601) cuyos datos utilizó para perfeccionar el sistema heliocéntrico. Encontró que las posiciones de Marte no se ajustaban a las órbitas circulares de Copérnico. Esto le llevó a enunciar, tras años de trabajo, las leyes que llevan su nombre (en 1609 la primera y la segunda, y en 1618 la tercera):

- 1ª: Todos los planetas se mueven en órbitas elípticas, ocupando el Sol uno de los focos.
- 2ª: La línea imaginaria que une un planeta con el Sol recorre áreas iguales en tiempos iguales.
- 3ª: Entre el período T de un planeta dado y el radio medio de su órbita r se cumple la relación

$$T^2 = kr^3$$

A.4 Comprobar que se cumple la tercera ley de Kepler con datos que figuran en la tabla siguiente, relativos a los planetas conocidos en la época de Kepler. (Las masas fueron conocidas después de que Cavendish determinase la constante de gravitación.)

Planeta	Masa (kg)	Distancia media al Sol (km)	Período orbital (días terrestres)
Mercurio	$3,34 \cdot 10^{23}$	$5,79 \cdot 10^7$	88
Venus	$4,87 \cdot 10^{24}$	$1,08 \cdot 10^8$	225
Tierra	$5,98 \cdot 10^{24}$	$1,50 \cdot 10^8$	365,25
Marte	$6,42 \cdot 10^{23}$	$2,28 \cdot 10^8$	687
Júpiter	$1,90 \cdot 10^{27}$	$7,78 \cdot 10^8$	4332
Saturno	$5,69 \cdot 10^{26}$	$1,43 \cdot 10^9$	10760

Comprobar si el valor obtenido de la constante de la tercera ley de Kepler coincide con el del sistema Tierra-Luna

Satélite	Período orbital (días terrestres)	Distancia a la Tierra (km)
Luna	27,32	$3,84 \cdot 10^5$

Otra gran contribución al nuevo modelo fueron las observaciones astronómicas de Galileo (1564-1642) publicadas en latín en el libro *Sidereus Nuncius* (El mensajero celestial, 1610). Amplía los argumentos en favor del sistema copernicano en su gran obra "Diálogo sobre los dos grandes sistemas del mundo" (1632).

A.5 El telescopio le permitió a Galileo observar la existencia de cráteres y montañas en la Luna, descubrir satélites de Júpiter (que denominó estrellas mediceas, para halagar al duque de Toscana, Cosme de Médicis), observar que las estrellas fijas siguen siendo puntuales como a simple vista, etc. ¿Por qué estas observaciones supusieron un importante apoyo a la teoría heliocéntrica? ¿Qué papel jugó el telescopio que él mismo construyó?

Cuadro 1

La oposición a la revolución copernicana

El modelo heliocéntrico fue muy atacado durante más de cien años. Entre los argumentos de tipo físico contra el movimiento de la Tierra se pueden señalar los siguientes: los objetos, incluida la atmósfera, saldrían despedidos; un objeto dejado caer verticalmente desde una torre chocaría con la pared o se alejaría de ésta; se observaría paralaje de las estrellas fijas, etc.

En contra del modelo se utilizaron, además, textos de la Biblia como el que afirma que el Sol se detuvo y la Luna se paró (Josué 10, 13). Esta interpretación literal de la Biblia se ha continuado utilizando en contra de las teorías científicas sobre el origen del hombre o la edad de la Tierra.

Pero los defensores del geocentrismo no se limitaron a los argumentos, y sus oponentes fueron sometidos a persecuciones. Aunque Copérnico se libró de ellas al publicar su libro el mismo año de su muerte, Martín Lutero le tachó de loco y hereje y la iglesia católica incluyó las *Revoluciones* en el "Índice de libros prohibidos".

Giordano Bruno, con su defensa de la infinitud del Universo y de la existencia de un gran número de mundos habitados, no se limitaba a sustituir el geocentrismo por el heliocentrismo, sino que eliminaba toda clase de antropocentrismo. Fue sometido a torturas para que abjurase y al no hacerlo, fue quemado en la hoguera en el año 1600.

Al publicar Galileo en latín observaciones astronómicas en favor del sistema copernicano en el libro *Sidereus Nuncius* (1610), fue advertido por la Inquisición, que le prohibió publicar sobre dicho tema.

Cuando en 1632 publica su obra *Diálogo sobre los dos grandes sistemas del mundo* (1632), en italiano y en forma de diálogo, haciéndola accesible a la sociedad, se inicia su persecución pese a su edad avanzada. Fue juzgado por la Inquisición, amenazado con tortura, obligado a renunciar a sus ideas (su abjuración fue leída públicamente en todas las iglesias de Italia) y con-

finado, hasta su muerte en 1642, en una villa en el campo. En este encierro escribió *Discursos y demostraciones sobre dos nuevas ciencias pertenecientes a la mecánica y el movimiento global* que se publicó en Holanda, dado que en Italia sus libros estaban prohibidos.

El *Diálogo* fue incluido en el "Índice", donde permaneció junto al de Copérnico y otro de Kepler hasta 1835. Esta condena de las teorías de Galileo se ha prolongado hasta la actualidad. El Vaticano no anunció hasta 1968 la conveniencia de anularla y la ha hecho efectiva en 1992.

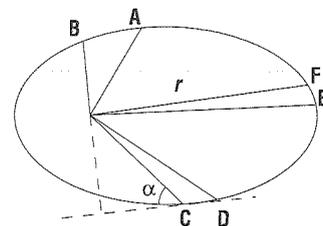
Otros científicos eludieron las persecuciones indicando que el sistema heliocéntrico era más eficaz para hacer los cálculos, pero no era un modelo de la realidad, postura similar a la mantenida este siglo por los positivistas.

- C.1 Intenta refutar los argumentos, tanto ideológicos como científicos, que se utilizaron contra el modelo heliocéntrico.
- C.2 Busca más información bibliográfica sobre los casos de Galileo, Bruno, etc. ¿Conoces otros científicos que hayan sido objeto de persecución en fechas más recientes?

2. La conservación del momento angular

Como ya vimos el curso anterior, el estudio del movimiento curvilíneo se ve facilitado por la introducción de nuevas magnitudes.

- A.6 Si un cuerpo de masa m se mueve con una velocidad v , se puede caracterizar su cantidad de movimiento por mv . Proponer una expresión que indique el momento angular (cantidad de movimiento angular) de un cuerpo que gira alrededor de un eje.
- A.7 De la misma forma que una fuerza produce una variación en la velocidad de un cuerpo que se traslada, existe una magnitud que produce la variación de la velocidad angular de un cuerpo que gira. Indicar, a título de hipótesis, una expresión para dicha magnitud.
- A.8 Cuando se aplica una fuerza a un cuerpo se produce un cambio en su cantidad de movimiento, de acuerdo con la segunda ley de Newton. Proponer, a título de hipótesis, una ecuación equivalente para un cuerpo que gira alrededor de un eje. Comprobar que es correcta teniendo en cuenta las definiciones de las actividades anteriores.
- A.9 A partir de la expresión introducida en la actividad anterior, establecer las condiciones en las que se conserva el momento angular.
- A.10 Si se tiene en cuenta que el área definida por el radio de la órbita de un planeta al desplazarse dr viene dada por $dS = r \times dr/2$, relacionar la segunda ley de Kepler con el momento angular. Extraer conclusiones.
- A.11 Calcular el momento angular orbital de los planetas que figuran en la tabla de la actividad A.4. La máxima distancia orbital de Venus es 109.106 km y la mínima 107,5.106 km. Calcular la relación que existe entre las velocidades en esos dos puntos.



3. Ley de Newton de la Gravitación Universal

Pese al gran avance que supusieron los trabajos de Galileo en cinemática, en astronomía y en la clarificación y utilización del método experimental y matemático, no fue capaz de desarrollar una dinámica y unificar los movimientos en la superficie terrestre y en el cielo. Fueron necesarios los trabajos previos de Kepler, Huygens, Hooke y Halley, para que Newton llegara a establecer la síntesis entre la mecánica terrestre y celeste. Esto es una evidencia más del carácter colectivo y acumulativo del trabajo científico.

Cuadro 2
La física en el siglo xvii

Después de la muerte de Galileo se produce un gran florecimiento de las ciencias físicas. Destacan los trabajos sobre vacío y gases del italiano Torricelli (1608-1647), del francés Pascal (1623-1662), del inglés Boyle (1627-1691) y del alemán Guericke (1602-1686); los estudios del francés Descartes (1596-1650) sobre geometría analítica y óptica; los trabajos del holandés Huygens (1629-1695) en astronomía (construyó un telescopio con el que descubrió un satélite de Saturno), sobre las colisiones elásticas y el péndulo (inventó el primer reloj práctico de péndulo) y la teoría ondulatoria de la luz; el tratado de Newton (1642-1727) sobre óptica y la invención del cálculo simultáneamente con el filósofo y matemático alemán Leibniz (1646-1716); los trabajos del inglés Hooke (1635-1703) sobre elasticidad; etc.

Pero no se trata de científicos aislados. En estos años se constituyen una serie de Sociedades Científicas como la Academia del Cimento en Florencia en 1657 bajo el patrocinio de los Medici; la Royal Society de Londres en 1662, por iniciativa autónoma de un centenar de científicos; la Academia de las Ciencias de París en 1666, por iniciativa real y cuyos veinte miembros recibían del rey Luis XIV un salario.

En los cincuenta años siguientes los científicos siguieron abordando el problema de la gravitación. En el siglo xviii Descartes, que identificaba la materia con el volumen, negaba que pudiese existir el vacío. Consideraba que había tres clases diferentes de materia en el Universo. El elemento fuego formaba el Sol y las estrellas. El espacio interestelar lo constituía el aire o elemento etéreo. Los planetas y satélites pertenecían a la tercera clase: el elemento tierra. El Sol ocupaba el centro de un vórtice formado por la primera clase de materia. El movimiento de rotación de dicho vórtice arrastraba a la Tierra y a los planetas. Los vórtices de la Tierra y de Júpiter, que tenían un tamaño más pequeño que los del Sol, arrastraban a la Luna y a los satélites de Júpiter.

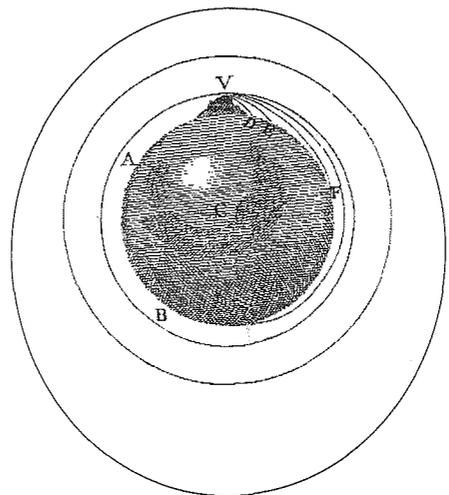
Huygens introdujo la fuerza centrípeta en 1673. Los ingleses Hooke, Halley (1656-1742) y Wren (1632-1723), a partir de la fuerza centrípeta y de la tercera ley de Kepler, dedujeron la Ley del Inverso del Cuadrado de la Distancia hacia 1679 y, a petición de éstos, Newton culminó sus trabajos en el libro *Principios Matemáticos de la Filosofía Natural* (1687).

- C.1 Indicar razones del gran desarrollo de las ciencias a partir del siglo xvii y del desplazamiento geográfico del protagonismo científico desde Italia, Alemania, España, etc., a Inglaterra, Holanda y Francia.

Con la nueva concepción de fuerza, el problema de los movimientos de los cuerpos celestes se planteaba de otra forma. Efectivamente, cualquier cuerpo que no tenga un movimiento rectilíneo y uniforme estará sometido a fuerzas. Así pues, es lógico plantearse qué fuerza debe estar actuando sobre la Luna para que describa su órbita.

Según señala Newton en los *Principia*: "El que los planetas puedan ser retenidos en sus órbitas es algo que podemos comprender fácilmente si consideramos los movimientos de los proyectiles. En efecto, una piedra arrojada, por su propio peso, se ve forzada a abandonar la trayectoria rectilínea... viéndose obligada a describir una línea curva en el aire, y merced a ese camino torcido se ve finalmente llevada al suelo. Y cuanto mayor sea la velocidad con que se proyecta, más lejos va antes de caer a tierra. Podemos suponer por tanto que la velocidad se incrementa de tal modo que describa un arco de (muchas) millas antes de llegar a la Tierra, hasta que finalmente, excediendo de los límites de la Tierra, pasará totalmente sin tocarla".

A.12 Representar la fuerza que debe actuar sobre la Luna. Idem para un proyectil. Representa también las fuerzas de reacción correspondientes. ¿Por qué la Luna no cae sobre la Tierra como el proyectil?



A.13 Señalar, a título de hipótesis, de qué depende la fuerza gravitatoria entre dos cuerpos.

Conviene detenerse en este momento mostrando los sucesivos pasos que llevaron a esta ley, para no dar una imagen excesivamente simplificadora de la ciencia que olvide las mayores contribuciones de Newton. En primer lugar demostró la necesidad de fuerzas; después, que las fuerzas deberían ser centrales para que la velocidad aerolar fuese constante (en otras palabras, para que se conservase el momento angular); en tercer lugar, que las fuerzas deberían variar con la inversa del cuadrado de la distancia para que la trayectoria descrita por cuerpos fuese cónica (elipse, circunferencia, parábola o hipérbola); y, por último, que las fuerzas eran debidas a las masas de los cuerpos. Además, tuvo que probar que la masa extensa de la Tierra producía la misma fuerza de atracción que si toda su masa se hallase concentrada en el centro. Para ello necesitó inventar, independientemente de Leibniz, el cálculo integral y diferencial, que denominó cálculo de fluxiones.

Señalar por último, que Newton tuvo disputas de prioridad con Hooke por el descubrimiento de la ley $1/r^2$ y con Leibniz por el del cálculo. Es un ejemplo más del carácter conflictivo y colectivo de la ciencia. Newton era sólo uno de los muchos científicos que trabajaban en el mismo problema, contribuyendo independiente y simultáneamente a su solución.

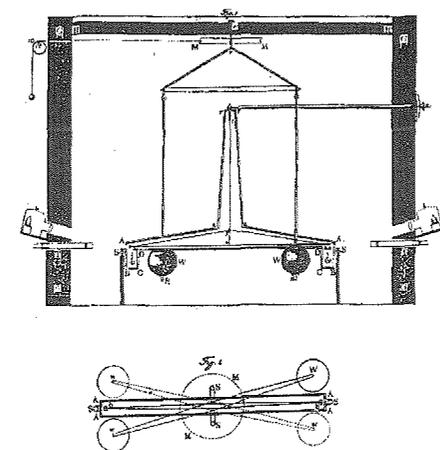
La verificación experimental de la ley de la Gravitación encontraba la dificultad de que no se conocía la masa de los astros. De manera que, como es frecuente en la ciencia, Newton tuvo que recurrir a una verificación indirecta, es decir, a la comprobación de alguna consecuencia de la ley.

A.14 Considerando circulares, en primera aproximación, las órbitas de los planetas y teniendo en cuenta que la fuerza centrípeta que actúa sobre los mismos sería debida, según Newton, a la atracción gravitacional por parte del Sol, deducir la relación entre el período de un planeta y su distancia al Sol. Compararla con el resultado experimental (tercera ley de Kepler).

A.15 Aplicando un método similar al de la actividad anterior, Newton dedujo el período de rotación de la Luna (L) alrededor de la Tierra (T). Los únicos datos de que disponía eran el radio de T (RT) (unos 6370 km), la distancia T-L (60 RT) y el valor de g (9,8 ms⁻²), que permite obtener el valor del producto GMT (cuyos valores respectivos eran desconocidos en la época de Newton). Realizar dicha deducción y comparar el resultado con el experimental de la tabla de la actividad A.4.

A pesar de la debilidad de las fuerzas gravitatorias para cuerpos utilizables en el laboratorio, unos cien años después, Cavendish (1731-1810) realizó la verificación experimental directa de la ley de Newton y, consiguientemente, determinó la constante de la gravitación universal G.

A.16 Sugerir algún montaje experimental para medir directamente la fuerza de atracción gravitatoria entre dos cuerpos.



Una vez conocido el valor de G podemos determinar la masa de la Tierra. Por ello se dice que Cavendish fue el primer hombre que "pesó" la Tierra. Además, con la tercera ley de Kepler podemos calcular la del Sol o cualquier planeta con satélites (cuyo período T y distancia r con respecto al planeta conozcamos). El cálculo de la masa de los satélites (incluyendo la Luna) y la de los planetas que no tienen satélites (Mercurio, Venus) no es sencillo.

A.17 Determinar la masa de la Tierra, la del Sol (ver los datos necesarios en la tabla de la actividad A.4.) y la de Saturno cuyo satélite Ganimedes tiene un T = 7,15 días y un r = 1,07.10⁶ km. (Radio de la Tierra = 6370 km).

Otras consecuencias de la ley de Gravitación Universal, desarrolladas en su mayor parte por el propio Newton, se refieren a las pequeñas perturbaciones en la trayectoria de la Luna, las mareas oceánicas, el achatamiento en los polos de los planetas y las distintas trayectorias que pueden describir los cometas.

Las perturbaciones lunares se pueden explicar por la influencia gravitatoria de los restantes cuerpos del sistema solar; las mareas porque la Luna (y en menor proporción el Sol) atraen la parte más próxima del océano y tienden a elevar las aguas; la forma de esferoide achatado al efecto combinado de la gravitación (que formaría esferas a partir de la materia inicialmente dispersa) y de la rotación alrededor del eje (ensanchamiento en el ecuador y aplastamiento en los polos).

Por último, si los cometas son periódicos, su trayectoria será una elipse muy excéntrica. El más famoso de ellos es el cometa que E. Halley estudió cuando apareció en 1682 y para el que predijo un período de aproximadamente 75 años. Su vuelta en 1756 y tres veces más desde entonces, tras recorrer una amplia elipse que se extiende más allá del último planeta, fue interpretada como un importante triunfo de la mecánica newtoniana. Si los cometas no son periódicos, su trayectoria será abierta, es decir, una hipérbola o una parábola.

4. Campo gravitatorio

Newton escribió: "Es inconcebible que la materia bruta inanimada, sin la mediación de algo más, que no sea material influya y afecte a otra materia sin contacto mutuo... Una gravedad... tal que cualquier cuerpo pueda actuar sobre otro a distancia, a través del vacío, sin la mediación de algo más, a través de lo cual pueda conducirse la acción y la fuerza, es para mi un absurdo tan grande que no creo exista un hombre que con facultad de pensamiento sobre materias filosóficas pueda creer en ello. La gravedad debe estar causada por un agente que actúa constantemente según ciertas leyes" (citado por Holton, 1976).

- A.18** La idea newtoniana de acción a distancia entre los cuerpos presenta una serie de dificultades que no pasaron desapercibidas al propio Newton. Indicar alguno de dichos problemas
- A.19** ¿Cómo tendrá lugar la interacción de cuerpos distantes entre sí?
- A.20** Introducir una magnitud que nos permita medir la intensidad de campo.
- A.21** Determinar la intensidad del campo creado por una masa puntual M y por dos masas puntuales.

El campo gravitatorio se puede representar gráficamente trazando líneas tangentes al vector intensidad de campo en distintos puntos. Son las llamadas **líneas de campo**.

- A.22** Trazar las líneas de campo de una masa puntual M .
- A.23** Obtener la expresión de la intensidad del campo gravitatorio en la superficie terrestre y a una altura h de la misma.
- A.24** Diseñar una experiencia para determinar el campo gravitatorio en la superficie terrestre.
- A.25** Realizar la práctica y analizar los resultados.
- A.26** Determinar la intensidad del campo gravitatorio en la superficie de la Luna. Comparar el peso en la Luna de un hombre de 70 kg con el que tendría en la Tierra. (Datos: M_L es 81 veces menor que la M_T ; su radio es 3,66 veces menor).
- A.27** ¿En qué punto entre la Tierra y la Luna será nulo el campo gravitatorio debido a ambos cuerpos? (Datos: $R_T = 384.000$ km; $M_L = 0,012$ M_T).

5. Estudio energético de la interacción gravitatoria

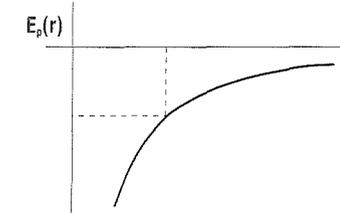
Los conceptos de trabajo y energía van a permitir abordar las manifestaciones energéticas de la interacción gravitatoria, es decir de la relación entre el trabajo que se realiza al desplazar una masa en un campo gravitatorio y las variaciones de energía que se producen.

- A.28** Calcular el trabajo realizado por las fuerzas gravitatorias cuando un cuerpo de masa m se desplaza desde r_1 a r_2 en el campo creado por otra masa M . Dar la variación de la energía potencial del sistema que tiene lugar.
- A.29** Obtener la expresión de la energía potencial gravitatoria en un punto cualquiera del campo creado por M sobre m , tomando como origen de la energía potencial la separación infinita de las masas ($E_p(r \rightarrow \infty) = 0$).

Con referencia a la energía potencial es necesario realizar dos puntualizaciones: el origen de potencial puede ser asignado al punto que se desee. Así, en la conocida expresión $E_p = mgh$, se toma como origen la superficie de la Tierra ($E_p(h=0) = 0$). Este hecho no influye en los resultados físicos, p.ej., en el trabajo, porque se calculan variaciones de energía potencial. Así, en ambos casos, y esto es lo que verdaderamente importa, cuando se aleja un cuerpo de la Tierra, la energía potencial aumenta.

Por otra parte, la energía potencial no es una propiedad del cuerpo de masa m . En efecto, en la expresión aparece la masa M del cuerpo con el que interacciona. Es decir, la energía potencial es debida a la interacción entre las masas, o en otras palabras, al campo gravitatorio. De hecho la energía potencial se asigna a los puntos del espacio que rodea a M , es decir, al campo creado por M .

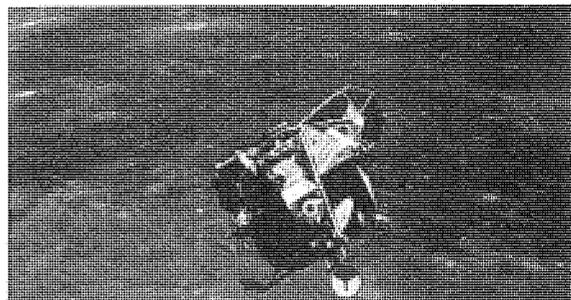
- A.30** La siguiente gráfica muestra la variación de la energía potencial del sistema formado por dos masas en función de la distancia que existe entre ellas. Analizar dicha gráfica. Señalar en qué condiciones dos masas podrán formar un sistema ligado. ¿Cuándo pueden considerarse libres?



- A.31** Mostrar que la expresión que nos da la variación de la energía potencial entre dos puntos $\Delta E_p = -GMm/r_2 + GMm/r_1$ es equivalente a $\Delta E_p = mg\Delta h$ para distancias pequeñas sobre la superficie terrestre, siendo $\Delta h = r_2 - r_1$ y pudiendo considerarse $r_1 = R_T$ y $r_2 \sim R_T$. ¿Dónde estaría en este caso el origen de la energía potencial?
- A.32** Introducir una nueva magnitud que juegue desde el punto de vista energético el mismo papel que la intensidad del campo gravitatorio con respecto a las fuerzas. ¿Qué relación tiene esa magnitud con el campo gravitatorio?
- A.33** Obtener la expresión del potencial de una masa puntual M .
- A.34** Representar el campo gravitatorio de una masa puntual M mediante superficies que unan los puntos que se encuentran al mismo potencial (**superficies equipotenciales**). Mostrar que las líneas de campo han de ser perpendiculares a dichas superficies.
- A.35** Elaborar un mapa conceptual de las principales magnitudes y relaciones introducidas para el estudio del campo gravitatorio.
- A.36** Cuando se consideran pequeñas porciones de la superficie terrestre, el campo gravitatorio puede considerarse prácticamente uniforme. Representar las líneas de dicho campo y algunas superficies equipotenciales.

6. Movimiento de planetas y satélites

En 1957 los soviéticos pusieron en órbita el satélite Sputnik y en 1961 Yuri Gagarin permaneció durante 1 h 40 m en órbita alrededor de la Tierra. El primer paseo espacial de Alexéi Leonov se realizó en 1965. Este hecho produjo una fuerte conmoción en los EE.UU. La llegada de Armstrong y Aldrin a la Luna tuvo lugar el 21 de junio de 1969, y el primer vuelo del transbordador espacial en 1981. Desde entonces el espacio se ha convertido en un lugar concurrido. Son ya millares los satélites en órbita (sin olvidar los restos de cohetes, fragmentos de satélites, etc. situados a unos 2.000 km de altura, de los cuales los radares tienen localizados sólo unos 7.000).



A 37 ¿Para qué se ponen en órbita los satélites?

A 38 Existen satélites, llamados geoestacionarios, cuyo período de rotación alrededor de la Tierra es de 24 horas. ¿Es posible que dicho satélite esté fijo sobre la vertical de un punto cualquiera del globo?

Vamos a aplicar algunas de las ideas estudiadas en este capítulo para abordar el problema de la colocación de satélites en órbita alrededor de un planeta.

A 39 ¿Qué energía será necesaria para poner un satélite en órbita lanzándolo desde la superficie de la Tierra?

A 40 ¿Cuál será la velocidad de escape que se tendrá que comunicar a un satélite? (La **velocidad de escape** es la mínima velocidad necesaria para que el satélite escape del campo gravitatorio, partiendo de la superficie).

A 41 Determinar el radio de la órbita de un satélite geoestacionario y su energía.

En los problemas anteriores se pone de manifiesto que a mayor velocidad (o menor período) en la órbita, menor altura. Es interesante mostrar la coherencia de este hecho con la tercera ley de Kepler y con la conservación de la energía (cuanto mayor es la energía cinética, menor es la potencial) ya vistos. Por último, conviene señalar que las moléculas de nitrógeno y oxígeno tienen una velocidad media inferior a la velocidad de escape y el hidrógeno, mayor. Por tanto el campo gravitatorio terrestre es el responsable de que exista una atmósfera formada por los primeros gases.

A 42 ¿Por qué los cohetes se lanzan desde puntos de la superficie terrestre próximos al Ecuador?

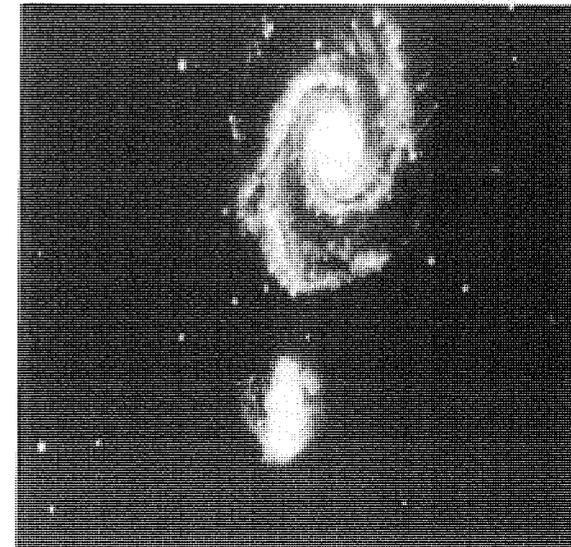
A 43 En los medios de comunicación suelen aparecer expresiones como: "Un astronauta en un satélite en órbita terrestre se encuentra en estado de ingravidez, no pesa". Comentar dicha afirmación.

A 44 ¿Existen diferencias entre el estado de movimiento de un astronauta en una nave en órbita alrededor de la Tierra y una persona en un ascensor que cae libremente?

7. La síntesis newtoniana y su extensión al Universo

La publicación de los *Principios* de Newton (1686) permitió conocer mejor el mundo en que vivimos y el movimiento y la posición de los cuerpos en el Sistema Solar, regidos por las mismas leyes que los cuerpos terrestres.

Hasta la actualidad se han producido una serie de descubrimientos astronómicos relacionados con la ley de Gravitación que han puesto de manifiesto su carácter universal. Así, por ejemplo, el descubrimiento de nuevos planetas a partir de las perturbaciones que producen en sus órbitas los planetas ya conocidos: las irregularidades en la órbita de Urano, descubierta en 1781 por Herschel, condujeron al descubrimiento de Neptuno en 1846 por Leverrier y Adams; por las perturbaciones que producía en este último fue descubierta Plutón en 1930 por Tombaugh.



Hacia 1784 Herschel mostró que las estrellas observables constituían un sistema con forma de lente, es decir, una galaxia. El mismo Herschel observó en 1803 que algunas parejas de estrellas próximas giran una alrededor de la otra (estrellas binarias), según la ley de la gravitación. También se observó (Halley en 1714, Messier en 1781) que las estrellas tienden a agruparse por efecto de la gravitación, formando cúmulos globulares y abiertos.

Por último, desde que en 1923 Hubble, director del Observatorio del Monte Wilson, mostró la existencia de otras galaxias, se ha observado que éstas se agrupan en cúmulos y supercúmulos galácticos.

A 45 ¿Qué ponen de manifiesto estos descubrimientos?

A 46 Enumera las interacciones que conozcas. ¿Por qué a escalas astronómicas la interacción dominante es la gravitatoria?

Cuadro 3 Origen y evolución del Universo

Según la teoría del "big bang" el Universo se originó a partir de un núcleo inicial que contenía toda la materia y la energía del Universo actual. Las condiciones tan particulares de dicho objeto tuvieron como consecuencia que su densidad, temperatura y gravedad alcanzaran valores máximos (aproximadamente unos $4 \cdot 10^9$ kg/l y 10^{11} °C).

Como resultado de la gran explosión inicial, empezó la expansión del Universo (no se trata de que el núcleo proyectase violentamente hacia el exterior toda la materia que contenía sino de

que el espacio se crea en la expansión). Al mismo tiempo que se expandía, se formaron las partículas elementales, los átomos sencillos (hidrógeno, deuterio, helio), las galaxias, estrellas y sistemas solares y, finalmente, la vida.

La teoría del "big bang" predice tres hechos:

1) **La existencia de la radiación de fondo de microwndas.** El Universo primitivo se encontraba a una temperatura muy elevada por lo que emitió energía en forma de radiación de pequeña longitud de onda. Como consecuencia de la expansión del Universo, esa radiación debería ser observada muy desplazada hacia el rojo, es decir, con una longitud de onda muy grande. Por otra parte, la radiación de fondo debería llegar a la Tierra con la misma intensidad procedente de todas las direcciones, de forma isotrópica. En 1964 A. Penzias y R. Wilson confirmaron la existencia de una radiación isotrópica de muy pequeña longitud de onda, correspondiente a una temperatura aproximada de 3 K.

2) **La separación de las galaxias.** Como consecuencia de la explosión inicial, las galaxias del Universo deberían separarse entre ellas. P. Hubble descubrió en 1929 que las líneas espectrales de las galaxias estaban desplazadas hacia longitudes de onda mayores (desplazamiento hacia el rojo). Este hecho demostró que las galaxias se alejaban de la Tierra tal como predice la teoría del "big bang".

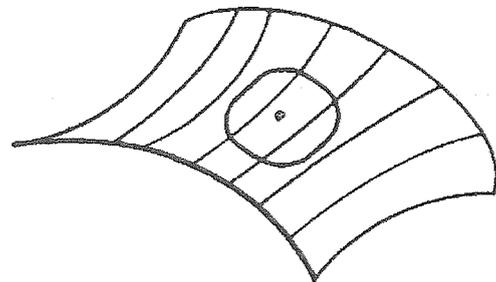
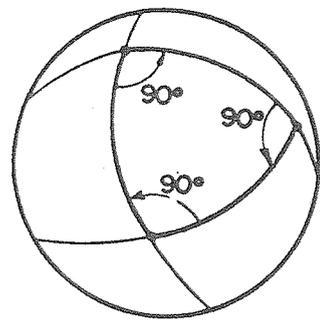
3) **La formación de núcleos ligeros.** En los primeros minutos del Universo se formaron núcleos ligeros: aproximadamente tres cuartas partes de hidrógeno, una cuarta parte de helio y pequeñas cantidades de deuterio y tritio. El análisis de la abundancia relativa de dichos núcleos coincide con la que predice la teoría del "big bang".

Tomando como base la Teoría General de la Relatividad de Einstein, Alexander Friedmann elaboró en 1922 un modelo de evolución del Universo que estaba de acuerdo con el desplazamiento hacia el rojo de las galaxias descubierto posteriormente por Hubble. El modelo de Friedmann se generalizó y se propusieron tres modelos evolutivos.

El primer modelo predice un Universo que se expande indefinidamente. La cantidad de materia que contiene no es suficiente para equilibrar la expansión por medio de la fuerza gravitatoria. El Universo es, por tanto, abierto e infinito. Corresponde a una geometría espacio-tiempo de curvatura negativa como la de una silla de montar.

En el segundo modelo, la evolución del Universo corresponde a una expansión en la que la velocidad de separación de las galaxias disminuye gradualmente aunque no llega a ser nula. Como consecuencia, el Universo es infinito. La geometría espacio-tiempo pertenece al tipo plano: geometría euclídea.

Cuando la fuerza de atracción gravitatoria de la materia del Universo alcanza un valor lo suficientemente grande como para detener la expansión y volver al estado original, se tiene el tercer tipo evolutivo de Friedmann. La geometría que implica este modelo corresponde a una de curvatura positiva como la de una esfera. El Universo tiene un volumen infinito pero es cerrado.



De acuerdo con lo anterior se puede concluir que la masa que contiene el Universo determina su evolución de acuerdo con uno de los tres modelos citados. En Cosmología se acostumbra a no utilizar la masa sino la relación entre la densidad de la materia del Universo y la llamada "densidad crítica". Dicha relación se simboliza por la letra Ω . La "densidad crítica" se refiere a la que tendría un universo que evolucionara de acuerdo con el segundo modelo de Friedmann. Según la Teoría General de la Relatividad, dicha "densidad crítica" tiene un valor de 10^{-30} g/cm³. Por tanto, si Ω es menor que 1, el Universo tendrá una evolución como la descrita por el modelo uno y si el valor de Ω es mayor que 1, la evolución será la correspondiente al modelo tercero.

Después de realizar medidas reales de la masa de las galaxias contenidas en un volumen determinado del Universo, se ha obtenido para Ω un valor de 0,1 lo cual implica que nuestro Universo evolucionaría de acuerdo con el modelo uno, es decir se expandiría indefinidamente. Sin embargo, investigaciones recientes han puesto de manifiesto la existencia de "materia oscura" que no se había computado con anterioridad. En la actualidad no se conoce con exactitud el valor de Ω y no se puede asegurar si nuestro Universo es abierto, cerrado o plano ni su evolución futura.

A.47 Recoger, a lo largo del curso, noticias de prensa sobre el tema de gravitación, astronomía y cosmología y comentarlas en clase. Recopilar, así mismo, recortes de prensa sobre los restantes temas del curso y utilizarlos al tratar dichos temas.

1 "Entre el movimiento de una bola de cañón lanzada horizontalmente y el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra, no existen diferencias esenciales (si el rozamiento fuera despreciable); se pueden estudiar utilizando las mismas leyes físicas, sobre ambos actúa únicamente la fuerza de atracción gravitatoria de la Tierra, ... Incluso si la bala se lanzara con mucha velocidad (y no chocara con obstáculo alguno), llegaría a describir órbitas alrededor de la Tierra del mismo modo que la Luna".

Comentar estas frases, razonando pormenorizadamente si se está o no de acuerdo con ellas.
(Selectividad. 1988)

2 Calcular el radio medio de la órbita de Urano sabiendo que su período es 84,2 veces mayor que el de la Tierra. (Radio medio de la órbita de la Tierra = $1,50 \cdot 10^{11}$ m).

3 a) Conociendo la distancia Tierra-Luna y el período de revolución de la Luna en torno a la Tierra, ¿cómo se podrá conocer el radio de la órbita de un satélite artificial de período conocido?
b) La Luna describe una órbita circular en torno a la Tierra, con un período de 27,3 días y un radio orbital de $3,84 \cdot 10^5$ km. A partir de estos datos, determinar el radio de la órbita de un satélite artificial que se encuentra siempre sobre un mismo punto de la Tierra.
(Selectividad. 1990)

4 Un astronauta llega a Marte y observa que su peso (con todo el equipo) es de 450 N, mientras que en la Tierra es de 1200 N. Sabiendo que la masa de la Tierra es $6 \cdot 10^{24}$ kg, que el radio de la Tierra es 6370 km y que el radio de Marte es de 3400 km, se pide:

a) Calcular la masa de Marte.
b) Si un péndulo tiene en la Tierra un período de 2 s, ¿qué período observará el astronauta en Marte?
(Selectividad. 1993)

5 Explicar por qué a pesar de la atracción gravitatoria entre el Sol y la Tierra, ésta no cae sobre el Sol.
(Selectividad. 1991)

6 La distancia entre los centros O_1 y O_2 de dos masas homogéneas de radios R_1 y R_2 , respectivamente, es de $30R_2$. Determinar la relación entre las densidades de ambas esferas si se sabe que el punto sobre el que ejercen la misma fuerza gravitatoria sobre la recta O_1O_2 se encuentra a $20R_2$ de O_1 .

Dato: $R_1 = 10R_2$
(Selectividad. 1995)

7 Un planeta se mueve alrededor del Sol en una órbita circular con velocidad de 50 km/s, respecto de un sistema de referencia heliocéntrico. Hallar el período del este planeta alrededor del Sol.

$G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ S.I.; $M_{\text{sol}} = 1,97 \cdot 10^{30}$ kg.
(Selectividad. 1994)

8 Se desea colocar una nave de 500 kg en órbita a 700 km de la superficie terrestre.

a) Calcular la velocidad con la que debe ser lanzada.
b) Un astronauta, cuya masa es de 65 kg, realiza trabajos en el exterior de la nave en órbita. Hallar su peso.

(Datos: $M_T = 5,98 \cdot 10^{24}$ kg; $R_T = 6370$ km; $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ N.m²/kg²).
(Selectividad. 1988)

9 Se lanza verticalmente un satélite de masa $m = 2000$ kg desde la superficie de la Tierra, y se pide:
a) Energía total necesaria para situarlo en una órbita (supuesta circular) de radio $R_1 = 2R_T$, donde R_T es el radio de la Tierra.

b) Energía mínima necesaria para trasladarlo hasta la Luna.

$G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ S.I.

Masa de la Tierra = $5,96 \cdot 10^{24}$ kg; Radio de la Tierra = $6,37 \cdot 10^6$ m.

Masa de la Luna = $7,3 \cdot 10^{22}$ kg; Radio de la Luna = $1,74 \cdot 10^6$ m.

Distancia Tierra-Luna = $60R_T$.

(Selectividad. 1994)

10 Desde la superficie de Marte se lanza un satélite. Calcular la velocidad de escape. Calcular la velocidad de escape si se lanza desde una altura de 200 km. ($M_{\text{Marte}} = 6,42 \cdot 10^{23}$ kg; $R_{\text{Marte}} = 3,32 \cdot 10^6$ m).

El movimiento de los astros, tal como se observa desde la Tierra, fue explicado, desde la Antigüedad hasta la Edad Media, por el **modelo geocéntrico**. Según dicho modelo, la Tierra constituía el centro del Universo y todos los demás astros giraban alrededor de ella en órbitas circulares. A mitad del siglo XVI Nicolás Copérnico estableció el **modelo heliocéntrico** según el cual la Tierra y los demás planetas giraban alrededor del Sol.

Las **tres leyes de Kepler**, referentes al movimiento de los planetas, constituyeron una gran contribución al nuevo modelo heliocéntrico. Según la primera ley, los planetas se mueven en órbitas elípticas (no circulares) ocupando el Sol uno de los focos. La segunda ley establece que la velocidad areolar de cualquier planeta (la barrida por la línea que une un planeta con el Sol) es constante. La relación entre el período (T) del movimiento orbital de un planeta y el radio medio (r) de su trayectoria viene dada por la tercera ley de Kepler según la expresión $T^2 = kr^3$.

Si un cuerpo gira alrededor de un eje se puede definir una magnitud vectorial, llamada **momento angular (L)**, que relaciona la masa (m), la velocidad lineal (v) y la distancia (r) del eje al cuerpo según la expresión $L = r \times mv$. El momento angular de un cuerpo permanece constante cuando la fuerza que actúa sobre el mismo es cero. También se conserva en el caso en que la fuerza esté dirigida al centro de rotación (fuerza central). La segunda ley de Kepler es una consecuencia del principio de conservación del momento angular.

Si dos cuerpos de masas M y m están separados una distancia r, la fuerza de atracción gravitatoria que se ejerce entre ellos viene dada por $F = GMm/r^2$. Esta expresión fue deducida por Newton y constituye el enunciado de la ley de la Gravitación Universal. Dicha ley unificó el origen de los movimientos terrestres y celestes, permitió la deducción de las trayectorias de los planetas y cometas así como la comprensión de fenómenos como las mareas, la deducción de las órbitas de los planetas, el achatamiento de los polos de los planetas, etc.

La interacción gravitatoria entre dos cuerpos (un problema no resuelto por Newton) se explica por medio del campo gravitatorio, el cual se debe considerar como una realidad física y no un artificio de cálculo matemático. La intensidad del campo gravitatorio (**g**) se define como $g = F/m$ siendo F la fuerza que dicho campo ejerce sobre una masa m colocada en él. El valor de la intensidad del campo gravitatorio creado por una masa M, puntual o esférica, a una distancia r viene dada por $g = GM/r^2$. El campo gravitatorio se representa gráficamente por medio de las **líneas de fuerza**.

Un campo de fuerzas es **conservativo** cuando el trabajo realizado por las fuerzas del campo al trasladar un cuerpo de un lugar a otro de dicho campo no depende de la trayectoria seguida. Si un campo es conservativo, se puede definir una energía llamada **potencial**, asociada a la posición del cuerpo en dicho campo. El trabajo realizado (W) y la energía potencial (E_p) se relacionan por la expresión $W = -\Delta E_p$. El campo gravitatorio es conservativo. La energía potencial del sistema formado por dos masas M y m separadas una distancia r viene dada por $E_p = -GMm/r$.

El origen de la energía potencial se puede establecer en cualquier punto aunque se suelen utilizar dos: el nivel del mar en el caso de situaciones relacionadas con la superficie terrestre y una distancia r muy grande (infinita) en otros casos. La energía potencial no la posee el cuerpo situado en un campo gravitatorio: se asigna a los puntos del espacio.

Si la energía mecánica de un sistema formado por dos masas es menor que cero, se dice que es un **sistema ligado** y las órbitas descritas serán cerradas (circunferencias o elipses). Cuando la energía mecánica es mayor o igual que cero, el sistema se llama **libre** y las órbitas que realiza son hiperbólicas o parabólicas respectivamente.

La energía potencial por unidad de masa se llama **potencial**. En el caso de una masa puntual M, el potencial gravitatorio (V) a una distancia r es $V = -GM/r$. Las superficies que unen los puntos de un campo gravitatorio que tienen el mismo potencial se llaman **equipotenciales**. Un cuerpo que gira alrededor de la Tierra se dice que es un satélite. La ley de la Gravitación Universal permite el cálculo de la velocidad de un satélite en su órbita. La energía necesaria para situar un satélite en órbita se puede calcular a partir del principio de conservación de la energía mecánica. La velocidad necesaria para que un cuerpo lanzado desde la superficie de la Tierra abandone la Tierra y no vuelva a caer sobre ella se llama **velocidad de escape**.

La ley de la Gravitación Universal permite explicar la evolución de las estrellas y del Universo.

Soluciones a los ejercicios propuestos

A.4. $4 \cdot 10^{-20}$ días²/km³.

A.11. a) $L_{\text{Mercurio}} = 9,26 \cdot 10^{38}$ kgm²/s; $L_{\text{Venus}} = 1,84 \cdot 10^{40}$ kgm²/s;

$L_{\text{Tierra}} = 2,68 \cdot 10^{40}$ kgm²/s; $L_{\text{Marte}} = 3,53 \cdot 10^{39}$ kgm²/s;

$L_{\text{Júpiter}} = 1,93 \cdot 10^{43}$ kgm²/s; $L_{\text{Saturno}} = 7,86 \cdot 10^{42}$ kgm²/s;

b) 0,986.

A.15. $2,35 \cdot 10^6$ s.

A.17. $5,96 \cdot 10^{24}$ kg; $2,00 \cdot 10^{30}$ kg; $1,90 \cdot 10^{27}$ kg.

A.26. $1,67$ m/s²; 0,17 veces menor.

A.27. $3,46 \cdot 10^8$ m.

Actividades complementarias

2. $2,88 \cdot 10^{12}$ m.

3. b) $4,24 \cdot 10^4$ km.

4. a) $6,41 \cdot 10^{23}$ kg; b) 3,28 s.

6. $4 \cdot 10^{-3}$.

7. $6,6 \cdot 10^6$ s.

8. a) $8,29 \cdot 10^3$ m/s; b) 518,7 N.

9. a) $9,38 \cdot 10^{10}$ J; b) $1,17 \cdot 10^{11}$ J.

10. 2,63 m/s.

2. Vibraciones y ondas

Hasta aquí hemos estudiado movimientos en los que se produce un desplazamiento neto de partículas. Pero ya en el siglo XVII Mersenne y Sauveur iniciaron el estudio del sonido y de otros movimientos de naturaleza más compleja, llamados habitualmente ondulatorios o, simplemente, ondas.

A.1 Enumerar diversos ejemplos de movimiento vibratorio. A continuación, elaborar una lista de fenómenos habitualmente calificados como ondulatorios. ¿Existe alguna relación entre ellos?

En este capítulo nos vamos a limitar a estudiar las vibraciones más sencillas: el movimiento armónico simple (MAS) y, seguidamente, estudiaremos las ondas que se producen en medios elásticos, a las cuales se les da el nombre de ondas mecánicas. Ello nos permitirá incorporar a la Mecánica el estudio de movimientos sin desplazamiento neto de partículas. Se completará así la imagen mecanicista del comportamiento de la materia, que se inicia con la síntesis newtoniana vista en el capítulo anterior. Por otra parte, los conceptos y propiedades que se introducirán, serán utilizados en la Óptica, el Electromagnetismo o el surgimiento de la Física moderna.

De acuerdo con ello, el hilo conductor para el estudio del tema será el siguiente:

1. El movimiento vibratorio
2. Generalidades sobre las ondas. Elaboración de un modelo sobre su naturaleza
3. Ecuación del movimiento ondulatorio
4. Propiedades de las ondas
 - 4.1. Transmisión de energía a través de un medio. Amortiguamiento
 - 4.2. Difracción
 - 4.3. Interferencias
 - 4.4. Reflexión y refracción
 - 4.5. Ondas estacionarias
 - 4.6. Efecto Doppler
5. La acústica y sus implicaciones

1. El movimiento vibratorio

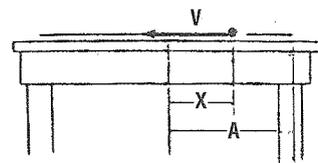
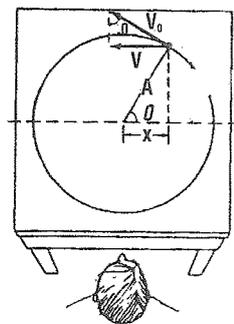
Nos limitaremos al estudio del movimiento vibratorio más sencillo o **movimiento vibratorio armónico simple (MAS)**, deduciendo cuál sería su ecuación de movimiento.

A.2 Introducir las magnitudes necesarias para describir un movimiento vibratorio, p.ej. una varilla de acero sujeta por un extremo o un cuerpo unido a un muelle.

A.3 ¿Qué puede decirse, a título de hipótesis, sobre la fuerza que actúa sobre un cuerpo cuando se separa de la posición de equilibrio? Obtener la ecuación que rige la dinámica de dicho cuerpo.

La obtención de la ecuación del MAS, a partir de la expresión anterior, resulta muy complicada para este nivel. Por ello recurriremos a otros métodos más intuitivos.

A.4 Sea una partícula que se mueve sobre el diámetro de una circunferencia de radio A , tal que en todo momento es la proyección de un punto que recorre la circunferencia con un movimiento circular uniforme (MCU) de velocidad w . Obtener la ecuación de la elongación x en función del período T y de la frecuencia n . Comprobar que se trata de un MAS calculando su velocidad y aceleración.



A.5 La ecuación de un MAS es $x = 0,2 \text{ sen } 6t$. Calcular:
 a) la velocidad en cualquier instante.
 b) la aceleración en cualquier instante.
 c) la elongación a los 3 s.
 d) la velocidad y la aceleración a los 4 s.
 e) el valor máximo de la elongación, de la velocidad y de la aceleración.

A.6 Indicar, a título de hipótesis, la relación que existe entre el periodo de oscilación de un muelle y su constante k .

A.7 Diseñar y realizar una investigación para comprobarlo.

A.8 (Opc) Determinar el periodo de oscilación de un péndulo.

A.9 (Opc) Los sistemas, por ejemplo un columpio, vibran con su frecuencia propia ω_0 . ¿Qué les sucede al cabo del tiempo? Si aplicamos una fuerza para evitarlo, ¿con qué ω es más conveniente hacerlo? Indicar otras situaciones en que suceda lo mismo.

Cuadro 1 Resonancias

El fenómeno de la resonancia se halla tan extendido en la naturaleza como las propias vibraciones. Así, el tenor Caruso podía romper una copa emitiendo, a toda voz, una nota de frecuencia adecuada. El hundimiento del puente Tacoma Narrows en 1940 se debió, en parte, a que el puente resonó con las fluctuaciones del viento. Las formaciones militares dejan de marcar el paso al cruzar los puentes para evitar la posibilidad de resonancia. Cuando sintonizamos un aparato de radio o televisión, ponemos su frecuencia propia o en resonancia con la frecuencia de las ondas electromagnéticas incidentes. Por último, también hay resonancia en los átomos o núcleos cuando se produce una absorción (o transición entre dos niveles energéticos) de radiación de una frecuencia determinada.

2. Generalidades sobre las ondas. Elaboración de un modelo sobre su naturaleza

Hasta aquí hemos estudiado el movimiento de objetos puntuales que podíamos aproximar (o modelar) mediante partículas puntuales. De modo paralelo al desarrollo de la Mecánica se fue desarrollando el estudio de movimientos de naturaleza más compleja, llamados **ondulatorios** o, simplemente, **ondas**.

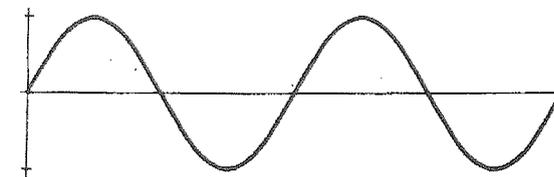
Aplicaremos a continuación a dichos movimientos un método muy importante de la ciencia: la elaboración de modelos, es decir, de aproximaciones, de representaciones más simples y conocidas de sistemas o fenómenos complicados o poco conocidos.

A.10 Un modelo de movimiento ondulatorio debe explicar, en primer lugar, cómo se produce y cómo se propaga una onda en un medio. Sugerir, a modo de hipótesis cualitativas, posibles respuestas a estos problemas.

A.11 ¿Cómo se mueven las partículas del medio y cómo se mueve la perturbación? Proponer algún montaje sencillo de realizar en el que esto pueda ponerse de manifiesto.

A.12 Razonar si las ondas sonoras, cuando se propagan en un medio como el aire, son longitudinales o transversales. Indicar en qué medios pueden propagarse cada uno de los tipos de onda.

A.13 Enumera las magnitudes necesarias para la descripción de una onda superficial de un líquido cuya sección se adjunta.



A.14 Hemos visto cómo en una onda no hay transporte neto de materia. ¿Qué se propaga entonces?

3. Ecuación del movimiento ondulatorio

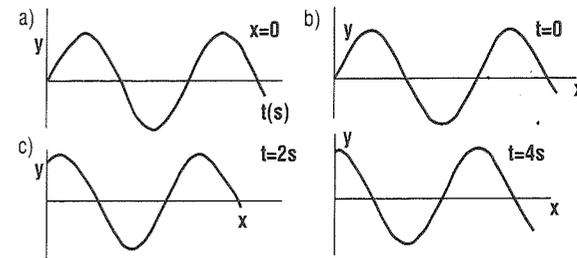
De acuerdo con el apartado anterior, en un movimiento ondulatorio se propaga una vibración que se origina en un punto del medio llamado foco y que se transmite a los restantes puntos del medio.

La ecuación del movimiento ondulatorio nos proporciona el valor de la perturbación que se propaga, en cualquier punto del medio y en cualquier instante. Esta ecuación puede ser muy complicada, pero nos limitaremos a estudiar la ecuación de las ondas armónicas planas por ser la más sencillas y porque cualquier otra onda es siempre, como demostró Fourier, una superposición de ondas armónicas.

En el caso de las ondas mecánicas armónicas, la ecuación de la perturbación en el foco es sencillamente la ecuación de un MAS $y = A \text{ sen } \omega t$. Veamos cómo se obtiene el valor de la perturbación y en cualquier otro punto e instante.

A.15 Proponer una ecuación que nos dé el valor de la perturbación y en un punto del medio al que llega una onda con un retraso t' , en función de la distancia x del punto al foco y de la velocidad de propagación de la onda v . Expresarla, en particular, en función de la frecuencia y la longitud de onda.

A.16 Las figuras siguientes representan: a) El valor de la perturbación para un punto fijo al transcurrir el tiempo, b) para un instante fijo en todos los puntos del medio, c) idem en instantes posteriores. Analizar dichas gráficas.



A continuación se proponen algunos ejercicios de manejo de las expresiones introducidas.

A.17 Dadas las siguientes ecuaciones de onda, en las que todas las magnitudes vienen dadas en el SI, obtener los valores de λ , T , v , n y w en cada caso:

- a) $y = 2 \sin 2\pi (t/0,01 - x/30)$
 b) $y = 0,01 \sin (\pi t - 2\pi x)$

A.18 Escribir la ecuación de una onda cuyas características son: velocidad 3 m/s; frecuencia 2 Hz; amplitud 5 cm; elongación en el instante y en la posición inicial 2,5 cm.

A.19 Calcular la diferencia de fase entre dos puntos de un medio separados una distancia de 5,6 mm al propagarse un movimiento ondulatorio de 4,5 mm de longitud de onda. ¿Cuál debería ser la distancia entre dos puntos por los que pasa una onda para que se encuentren en concordancia de fase (en el mismo estado de vibración)? ¿Y para que se encuentren en oposición de fase (estados opuestos de vibración)?

4. Propiedades de las ondas

La propagación de ondas por un medio, así como su paso de un medio a otro, puede dar lugar a una serie de fenómenos característicos, que vamos a estudiar a continuación.

4.1. Transmisión de energía a través de un medio. Amortiguamiento

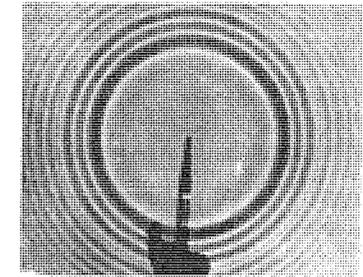
En todas las ondas se transmite energía y cantidad de movimiento en la dirección en que se propaga la onda.

A.20 Teniendo en cuenta que cada partícula del medio vibra con un MAS, dar la expresión de la energía total de una partícula de masa m del medio (de constante elástica k), en cualquier instante. Mostrar que dicha energía total coincide con la energía potencial máxima o con la cinética máxima.

A.21 Señalar, a título de hipótesis, de qué dependerá la intensidad I de una onda (es decir, la rapidez con que se transfiere la energía) y proponer una definición de la misma.

Es de sobra conocido que una onda como el sonido se amortigua (se debilita) al propagarse desde el foco emisor, lo que se traduce en una disminución de la intensidad. Examinaremos a continuación las causas del amortiguamiento.

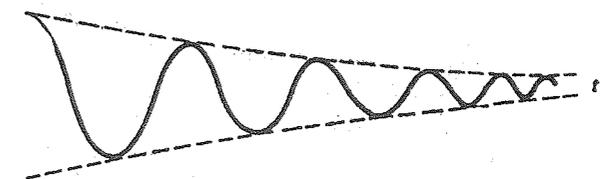
A.22 Hallar cómo variarán la intensidad y la amplitud de una onda en función de su distancia al foco en los siguientes casos: a) una onda esférica (como el sonido), cuya energía se halla distribuida en superficies esféricas de radio creciente; b) una onda circular (como las de la superficie de los líquidos); c) una onda que se propaga en una sola dirección.



El fenómeno de **atenuación** de las ondas no debe confundirse con la **absorción**. La atenuación se produce por la extensión de la onda en el medio, es decir, porque la energía transportada por un frente de ondas ha de repartirse en superficies cada vez mayores a medida que nos alejamos del foco.

A.23 Explicar brevemente en qué puede consistir la absorción. Indicar la relación que existe entre la intensidad del sonido que incide en una pared y la transmitida.

A.24 (Opc.) En la figura aparece la intensidad de una onda en función de la distancia que atraviesa. Señalar, a título de hipótesis, de qué depende la variación de la intensidad I de la onda al atravesar un medio. Dar la ecuación que relaciona este valor I con los factores considerados y resolverla.



A.25 Dibujar, uno debajo del otro, los perfiles de dos ondas de igual frecuencia, una de las cuales se amortigua y la otra no.

Cuadro 2

La audición. Características del sonido

Cuando una onda de sonido llega al oído humano, los cambios de presión ponen en vibración el tímpano. Estas vibraciones son transmitidas por unos huesecillos a la cóclea, donde la energía de vibración se convierte en señales eléctricas, es decir, en impulsos nerviosos, que son posteriormente procesados e interpretados por el cerebro.

El micrófono ejecuta esencialmente la misma tarea. Las ondas sonoras que alcanzan el diafragma de un micrófono lo ponen en vibración. Un "transductor" transforma esta vibración en una señal eléctrica que se puede amplificar y enviar a un altavoz o magnetófono.

El sonido se caracteriza por las sensaciones de **intensidad**, **tono** y **timbre**. Esta descripción subjetiva se relaciona con propiedades físicas de la onda sonora.

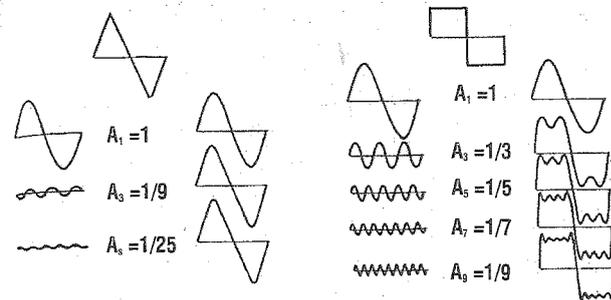
La **intensidad** está relacionada con la intensidad de la onda, es decir, la energía que transporta la onda por unidad de tiempo a través de la unidad de superficie. La unidad de intensidad será la de potencia por unidad de superficie, vatio/metro² (w/m^2). El oído puede percibir sonidos de intensidades tan bajas como $10^{-12} w/m^2$ y tan elevados como $1 w/m^2$ (e incluso mayores, aun cuando por encima de este valor la sensación es dolorosa).

El **tono** de un sonido se refiere a si es **agudo** (como un violín) o **grave** (como un bombo). La cantidad física que determina el tono es la frecuencia, hecho que ya señaló Galileo en su "Dis-

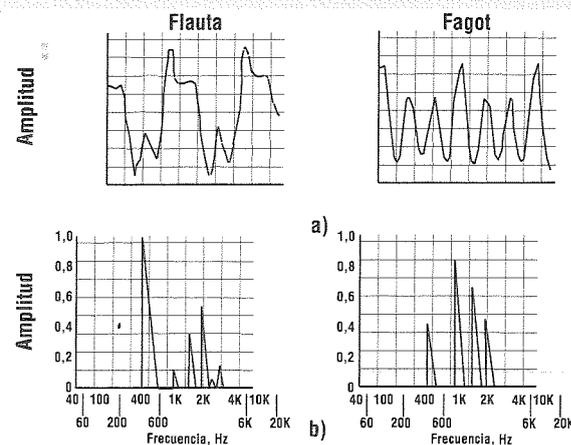
curso sobre dos nuevas ciencias". Cuanto más baja sea la frecuencia, más grave es el tono y cuanto más elevada, más agudo. El oído humano responde a frecuencias comprendidas en el intervalo de 20 Hz a 20.000 Hz. Los sonidos de frecuencias superiores a 20.000 Hz se denominan ultrasonidos, cuyas aplicaciones veremos más adelante. Los perros pueden oír sonidos de hasta 50.000 Hz y los murciélagos de hasta 100.000 Hz. Los sonidos de frecuencias inferiores a 20 Hz se denominan infrasonidos. Las fuentes son terremotos, volcanes, truenos y maquinaria pesada en vibración.

Cuando un piano y un oboe dan una nota de igual intensidad y tono, existe una clara diferencia entre ambos sonidos. A esto se le denomina timbre del sonido, que también está relacionado con una propiedad física. En efecto, al registrar gráficamente (mediante un micrófono y un osciloscopio) una misma nota tocada por instrumentos diferentes se observa que la forma de su onda es diferente.

Este hecho se puede explicar de acuerdo con el teorema de Fourier (1768-1830). Cada onda periódica no sinusoidal es la superposición de ondas armónicas. La frecuencia más baja presente se denomina frecuencia fundamental y los múltiplos de esa frecuencia se denominan armónicos superiores o sobretonos, cada uno con su amplitud respectiva. La diferencia en el timbre de dos instrumentos tocando la misma nota fundamental viene determinado por los sobretonos.



Si se representan las frecuencias y las amplitudes de las ondas que dan lugar a la onda más compleja, se obtiene el espectro acústico del sonido.



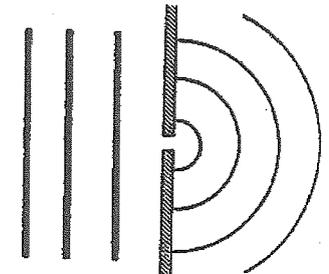
Nuestro oído y nuestra mente interpretan como armoniosos o melódicos sonidos que contienen frecuencias que sean múltiplos sencillos unas de otras (como en los instrumentos musicales), mientras que una mezcla de frecuencias cualesquiera resulta menos agradable y la llamamos ruido.

4.2. Difracción

La difracción o capacidad para bordear los obstáculos, es una de las características típicas de las ondas, hasta el punto de que sirve decisivamente para calificar un fenómeno como ondulatorio.

A.26 A través de una puerta abierta se oye hablar a alguien que no se divisa. Explicar este fenómeno.

A.27 Un fenómeno de difracción es el que se esquematiza en la figura, fácilmente observable en las ondas superficiales de un líquido. Comprobarlo en la cubeta de ondas y dar una explicación cualitativa de la difracción.

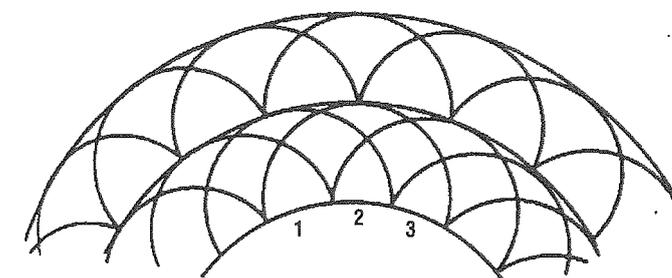


Principio de Huygens

En el siglo XVII Huygens estableció una sencilla construcción geométrica para explicar la propagación de las ondas. Dicha construcción se basa en el llamado principio de Huygens: "Todo punto de un medio alcanzado por una onda se convierte en foco secundario de emisión de ondas".

Si se tiene un frente de onda como el que aparece en la figura, los puntos 1, 2, 3, etc. se convierten en focos emisores de ondas, de acuerdo con el principio de Huygens. Después de un tiempo t , cada una de las ondas emitidas por los puntos citados será una circunferencia de radio vt (siendo v la velocidad de propagación de la onda) centrada en cada uno de los puntos indicados. La curva tangente (llamada envolvente) a todas las circunferencias anteriores constituye el nuevo frente de onda.

Con ayuda del principio de Huygens se pueden explicar con facilidad los fenómenos de la difracción, interferencias, reflexión y refracción de las ondas.



A.28 ¿Qué puede decirse acerca del tamaño de la rendija con respecto a la longitud de onda en los fenómenos de difracción? Contrastar esta hipótesis mediante la cubeta de ondas.

4.3. Interferencias

Otro rasgo característico de las ondas es presentar fenómenos de **interferencia** cuando dos o más ondas se superponen en una región. Esto explica que, en ciertas condiciones, “sonido más sonido produzca silencio” o, como veremos en el siguiente capítulo, “luz más luz produzca oscuridad”.

A.29 Tratar de explicar lo que ocurre cuando dos ondas coinciden en el mismo punto.

A.30 Comprobarlo con la cubeta de ondas.

Cuando las ondas son armónicas sólo se produce interferencia si son **coherentes**, es decir, si tienen la misma frecuencia y la diferencia de fase es constante. Así, en los puntos que estén en concordancia de fase la amplitud resultante será $A = A_1 + A_2$ y la interferencia es **constructiva**. En los puntos que estén en oposición de fase, $A = A_1 - A_2$ y la interferencia es **destruktiva**.

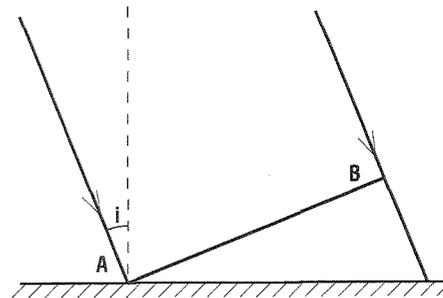
A.31 Deducir cuál ha de ser la diferencia de caminos $x_2 - x_1$ recorridos por dos ondas coherentes desde su foco respectivo para que se produzca: a) interferencia constructiva; b) destructiva.

A.32 Dos ondas sonoras de 440 Hz y velocidad de propagación 340 m/s, cuyos focos están en fase, concurren en un mismo punto tras recorrer 20,34 y 20,75 m respectivamente, desde cada foco. Razonar si se producirá o no interferencia constructiva.

4.4. Reflexión y refracción

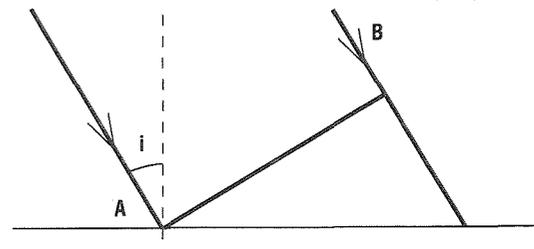
El principio de Huygens, introducido en el apartado sobre la difracción, permite explicar fácilmente los fenómenos de reflexión y refracción y justificar las leyes que los rigen.

A.33 Un frente de ondas plano llega a la superficie de separación de dos medios formando un ángulo i con la normal, como se indica en la figura adjunta. Aplicar el principio de Huygens y construir la onda reflejada. Probar también que el ángulo de incidencia i es igual al de reflexión r .



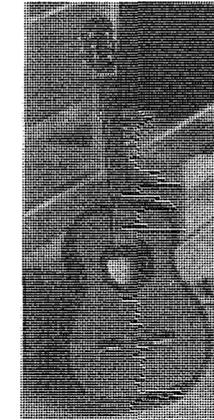
A.34 Cuando las ondas sonoras inciden sobre obstáculos grandes, se reflejan, produciendo lo que comúnmente llamamos eco. Hallar la distancia mínima a la que debe estar un obstáculo para que se perciba el eco nítidamente, sabiendo que el oído sólo es capaz de distinguir sonidos separados por intervalos de 0,1 s.

A.35 Construir la onda refractada para un caso igual al esquematizado en la figura de la actividad 33, admitiendo que las velocidades de las ondas en ambos medios son v_1 y v_2 . Probar geoméricamente que si t es el ángulo de refracción se cumple $\sin i / \sin t = v_1 / v_2$.



4.5. Ondas estacionarias

Cuando las ondas están confinadas en el espacio, como ocurre con las ondas en una cuerda de guitarra o en un tubo de órgano, existen reflexiones en ambos extremos, con lo que existirán ondas que se mueven en ambos sentidos. Estas ondas interfieren entre sí produciendo **ondas estacionarias**, denominadas así porque no se desplazan como ocurriría en una cuerda libre.



A.36 Dibujar en tres gráficos sucesivos (uno debajo del otro) tres ondas que puedan producirse en la cuerda de una guitarra (siempre la misma).

A.37 Si la longitud de una cuerda es L , establecer la relación que ha de existir entre L y la longitud de las ondas que pueden producirse en dicha cuerda.

Cuadro 3

La voz humana. Los instrumentos de música

La voz humana es el más antiguo de los instrumentos musicales. Ningún instrumento alcanza la variedad de matices, dinámicas y expresividad de la voz cantada.

Como cualquier otro instrumento de viento, la voz se produce al vibrar las cuerdas vocales por medio del aire procedente de los pulmones. La extensión de las frases cantadas necesita un flujo continuo de aire que no puede proporcionar la respiración torácica o intercostal que produce la voz hablada. Por dicha razón se utiliza el diafragma como impulsor de una corriente de aire a través de los pulmones y la laringe hasta la cavidad bucal.

En la laringe se encuentran dos repliegues elásticos musculares llamados cuerdas vocales inferiores o verdaderas que se insertan en los cartílagos aritenoides. Al pasar por ellas el aire procedente de los pulmones e impulsado por el diafragma, entran en vibración y se producen ondas sonoras que llegan hasta los resonadores de la cavidad bucal donde son reflejadas hacia la laringe. Las ondas incidentes y reflejadas desaparecen por interferencias excepto las ondas cuyas frecuencias corresponden a la frecuencia fundamental y a los armónicos de la onda estacionaria.

La frecuencia de la nota emitida por el cantante puede variarse por medio del músculo cricoti-roideo que modifica la longitud y la tensión de las cuerdas vocales.

Los instrumentos musicales producen sonidos por medios muy diversos. En los instrumentos de cuerda (violines, violas, cellos, etc.) el sonido se consigue al hacer vibrar una cuerda tensa por medio de un arco que se desliza o al pellizcarla con las yemas de los dedos (pizzicato). Los instrumentos de viento, tanto de madera (clarinete, oboe, etc.) como de metal (trompa, tuba, trompeta, trombón, etc.) utilizan la vibración de una columna de aire para formar los sonidos. En otros casos la naturaleza del cuerpo vibrante es muy diversa: láminas metálicas (platillos), membranas (tambores y timbales), láminas de madera o de metal (xilófono), cuerdas golpeadas (piano) o "arañadas" (clave), barras metálicas (triángulo), láminas metálicas golpeadas (celesta), etc.

La gama de las diferentes intensidades de los sonidos que crean un instrumento musical recibe el nombre de dinámica. En la notación musical es costumbre representar la intensidad de un sonido por signos convencionales. De esa forma, una intensidad pequeña viene representada por la letra *p* (piano) y una grande por *f* (forte). Tomando como base dichas convenciones se pueden representar otras intensidades por combinaciones de los símbolos anteriores. Así se tendría *ff* (fortísimo), *mf* (mezzo forte), *pp* (pianísimo), etc.

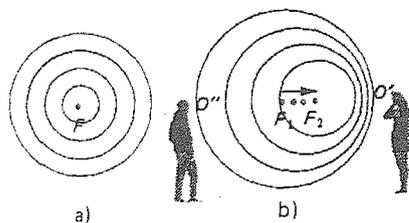
La mayor parte de los instrumentos de música pueden producir sonidos con un rango dinámico muy extenso, desde notas casi inaudibles hasta sonidos de gran intensidad. Mientras la trompa y el trombón representan ejemplos de instrumentos capaces de formar sonidos de 65 decibelios de intensidad máxima, el límite superior del clarinete en mi bemol o del flautín se establece en 20 decibelios.

El espectro acústico de cada instrumento varía de acuerdo con la dinámica. Si ésta es grande, el armónico de máxima intensidad corresponde a una frecuencia mayor que si la dinámica es pequeña.

Los sonidos oscuros y densos (p.ej. los del registro grave del clarinete) corresponden a espectros acústicos en los que se encuentran presentes los armónicos impares. Si sólo aparecen los pares, se obtienen sonidos claros.

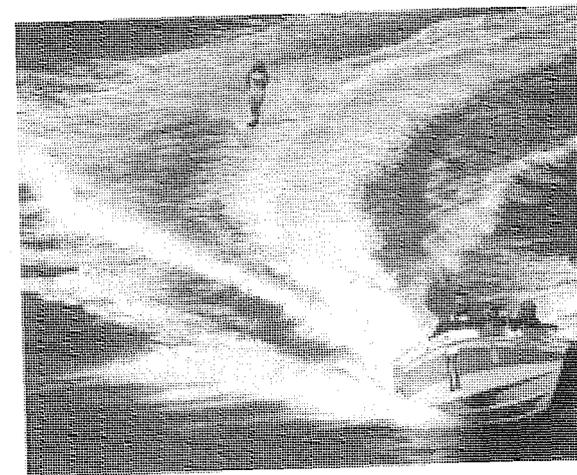
4.6. Efecto Doppler

Las figuras adjuntas muestran la producción de ondas cuando el foco se encuentra en reposo (fig. a) y cuando se mueve respecto al observador (fig. b). La modificación de la posición del foco desde la posición F_1 a F_2 , al tiempo que emite ondas, produce una acumulación de frentes de onda en el sentido de su movimiento (hacia el observador O') y un enrarecimiento en sentido contrario (hacia O'').



A.38 Explicar cómo serán las frecuencias percibidas por ambos observadores con respecto a la que percibiría un observador en reposo con relación al foco. ¿Puede justificarse, a la luz de lo anterior, que se perciba diferente tono en la sirena de una ambulancia o en el silbido de un tren cuando se acerca o cuando se aleja?

A.39 (Opc.) Dibujar las ondas producidas por un foco que se mueve con velocidad superior a la de las ondas en el medio. ¿Puede explicarse, a la luz de esto, la detonación de los aviones cuya velocidad es superior a la del sonido, el silbido de las balas o el frente de ondas cónico sobre la superficie del agua que produce una lancha que se desplaza rápidamente?



5. La acústica y sus implicaciones

Hasta aquí hemos realizado un estudio de las ondas mecánicas (y en particular de las sonoras) y sus propiedades. En este apartado estudiaremos las aplicaciones, problemas, etc., asociados a los sonidos y ultrasonidos. Abordaremos especialmente un tema, la contaminación acústica, frente al cual la sensibilidad de la sociedad española es escasa.

A.40 ¿Cuáles son las principales fuentes de contaminación acústica en las zonas urbanas? ¿Y en los centros de trabajo?

A.41 Indicar los efectos perniciosos de la contaminación acústica en la salud humana y la forma de combatirlos.



El oído humano puede percibir sonidos cuya intensidad llega a tener valores tan bajos como 10^{-12} w/m^2 y tan elevados como $1 w/m^2$. Pero la sensación que percibimos no es proporcional a la intensidad. Para que un sonido de intensidad I se perciba doblemente intenso que otro de intensidad I' es necesario que $I = 10I'$. La relación matemática que existe entre los niveles de intensidad sonora percibidos B y las intensidades es logarítmica. Por ello los niveles de intensidad B de un sonido (cuya unidad son los decibelios dB) se definen en función de la intensidad I mediante

$$B = 10 \log(I/I_0)$$

donde I_0 es un cierto nivel de referencia que suele tomarse como la intensidad mínima audible, cuyo valor es 10^{-12} W/m^2 . Por lo tanto, su intensidad en dB es 0. Un sonido de 20 dB es cien veces más intenso que otro de 0 dB.

A.42 Los niveles de intensidad sonora son los siguientes:

- 120 dB: Ruido insoportable. Umbral de dolor. Avión despegando.
- 110 dB: Muy peligroso. Protectores auditivos. Mascletá.
- 100 dB: Peligroso y molesto. Interior discoteca.
- 90 dB: Riesgo exposiciones prolongadas. Rotativas, telares.
- 80 dB: Riesgo a largo plazo. Camión a 10 m.
- 70 dB: Bastante ruidoso. Calle con tráfico intenso.
- 60 dB: Ruidoso. Zonas comerciales.
- 50 dB: Poco ruidoso. Tráfico ligero. Conversación.
- 40 dB: Tranquilo. Probables interferencias con sueño.
- 30 dB: Calma. Nivel para el sueño.
- 20 dB: Silencioso. Zonas rurales.
- 10 dB: Silencio. Estudio aislado acústicamente.
- 0 dB: Umbral de audibilidad. Cámaras anecoicas.

¿Qué intensidad (en W/m^2) corresponde a dichos niveles? Señalar, a partir de la tabla, a qué niveles estáis expuestos a lo largo del día. Comparar con las recomendaciones de los expertos: no superar los 50-55 dB durante el día y durante la noche el máximo aceptado es 30-35 dB.

A.43 Utilizar un sonómetro para determinar los niveles de intensidad sonora del centro y su entorno.

Cuadro 4

LOS ULTRASONIDOS Y SUS APLICACIONES

Los ultrasonidos son ondas de frecuencia superior a 20.000 Hz. Entre sus aplicaciones se pueden señalar el sonar, la ecografía, la litotricia, etc.

El sonar o eco de impulsos de ultrasonido se utiliza para localizar submarinos, buques hundidos, bancos de peces, arrecifes o determinar la profundidad del mar. Se emplean ultrasonidos de frecuencia comprendida entre 20 y 100 kHz, porque las longitudes de onda son más cortas. Esto tiene la ventaja de que hay menos difracción y se pueden detectar objetos más pequeños.

En medicina, las ondas ultrasonoras se utilizan tanto en diagnóstico como en tratamiento. En el primero (ecografía) se emplea una técnica pulso-eco parecida a la del sonar. Esto permite detectar algunos tejidos u órganos que no pueden distinguir los rayos X (o cuando no conviene usarlos). Así se distinguen tumores o bolsas de fluidos, el desarrollo del feto, órganos como el cerebro, el hígado o los riñones, etc. Se utilizan frecuencias comprendidas entre 1 y 10 MHz. Los ultrasonidos también se emplean en el tratamiento de tejidos nocivos, en ruptura de piedras en los riñones, etc. Para ello se enfocan ondas de intensidad muy elevada. Las vibraciones producidas por la energía absorbida los destruye.

Actividades complementarias

- 1 La ecuación de un MAS es $x = 3 \text{ sen } 4t$. Calcular la amplitud, la frecuencia, el periodo y la frecuencia angular.
- 2 Se tiene un muelle cuya constante elástica es 60 N/m. Se cuelga un cuerpo de 100 g y comienza a oscilar al separarlo de su posición de equilibrio. Calcular el periodo de oscilación y la ecuación de movimiento si el cuerpo se separó 3 cm de su posición inicial.
- 3 Calcular la elongación, en el instante 2 s, de un punto situado a 6 m del foco de un movimiento ondulatorio de 5 cm de amplitud y 200 Hz de frecuencia que se propaga con una velocidad de 1200 m/s.
- 4 Un extremo de una cuerda larga se hace vibrar con un periodo de 2 s y una amplitud de 8 cm. La velocidad de las ondas es de 60 cm/s. Escribir la ecuación del movimiento del foco y calcular la elongación de un punto de la cuerda a 100 cm del foco, a los 5 segundos. (Selectividad. 1988)
- 5 La ecuación de una onda armónica producida en una cuerda es $y = 0,01 \text{ sen } (314t - 62,8x)$ estando x e y en metros y t en segundos.
 - a) Hallar todas las características de esa onda: amplitud, longitud de onda, frecuencia, período y velocidad.
 - b) Dar la posición de varios puntos de la cuerda que vibren en fase. (Selectividad. 1988)
- 6 La ecuación es una onda es $y = \cos(t/2 - x/4)$, donde x e y se expresan en cm y t en s. Calcular:
 - a) La frecuencia y la velocidad de propagación de la onda.
 - b) El tiempo que ha de transcurrir desde el instante inicial para que un punto situado a 4 cm del origen tenga la velocidad máxima. (Selectividad. 1991)
- 7 Una onda armónica se propaga en un medio con una velocidad de $300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, una frecuencia de 100 s^{-1} y una amplitud (o elongación máxima) de 2 m. Un punto P que dista 3 m del origen tiene elongación máxima en el instante inicial.
 - a) Escribir la ecuación de la onda.
 - b) Calcular el tiempo que ha de transcurrir desde el instante inicial para que el punto P tenga velocidad máxima. (Selectividad. 1991)
- 8 Una onda está representada por la ecuación $f(x,t) = A \cos \pi(0,5t + 0,125x)$ en donde x viene dado en centímetros y t en segundos.
 - a) Especificar las características de la onda: periodo, longitud de onda y velocidad de propagación.
 - b) Dado un punto fijo y un instante cualquiera, determinar la diferencia de fase dos segundos más tarde. (Selectividad. 1989)
- 9 La ecuación del movimiento de un impulso propagándose a lo largo de una cuerda viene dado por $y = 10 \cos(2x - 4t)$ cm, donde x está expresada en metros y t en segundos. Calcular:
 - a) Velocidad de propagación del impulso.
 - b) Instante en que la velocidad de un punto de la cuerda situado a 1 m del origen será nula. (Selectividad. 1994)

10 ¿Cuánto han de diferir los recorridos de dos rayos procedentes de una misma fuente luminosa para que interfieran destructivamente? (Selectividad. 1991)

11 Dibujar las ondas emitidas por un foco en los instantes 1, 2 y 3 s en los casos siguientes:

- el foco está en reposo.
 - el foco se mueve con una velocidad de 1 m/s.
 - el foco se mueve con una velocidad de 2 m/s.
 - el foco se mueve con una velocidad de 3 m/s.
- (Velocidad de propagación de las ondas = 2 m/s).

Cuando un cuerpo oscila en torno a su posición de equilibrio, se dice que su movimiento es **vibratorio**. En dicho movimiento se consideran las siguientes magnitudes:

- **período (T)**: tiempo que tarda en producirse una vibración completa.
- **frecuencia (ν)**: número de oscilaciones que se producen en un segundo.
- **elongación (x)**: distancia al punto de equilibrio.
- **amplitud (A)**: elongación máxima.

Si la fuerza que actúa en un movimiento vibratorio es proporcional a la elongación, el movimiento se llama **armónico simple (MAS)**. La ecuación de la elongación es $x = A \sin \omega t$ donde A es la amplitud y $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$ la **frecuencia angular**.

Un MAS se caracteriza porque la aceleración es proporcional y de signo contrario a la elongación.

La propagación de una perturbación por un medio se llama **onda o movimiento ondulatorio (MO)**. Si el movimiento de las partículas del medio se realiza en la misma dirección que la propagación de la onda, se dice que ésta es **longitudinal**. Si se realiza en una dirección perpendicular se tiene una **onda transversal**.

Junto a las magnitudes del MAS, en el movimiento ondulatorio se consideran las siguientes:

- **longitud de onda (λ)**: distancia entre dos puntos consecutivos que se encuentren en el mismo estado de vibración.
- **velocidad de propagación (v)**: velocidad con la que se transmite la perturbación por el medio. Se relaciona con la longitud de onda (λ) y el periodo (T) por la expresión $v = \lambda/T$. No debe confundirse con la velocidad de vibración de los puntos del medio.

Se dice que una onda es **armónica** cuando la perturbación del foco es un MAS.

La ecuación de la perturbación (y) que se produce en un instante t en un lugar situado a una distancia x del foco viene dada por $y = A \sin 2\pi (T/t - x/\lambda + \varphi)$ o por $y = A \sin(\omega t - kx + \varphi)$ donde $\omega = 2\pi/T$ se llama **frecuencia angular**, $k = 2\pi/\lambda$ es el **número de ondas** y φ la **fase inicial**.

Dos puntos de un medio, por el que se propaga una onda, se encuentran en **concordancia de fase** cuando su estado de vibración coincide. Si es opuesto se dice que están en **oposición de fase**.

Una onda transporta, desde el foco, energía y cantidad de movimiento pero no materia. La energía transportada por una onda armónica es proporcional al cuadrado de su amplitud. La **intensidad** de una onda se define como la energía que en un segundo atraviesa la unidad de superficie normal a la dirección de propagación.

Al propagarse las ondas por un medio, su energía se amortigua por **atenuación**, es decir se conserva pero se distribuye en el frente de ondas que cada vez se hace mayor. La energía de una onda también puede disminuir cuando es **absorbida** por el medio.

Cuando un movimiento ondulatorio de longitud de onda atraviesa una rendija o pasa un obstáculo de tamaño semejante o inferior a λ se produce un cambio en la dirección de la onda que se llama **difracción**. Este fenómeno se puede explicar por medio del **principio de Huy-**

gens: "Todo punto del medio alcanzado por una onda se convierte en un foco secundario de emisión de ondas".

La **interferencia** de las ondas se produce cuando dos o más ondas coinciden en un punto del medio y se superponen los efectos de la perturbación que propagan. El **principio de superposición** afirma que el efecto simultáneo producido en un punto por dos ondas es igual a la suma de los efectos que se producen si cada onda se propagara aisladamente.

Si en un punto de un medio coinciden las crestas o los valles de dos ondas de la misma frecuencia, se tiene una **interferencia constructiva**. Para que se produzca dicha interferencia se debe cumplir $\Delta x = n\lambda$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) donde x representa la diferencia de distancias del punto a cada foco emisor y la longitud de onda. Si en un punto coincide el valle de una onda con la cresta de otra (o al contrario), se produce una **interferencia destructiva**. En esta caso se cumple que $\Delta x = (2n + 1)\lambda/2$ ($n = 0, 1, 2, \dots$).

La **reflexión** de las ondas tiene lugar cuando llegan a un obstáculo grande y cambian su dirección de propagación. Se cumple que el ángulo de incidencia es igual que el ángulo de reflexión.

Si una onda llega a la superficie de separación de dos medios y se propaga por el segundo, cambiando su dirección y velocidad, se dice que ha tenido lugar una refracción. Si i es el ángulo de incidencia, r el de refracción y v_1 y v_2 las velocidades en el primer medio y en el segundo, se verifica la relación $\sin i / \sin r = v_1 / v_2$.

La interferencia de dos ondas de la misma frecuencia y amplitud que se propagan en sentidos contrarios a través de un medio limitado da lugar a la formación de unas ondas, que no se desplazan, llamadas **estacionarias**. Los puntos que no vibran se llaman **nodos** y los que presentan máxima amplitud reciben el nombre de **antinodos** o **vientres**. Las longitudes de onda de la ondas estacionarias producidas son proporcionales a la longitud del medio limitado según la expresión $\lambda = 2L/n$, ($n = 1, 2, 3, \dots$).

Se llama **efecto Doppler** a la variación de la frecuencia de una onda percibida por un observador cuando existe un movimiento relativo entre el foco del movimiento ondulatorio y dicho observador.

La **contaminación acústica** constituye uno de los principales problemas en las zonas urbanas por los efectos causados en la salud de las personas y en su calidad de vida.

La intensidad de los sonidos se mide en **decibelios (dB)** de acuerdo con una escala logarítmica que tiene su origen en el valor del nivel mínimo medio de audición de las personas (10^{-12} w/m^2).

Soluciones a los ejercicios propuestos

A.5. a) $v = 1,2 \cos 6t$ m/s; b) $a = -7,2 \sin 6t$ m/s²; c) $-0,15$ m; d) $0,51$ m/s; $6,52$ m/s²; e) $0,2$ m; $1,2$ m/s; $7,2$ m/s².

A.17. a) 30 m; $0,01$ s; 3000 m/s; 100 Hz; 200π rad/s; b) 1 m; 2 s; $0,5$ m/s; $0,5$ Hz; π rad/s.

A.18. $y = 0,05 \sin 2\pi(2t - x/1,5 + 0,08)$ m.

A.19. $7,82$ rad.

Actividades complementarias

1. 3 m; $0,64$ Hz; $\pi/2$ s; 4 rad/s.

2. $0,26$ s; $x = 0,03 \sin 24,17t$ m.

3. 0 m.

4. $y = 8 \sin \pi t$ cm; $-6,93$ cm.

5. a) $0,01$ m; $0,1$ m; 50 Hz; $0,02$ s; 5 m/s; b) 1 m; $1,1$ m; $1,2$ m; etc.

6. a) $7,95 \cdot 10^{-2}$ Hz; $1,99$ m/s; b) $11,42$ s.

7. a) $y = 2 \sin[2\pi(100t - x/3) + \pi/2]$ m; b) $7,5 \cdot 10^{-3}$ s.

8. a) 4 s; 16 cm; 4 cm/s; b) π rad.

9. a) 2 m/s; b) $0,5$ s.

El poder unificador de la física: el electromagnetismo

Quizá sea adecuado comenzar esta parte con un estudio sobre la Óptica hasta llegar a la “concepción sobre la luz a mediados del siglo XIX”, cuando parecía no haber duda sobre el carácter ondulatorio de la luz, aunque se ignorase la naturaleza de estas ondas.

A continuación se aborda un campo tan alejado como los estudios sobre Electricidad y Magnetismo, hasta llegar a la síntesis electromagnética, que acabaría integrando en un mismo cuerpo de conocimientos la Óptica, la Electricidad y el Magnetismo, constituyéndose así en el otro gran pilar de ese imponente edificio que es la Física clásica.

3. Óptica

Históricamente la Óptica apareció como una ciencia con escasa relación con otros campos de la Física, pero terminaría –como veremos en el siguiente tema– integrándose en un único cuerpo teórico, junto a la Electricidad y el Magnetismo.

A.1 Dar una relación de las aplicaciones de la Óptica que se conozcan.

De acuerdo con la actividad A.1. estudiaremos la luz y sus propiedades, siendo los instrumentos citados, aplicaciones surgidas de la comprensión de las mismas, por lo que desarrollaremos el tema según el siguiente índice:

1. Primeras ideas acerca de la luz
2. Propagación de la luz
3. Reflexión de la luz
4. Refracción de la luz
5. Naturaleza ondulatoria de la luz
 - 5.1. Difracción e interferencia
 - 5.2. La dispersión y el espectro visible. Espectroscopía
 - 5.3. Color y visión
 - 5.4. Polarización

1. Primeras ideas acerca de la luz

En el estudio de cualquier fenómeno las observaciones más elementales se acompañan habitualmente de interpretaciones más o menos confusas, pero sin las cuales difícilmente se podría avanzar.

A.2 Exponer, a título de hipótesis, las ideas que se posean sobre cómo se produce la luz y cómo se propaga hasta nuestros ojos.

A.3 Sugerir qué aspecto del comportamiento de la luz habría que analizar para decidir si se trata de ondas o partículas.

A.4 El debate sobre la naturaleza de la luz se inicia en el siglo XVII con la controversia de dos grandes científicos: Newton (defensor del modelo corpuscular) y Huygens (del ondulatorio). Exponer cuáles son los fenómenos que cabe esperar según cada una de las concepciones.

Naturaleza de la luz (I)

Los atomistas (Leucipo, Demócrito, Epicuro y Lucrecio) pensaron que la visión se producía porque los objetos emiten una especie de sombras o simulacros que, en un tiempo muy breve, penetran en los ojos. En el siglo VI a. C. los pitagóricos postularon la existencia de algo que salía del ojo para dirigirse hacia el objeto y tactarlo. Empédocles concibió un sistema de dobles emanaciones que, partiendo del ojo y del objeto, se encontraban en el aire.

Para Aristóteles, no existe sino una alteración del espacio intermedio que imprime una presión en el ojo y desaparece con las tinieblas.

Se trata de teorías de la sensación. Los primeros pasos hacia una teoría geométrica los dará Euclides hacia el 300 a. C. Suponía que la luz estaba formada por un conjunto de rayos que emitían los ojos. El tamaño del cuerpo que se miraba dependía del ángulo de los rayos que se dirigían hacia él. Establece la ley de la reflexión.

Hasta trece siglos después, con el árabe Alhacen de Basora (965-1039) no hay indicio de progreso. Lejos de ser un simple intermediario, reestructura la Óptica. Apunta la idea de que los rayos proceden de los objetos o que van del Sol a los objetos y de éstos a los ojos. Obtiene la ley de la reflexión y la aplica al estudio de la formación de imágenes en los espejos. Mostró que el ángulo de incidencia era proporcional al de refracción.

A fines del siglo XVI y principios del XVII comienza una gran actividad en el campo de la Óptica. En esta época se generaliza el uso de las lentes y espejos, a lo que dió gran impulso Della Porta (1535-1615). También se generaliza el uso de instrumentos ópticos, después de la utilización del antejo por Galileo (1565-1642) en 1610 y de que Kepler (1571-1630) en su obra, la *Dióptrica*, describa el funcionamiento de todos los aparatos ópticos.

La ley correcta de la refracción fue descubierta en 1621 por Willebrod Snell (1591-1626). Esta ley se dió a conocer en el *Discurso del método, acompañado de tres ensayos, la dióptrica, la meteorología y la geometría* (1637) por Descartes (1596-1650). Para interpretar la reflexión y la refracción de la luz, Descartes suponía que el comportamiento de la luz, al llegar a una superficie de separación de dos medios, era semejante al de una pelota. Si la superficie es rígida, la bola rebota y sufre una reflexión. Por el contrario, si la pelota atraviesa la superficie, en el segundo medio la pelota aumentará su velocidad y seguirá una trayectoria que se acerca a la normal, de acuerdo con lo que se conocía experimentalmente. La teoría de Descartes predecía, pues, que la velocidad de la luz aumentaba al pasar de un medio menos denso a otro más denso, como es el caso de la transición del aire al agua. Para explicar la propagación de la luz, Descartes utilizó otro modelo. La luz se transmitía del Sol a la Tierra o del objeto al ojo por medio de la presión o de la acción a través del éter, de manera análoga al pulso que se propaga por el bastón de un ciego cuando golpea los objetos. Según esta teoría, los colores de la luz se podían interpretar como las diferentes velocidades de rotación de los vórtices del éter: los que giran más deprisa producirían el color rojo y los de velocidad angular más pequeña, el color azul.

En su *Óptica* (1704) Newton adoptó la teoría corpuscular. Consideró que la luz estaba formada por partículas emitidas por el objeto luminoso que se movían en línea recta. La formación de sombras y penumbras parecía confirmar dicha teoría. Para explicar los anillos coloreados que se forman en las lentes convexas situadas sobre un vidrio plano (un fenómeno de interferencia), tuvo que suponer que las partículas excitaban movimientos vibratorios en el éter, que podían reforzar o impedir su movimiento. El fenómeno de la polarización de la luz, descubierto por Erasmus Bartholin en 1670 en la doble refracción del espato de Islandia, se podía explicar con la teoría corpuscular de la luz, suponiendo que los corpúsculos tenían "lados".

C.1 Indicar aspectos de la visión que los antiguos modelos griegos no podían explicar.

2. Propagación de la luz

A continuación se van a abordar algunos fenómenos relacionados con la propagación de la luz: la dirección y velocidad de la luz en un medio.

A.5 Tanto la teoría corpuscular como la ondulatoria sugieren una propagación rectilínea de la luz. Sugerir alguna forma de contrastar dicha predicción y realizar alguna de las contrastaciones propuestas.

A.6 Si colocamos una lámina de papel frente a un objeto luminoso (p.ej. una vela), ¿se formará la imagen del objeto en la lámina? ¿Por qué?. Comprobarlo. ¿Cómo podría conseguirse?

A.7 La propagación rectilínea de la luz permite explicar la formación de sombras y penumbras así como los eclipses de Luna y Sol. Dibujar los correspondientes esquemas de rayos.

A.8 Exponer las ideas que se tengan sobre la velocidad de la luz.

A.9 Proponer algún diseño experimental adecuado para determinar la velocidad de la luz.

Cuadro 1

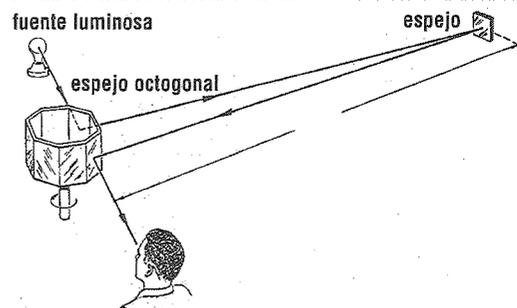
Velocidad de la luz

El primer método conocido para medir la velocidad fue propuesto por Galileo en 1638. Se colocan dos personas con linternas en las cimas de montañas próximas. Cuando la primera persona descubre su linterna, comienza a medir un tiempo. La segunda persona, al ver la luz de la linterna de la primera, descubre a su vez su linterna. Cuando la primera persona percibe la luz de la segunda linterna, para su reloj. La velocidad de la luz se calcularía dividiendo la distancia recorrida (que sería dos veces la que existe entre las montañas) por el tiempo medido por la primera persona. Este experimento fracasó debido a que el intervalo de tiempo medido era inapreciable por los aparatos de la época.

En 1675 el astrónomo Roemer observó ciertas anomalías en el período de rotación de un satélite de Júpiter. Dicho período coincidía con el tiempo transcurrido entre dos eclipses sucesivos producidos por el planeta. Cuando la Tierra se encontraba alejada de Júpiter, el período de rotación aumentaba. Roemer interpretó que el incremento del tiempo se debía a la mayor distancia que la luz tenía que recorrer hasta alcanzar la Tierra. Obtuvo un retraso máximo de 22 minutos cuando Júpiter y la Tierra se encontraban en puntos diametralmente opuestos con respecto a la órbita terrestre. Conocido dicho retraso y el valor del diámetro de la órbita de la Tierra, Roemer pudo calcular la velocidad de la luz y establecer que era un valor finito.

Si se quiere observar una estrella situada perpendicularmente al plano de rotación terrestre, se comprueba que el telescopio no se debe colocar verticalmente sino formando un ángulo que viene determinado por la velocidad de rotación de la Tierra y por la velocidad de la luz. Dicho fenómeno se conoce como aberración de la luz y fue descubierto por Bradley en 1728. La velocidad de la luz se puede calcular a partir del ángulo citado y de la velocidad orbital de la Tierra.

La medida de la velocidad de la luz, que Fizeau realizó en 1849, se basaba en la utilización de una rueda dentada. Un rayo de luz atraviesa dicha rueda por el espacio entre dos dientes, se refleja en un espejo distante y vuelve. Si la rueda dentada gira con la suficiente velocidad, el rayo de luz reflejado puede encontrar un diente de la rueda y no ser observado. Si se conoce el número de dientes de la rueda, su velocidad angular y la distancia entre la rueda y el espejo, se puede calcular la velocidad de la luz. Fizeau obtuvo un valor de $3,15 \cdot 10^8$ m/s. En el método de Foucault (1862) se usa un espejo octogonal giratorio. Si se envía un rayo de luz al espejo, se refleja en una de sus caras. Dicho rayo vuelve a reflejarse en un espejo distante y regresa al espejo giratorio convergiendo en un punto diferente puesto que el espejo giratorio se ha movido en ese tiempo. Si se conoce la nueva posición del rayo reflejado, la velocidad angular del espejo giratorio y la distancia entre éste y el espejo fijo, se puede obtener el valor de la velocidad de la luz. En el experimento de 1862 Foucault encontró un valor de $2,98 \cdot 10^8$ m/s. El método de Foucault fue perfeccionado por Michelson y Newcomb en 1879 y 1882 respectivamente.



La Teoría de la Relatividad Especial determinó el carácter de constante universal para la velocidad de la luz en el vacío. El Comité de Datos para la Ciencia y la Tecnología (CODATA) del Consejo Internacional de Uniones Científicas estableció en 1986 que la velocidad de la luz en el vacío es $299.792.458$ m/s con una incertidumbre relativa del 0%.

3. Reflexión de la luz

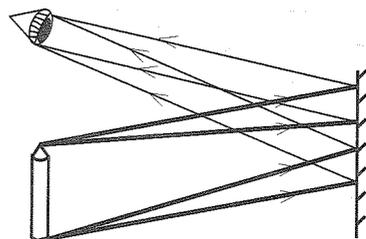
En este apartado y en el siguiente estudiaremos una serie de fenómenos que se producen cuando la luz interactúa con la materia.

A.10 Explicar qué le sucede a un rayo de luz que incide sobre un espejo, exponiendo, a título de hipótesis, las leyes que rigen dicho fenómeno.

A.11 Realizar un diseño experimental que permita comprobar la relación existente entre el ángulo de incidencia y el de reflexión.

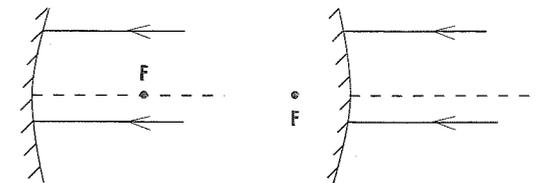
A.12 Explicar igualmente la reflexión de la luz a partir de la concepción ondulatoria.

A.13 Explicar la formación de la imagen de un objeto (para mayor simplicidad puntual) en un espejo plano, aplicando las leyes de reflexión.

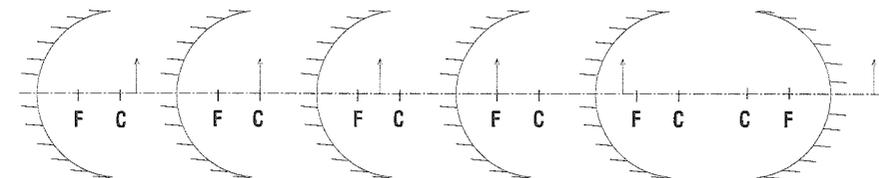


A.14 Explicar cómo es posible que veamos objetos, como una silla, etc, que no son luminosos.

A.15 Predecir, aplicando la ley de reflexión, qué sucede con los rayos incidentes sobre espejos cóncavos y convexos. Verificarlo –una cuchara pulida puede servir– y sugerir alguna aplicación práctica del espejo cóncavo.



A.16 Comprobar qué sucede con las imágenes formadas en los espejos cóncavos y convexos. Construir el esquema de rayos que lo explique.



4. Refracción de la luz

A continuación se plantea un nuevo tipo de interacción con la materia que se produce cuando la luz pasa de un medio transparente a otro distinto.

A.17 Explicar qué le sucede a un haz de luz al pasar del aire a un medio transparente más denso (p.ej. agua o vidrio). Comprobarlo.

A.18 Explicar la curvatura aparente de los objetos parcialmente sumergidos en agua.



A.19 Explicar la refracción de la luz a partir de las concepciones corpuscular y ondulatoria.

A.20 Cuando la luz pasa de un material a otro cuyo índice de refracción es inferior (p.ej. del agua al aire), la luz se separa de la normal. Determinar el ángulo de incidencia para el cual el ángulo de refracción vale 90° . Explicar lo que sucede para ángulos de incidencia iguales o mayores.

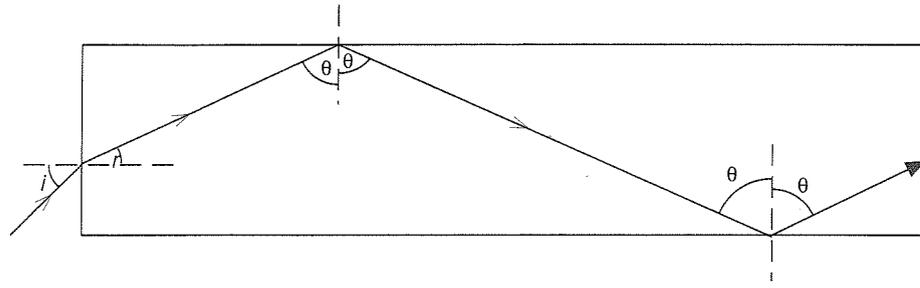
A.21 Un rayo de luz atraviesa el vidrio de una ventana. Calcular el ángulo con el que saldrá del vidrio si el ángulo de incidencia es 30° y el espesor del cristal 1 cm. Calcular la desviación que sufre el rayo. ($n_{\text{vidrio}} = 1,5$).

A.22 Sugerir posibles aplicaciones de la reflexión total.

Cuadro 2

Las fibras ópticas

Si en el extremo de un cable de vidrio se hace incidir un rayo de luz con un ángulo superior al ángulo límite entre el aire y el vidrio, se produce la reflexión total del rayo. De esta forma la luz puede propagarse por el interior del tubo por medio de reflexiones sucesivas sin que disminuya apenas su intensidad. Un dispositivo de esta clase se llama fibra óptica y se utiliza para transmitir luz con unas pérdidas muy pequeñas.



Formado por dos cilindros concéntricos, el diámetro típico de un cable simple de fibra óptica es de 125 μm . En su interior se encuentra un pequeño cilindro de vidrio rodeado por otro cilindro exterior, también de vidrio. Dado que el índice de refracción de la envoltura es inferior al del núcleo, la reflexión total se produce en el interior de éste.

Los haces coherentes están formados por un conjunto de cables de fibra óptica que mantienen su posición relativa a lo largo de toda la longitud del tubo. Cada uno de dichos cables puede transmitir un elemento de una imagen determinada. De este modo se logra la propagación de una imagen cuya resolución se puede aumentar por medio de haces formados por muchos cables de diámetro muy fino. Si los cables se disponen al azar dentro del tubo se tiene un haz incoherente que sólo se utiliza para la transmisión de luz.

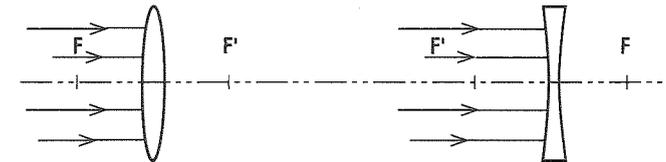
Además de la luz visible, los sistemas de fibra óptica permiten la propagación de otras señales. En el campo de las comunicaciones se utilizan rayos infrarrojos para la transmisión de señales telefónicas, de radio y televisión o musicales. Para ello se codifica de forma binaria la señal incidente y se transforma en pulsos de luz infrarroja que son transmitidos por la fibra óptica. Las señales transmitidas se descodifican al llegar a su destino. En 1977 se instaló en Chicago el primer sistema de comunicaciones por fibra óptica con una capacidad de 8.000 canales telefónicos simultáneos. Posteriormente se realizó la conexión entre Chicago y Filadelfia por medio de un sistema que permitía 24.000 canales telefónicos. En 1987 el desarrollo tecnológico de la fibra óptica permitió el envío de 27 gigabits/s, equivalente a 400.000 canales telefónicos.

Los datos anteriores ponen de manifiesto las ventajas de la fibra óptica con respecto a otros sistemas convencionales de transmisión de información, como los cables de cobre. La ausencia total de interferencias eléctricas y la mayor facilidad en el tendido de las líneas por la mayor flexibilidad y ligereza de las fibras ópticas constituyen otros aspectos positivos.

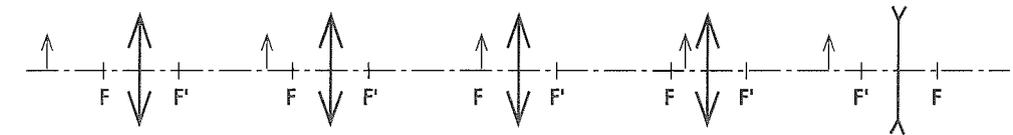
Las fibras ópticas también presentan un extenso campo de aplicación en la medicina, p.ej. como bisturí en las intervenciones oculares.

Sin duda, el dispositivo óptico más importante es la lente delgada, conocida ya en el siglo XIV. Las lentes delgadas suelen ser circulares y sus caras son porciones de esfera (o de plano). Esto da origen a las lentes biconvexas, planoconvexas, bicóncavas y meniscos convergentes y divergentes.

A.23 Predecir, aplicando la idea de refracción, qué sucede con los rayos paralelos incidentes sobre lentes biconvexas y bicóncavas. Comprobarlo. Mostrar la existencia de un foco a cada lado de la lente biconvexa y dar una estimación de la distancia focal.



A.24 Comprobar qué sucede con la imagen de un objeto (p.ej. esta hoja de papel) utilizando ambos tipos de lente. Construir el esquema de rayos que lo justifique.



A.25 Localizar la imagen de un objeto luminoso a través de una lente delgada convergente mediante una pantalla. ¿Qué sucedería si quitásemos la lente? ¿Y si cubriésemos con un cartón media lente? Comprobarlo.

A.26 Enumerar algunos defectos del ojo, indicando el tipo de lente adecuado para corregirlo.

A.27 (Opc.) Construir un anteojo de Galileo.

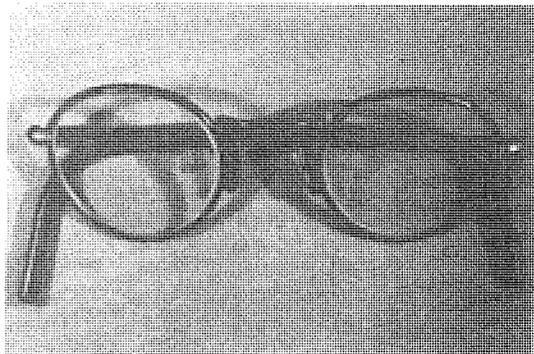
Instrumentos ópticos básicos

El ojo humano está formado por un recinto esférico que se vuelve transparente en una zona conocida como córnea. Junto a ésta existe una membrana (el iris) en la que se encuentra un diafragma (la pupila) que regula la cantidad de luz que entra. A continuación se halla una lente llamada cristalino, la cual permite enfocar las imágenes sobre la retina (envoltura interna, situada en la parte posterior del ojo). La acomodación es el proceso por el cual el ojo enfoca los objetos. Se realiza por medio de los músculos ciliares que varían la curvatura del cristalino. El punto próximo corresponde a la menor distancia que el ojo puede enfocar. Suele tener un valor medio de 25 cm.

Los defectos de refracción más comunes del ojo son la miopía, la hipermetropía y el astigmatismo. En el ojo miope la imagen se forma por delante de la retina debido al excesivo diámetro del globo ocular por lo que los objetos lejanos se ven borrosos. Se corrige por medio de lentes divergentes. En la hipermetropía la formación de la imagen se realiza detrás de la retina,

lo cual crea dificultades para enfocar objetos cercanos. La corrección de la hipermetropía se realiza con lentes convergentes. El ojo astigmático presenta una córnea con una curvatura no uniforme que imposibilita el enfoque simultáneo de líneas horizontales y verticales. Se puede corregir con lentes cilíndricas con curvatura de signo opuesto a la curvatura de las secciones defectuosas de la córnea.

La cámara fotográfica funciona de manera semejante al ojo. Está formada básicamente por una lente convergente, llamada objetivo, un diafragma que regula la cantidad de luz que entra y un obturador que controla el tiempo que la película está expuesta a la luz. Cuando se realiza el enfoque, se mueve el objetivo para que la imagen que se forme sobre la película sea clara.

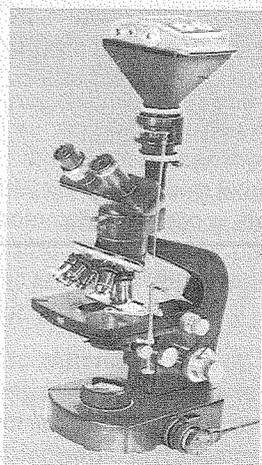


Cuadro 3

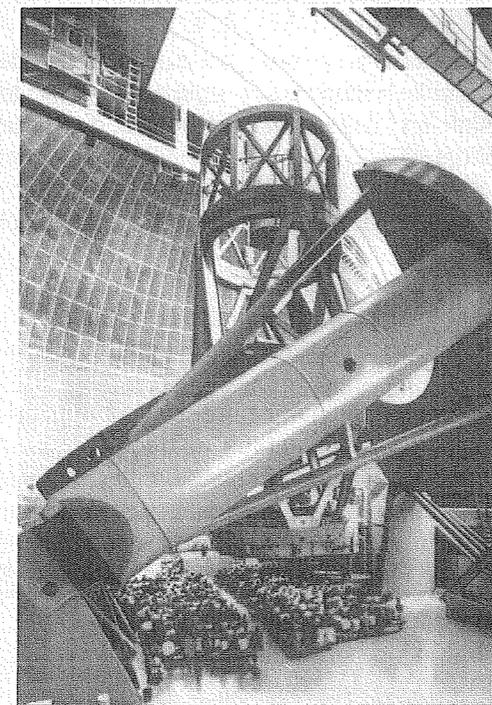
Instrumentos ópticos

El microscopio simple o lupa permite aumentar el ángulo bajo el cual se ve un objeto. De esta forma se puede apreciar con más precisión sus detalles. Para lograr este efecto se utiliza una lente convergente, situando el objeto entre dicha lente y el foco. Así se obtiene una imagen virtual, no invertida y de mayor tamaño. En el microscopio simple el aumento angular (cociente entre el ángulo bajo el cual se ve el objeto a simple vista y el ángulo subtendido cuando se ve a través del microscopio simple) es proporcional a la potencia (inversa de la distancia focal imagen) de la lente. El aumento se indica por un número seguido por una cruz (X). El aumento máximo de los microscopios simples no supera el valor de 25X.

Con el microscopio compuesto se consiguen aumentos del objeto muy superiores a los que proporciona el microscopio simple. El microscopio compuesto consta de dos lentes convergentes denominadas ocular y objetivo. El cuerpo que se quiere observar se coloca delante del objetivo, a una distancia ligeramente mayor que la focal de dicha lente. De esta manera se consigue una imagen real, invertida y de mayor tamaño. El ocular se sitúa de forma que la imagen anterior se forme entre el ocular y su foco, como en un microscopio simple. La imagen resultante resulta virtual, invertida y de mayor tamaño que el objeto. En el microscopio compuesto el aumento total resulta ser inversamente proporcional a las distancias focales del ocular y del objetivo. Los microscopios compuestos logran hasta 1000 aumentos.



El telescopio de refracción produce imágenes aumentadas de objetos muy lejanos. Formado por dos lentes convergentes, denominadas objetivo y ocular, la imagen producida por la primera se forma en su foco dada la situación en el infinito del objeto. Dicha imagen resulta ser de menor tamaño que el objeto e invertida. El ocular se coloca de forma que la imagen producida por el objetivo se sitúe muy cerca de la distancia focal ocular. De esta manera se forma una imagen invertida, virtual y mucho mayor que el objeto. El aumento angular del telescopio de refracción es directamente proporcional a la distancia focal del objetivo e inversamente proporcional a la focal del ocular.



El telescopio de reflexión utiliza una lente convergente como ocular y un espejo cóncavo como objetivo. Los rayos procedentes de un objeto muy lejano convergen en el foco del espejo donde un espejo plano los desvía hacia una lente convergente que forma una imagen real.

Para observar objetos terrestres muy distantes se utiliza el antejo de Galileo. Consta de una lente divergente que hace de ocular y otra convergente como objetivo. La lente divergente se coloca entre el objetivo y su foco. De esta forma los rayos procedentes del objeto, que convergerían en el foco del objetivo, atraviesan la lente divergente formando una imagen virtual y no invertida.

El catalejo sirve para ampliar objetos terrestres. Está formado por tres lentes convergentes denominadas objetivo, ocular y lente de campo. Ésta, situada entre las dos primeras, tiene como función invertir la imagen formada por el objetivo de manera que la imagen final no resulte invertida.

5. Naturaleza ondulatoria de la luz

Los fenómenos estudiados hasta aquí pueden explicarse tanto con la concepción corpuscular de la luz, como con la ondulatoria. Estudiaremos a continuación, fenómenos típicamente ondulatorios como la interferencia y la difracción, la dispersión, polarización, etc.

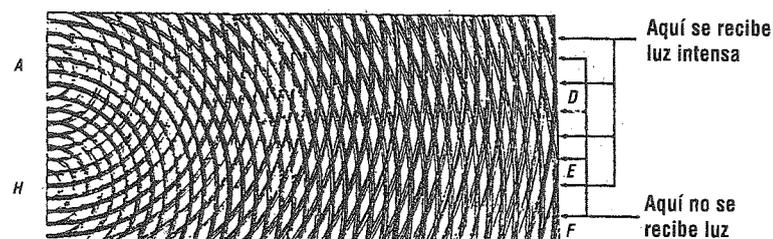
5.1. Difracción e interferencia

La dificultad de realizar las experiencias anteriores y el gran prestigio de Newton, hizo que la teoría corpuscular de este último prevaleciera más de un siglo sobre el modelo ondulatorio de Huygens. Sin embargo, a principios del siglo XIX, Young, Fresnel y otros, dieron una sólida base teórica y experimental al modelo ondulatorio.

A.28 Indicar cómo se podría constatar si la luz se difracta o no se difracta.

A.29 Se hace pasar luz por un orificio. ¿Qué diagrama se obtendría en la pantalla si la luz estuviese constituida por partículas? ¿Qué diagrama se obtiene en realidad?

Mayor dificultad plantea la observación de la interferencia por la necesidad, como vimos en el tema anterior, de que los focos de luz sean coherentes, es decir, tengan la misma frecuencia (luz monocromática) y estén en concordancia de fase. Estas dificultades fueron resueltas por Young mediante el experimento de la doble rendija que podemos ver en la figura adjunta.



A.30 Si la luz estuviese constituida por partículas ¿qué veríamos en la pantalla?

En vez de ello Young observó una serie de rayas brillantes y oscuras, que explicó suponiendo que se había producido una interferencia de ondas.

Los rayos X fueron descubiertos por W. K. Röntgen en 1895. Según sus propias palabras: "Estaba trabajando con un tubo de rayos catódicos, recubierto con un cartón negro; sobre la mesa había un papel fluorescente, y estaba haciendo pasar una corriente a través del tubo cuando noté una línea brillante a lo largo del papel... El efecto sólo podía ser producido por la luz; pero del tubo no podía venir luz porque la hoja de cartón que lo cubría era completamente opaca... En pocos minutos no había duda: del tubo venían rayos que tenían un efecto luminoso sobre el papel fluorescente... A primera vista parecía una nueva clase de luz invisible. Era, evidentemente, algo nuevo no registrado hasta entonces".

A.31 Sugerir algún posible experimento para verificar la naturaleza de los rayos X.

Los rayos X son ondas electromagnéticas producidas por la deceleración de los electrones cuando son detenidos por un blanco. Tienen longitudes de onda pequeñas, del orden de 0,1 nm, que se pueden determinar a partir de las altas tensiones empleadas, utilizando la teoría del fotón de Einstein, como veremos en el tema 6. En 1912 Laue sugirió que la distribución regular de los átomos dentro del cristal podía actuar como una red de difracción de los rayos X, puesto que dichas ondas eran del mismo orden de magnitud que el espaciado de los átomos de un cristal. Actuando sobre esta sugerencia, Friedrich y Knipping hicieron que un haz de rayos X pasase a través de un cristal detrás del cual existía una placa fotográfica. Además del haz central observaron una distribución regular de puntos (diagrama de Laue). Confirmaron así dos hipótesis importantes: que los rayos X son una forma de radiación electromagnética y que los átomos en un cristal están distribuidos en una red regular.

Una de las aplicaciones más conocida de los rayos X es la realización de radiografías. Menos conocida es la tomografía asistida por ordenador (TAC), en la que un haz de rayos X atraviesa tejidos y las imágenes son procesadas por ordenador. La difracción de rayos X ha jugado un papel fundamental en la ciencia de nuestro siglo por su contribución a la determinación de la estructura de sustancias inorgánicas y orgánicas. Es difícil pensar en la biología molecular sin las técnicas de difracción, cuyos datos permitieron determinar la estructura de proteínas, de la hemoglobina y del ADN (Watson y Crick en 1953).

5.2. La dispersión y el espectro visible. Espectroscopía

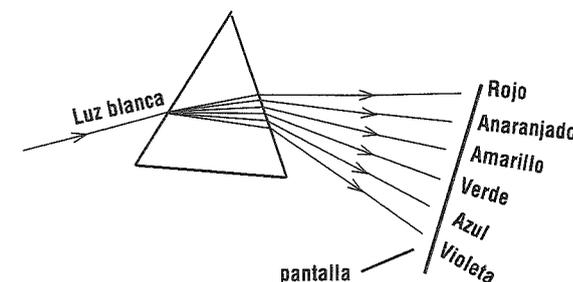
En los apartados anteriores se han estudiado fenómenos relacionados con la luz de una sola longitud de onda (luz monocromática). Sin embargo la luz blanca está formada por ondas cuyas longitudes de onda están comprendidas entre la correspondiente al rojo y al violeta. En este apartado se abordarán fenómenos propios de la luz no monocromática.

A.32 Comprobar lo que sucede cuando inciden rayos de luz blanca sobre un prisma. Intentar explicarlo.

A.33 ¿Cómo se explica el arco iris?

Una aplicación muy importante de la dispersión es el espectroscopio, aparato constituido por un colimador, un prisma y un anteojo, que permite observar los espectros de la luz.

A.34 Analizar mediante un espectroscopio elemental la luz emitida por diferentes sustancias y establecer semejanzas y diferencias entre los espectros.



A.35 En 1929 Hubble descubrió que la luz procedente de las galaxias lejanas tiene frecuencias inferiores a las correspondientes al espectro del Sol. Es decir, hay un desplazamiento hacia el rojo, tanto mayor cuanto más lejos están las galaxias. ¿Qué explicación puede darse de este hecho?

5.3. Color y visión

En actividades anteriores hemos intentado explicar la formación de imágenes. Para llegar a la comprensión de la visión es necesario considerar otros aspectos físicos como la luminosidad, el color, etc.

A.36 Observar de cerca la pantalla de un televisor en color. ¿Cómo se puede explicar que se vean todos los colores?

A.37 Explicar por qué el papel es blanco, el carbón es negro, la sangre y el cinabrio son rojos, la hierba verde, etc.

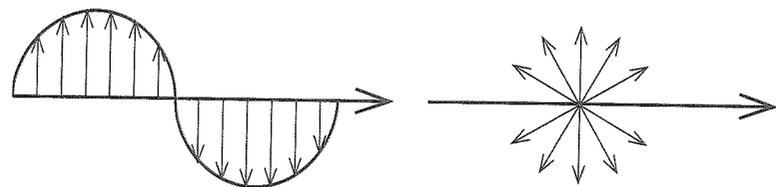
A.38 ¿Qué sucedería si se iluminaran los cuerpos anteriores con luz que no fuese blanca, p.ej. con una bombilla roja inactínida como la que se usa en los laboratorios fotográficos?

Las moléculas (p.ej. del aire, del agua) también dispersan la luz (como los prismas) o la absorben. Ese fenómeno es el origen de la formación de los colores de nuestro entorno.

El hecho de que el cielo sea azul y las puestas o salidas de sol rojas se explica por el *scattering* (dispersión según muchos traductores, difusión según algunos) de la luz por las moléculas de oxígeno y nitrógeno (en todas direcciones y con la misma frecuencia que la incidente). Es proporcional a la cuarta potencia de la frecuencia. Por lo tanto, las moléculas dispersan más las frecuencias más elevadas, como los prismas. Por ello, en una atmósfera sin mucho vapor de agua ni contaminación, el cielo parece azul porque las luces azul y violeta se dispersan más que las rojas y naranjas. A la puesta del sol, los rayos solares atraviesan una longitud máxima de atmósfera y por ello la luz que alcanza la superficie terrestre es pobre en azul, con lo que la puesta de sol aparece rojiza. Las gotitas o cristallitos de agua de las nubes (mucho mayores que la longitud de onda λ) dispersan uniformemente todas las frecuencias y por ello las nubes aparecen blancas o grises.

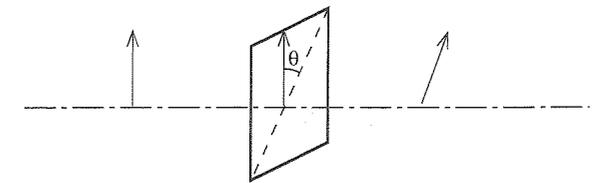
5.4. Polarización

Young y Fresnel suponen que la luz es una onda transversal, es decir, la vibración es perpendicular a la dirección de propagación. Si la vibración se mantiene paralela a una línea fija en el espacio, se dice que la onda está polarizada linealmente. La luz ordinaria, procedente del Sol o de una lámpara, es una mezcla de ondas que vibran en todas direcciones y, por tanto, se dice que no está polarizada.



A partir de luz natural se puede obtener luz polarizada por doble refracción con cristales de espato de Islandia (experiencia realizada por Erasmus Bartholin en 1670). También se puede producir por absorción, utilizando láminas de polarización (inventadas por Edward Land en 1929), que consisten en largas moléculas conductoras paralelas. Actúan como rendijas que permiten que pase una dirección de polarización (denominada eje del polarizador).

A.39 Supongamos que luz polarizada verticalmente de amplitud A_0 incide sobre un polarizador cuyo eje forma un ángulo θ con la vertical. Determinar la amplitud A y la intensidad I de la luz que atraviesa el polarizador.



A.40 Predecir qué sucede con la luz no polarizada cuando atraviesa dos polarizadores de ejes perpendiculares. Verificarlo experimentalmente.

Otra manera de producir luz polarizada a partir de luz no polarizada es por dispersión y por reflexión. Cuando la luz incide sobre una superficie no metálica (un lago, una carretera, etc.) el haz reflejado está polarizado preferentemente en el plano paralelo a la superficie. La cantidad de polarización por reflexión depende del ángulo. Varía desde una polarización nula para incidencia normal hasta una polarización del 100% para el ángulo de polarización o de Brewster b .

A.41 Determinar el ángulo b . Sabiendo que los rayos reflejados y refractados son perpendiculares, es decir, $b + r = 90^\circ$. ¿Cuanto valdrá en la superficie de un lago? ($n_{\text{agua}} = 1,33$).

A.42 Indicar posibles aplicaciones de los polarizadores.

Naturaleza de la luz (II)

De Huygens a la física cuántica

El primero en sugerir una teoría ondulatoria de la luz fue Francesco Grimaldi (1618-65), para explicar los fenómenos de difracción (p.ej. bordes de sombras coloreados), dado que las ondas pueden rodear fácilmente los obstáculos.

Huygens publicó en 1690 su *Traité de la lumière*. En él establece la naturaleza ondulatoria de la luz al indicar que se trata de la propagación en un medio de una perturbación. Por medio del principio que lleva su nombre, explica la reflexión y la refracción de la luz. La formación de interferencias y la difracción son fenómenos propios de las ondas. Aunque en éstas ya se habían observado estos fenómenos (Grimaldi, anillos en lentes, etc.), el gran prestigio de Newton hizo que la teoría ondulatoria fuese cuestionada y prevaleciese la corpuscular. También contribuyó a ello el hecho de que no se pudiese comprobar cómo disminuye la velocidad de la luz al pasar a un medio más denso.

A principios del siglo XIX Young realizó el experimento de la doble rendija en el que se producían diagramas de bandas brillantes y oscuras. Dicho fenómeno podía explicarse fácilmente si se consideraba que la luz era una onda y daba lugar a interferencias constructivas y destructivas.

En 1816 Fresnel presentaba una memoria a la Academia Francesa de Ciencias en la que aportaba pruebas a favor de la teoría ondulatoria de la luz. De acuerdo con dicha memoria, Poisson –un convencido defensor de la teoría corpuscular– dedujo teóricamente la presencia de un punto brillante central en la difracción de la luz por un obstáculo circular. El experimento fue realizado por Arago y confirmó la predicción de Poisson.

Los experimentos de Young y Fresnel confirmaron la naturaleza ondulatoria de la luz como onda transversal. Sin embargo, era un hecho conocido que dicha clase de ondas sólo se propagaban por medios sólidos. Por tanto se llegó a una conclusión absurda: dado que las ondas luminosas necesitan un medio sólido para transmitirse, el éter entre los cuerpos debía tener las características de un cuerpo sólido a pesar de que se observaba su naturaleza de gas.

A pesar de los experimentos de Young y de Fresnel, la controversia entre la teoría corpuscular de Newton y la ondulatoria de Huygens no se pudo resolver hasta 1850. En ese año Foucault y Fizeau realizaron medidas de la velocidad de la luz en el aire y en el agua. Encontraron que la velocidad en el segundo medio era menor que en el primero, de acuerdo con la predicción de la teoría ondulatoria y en contradicción con el modelo corpuscular de Descartes.

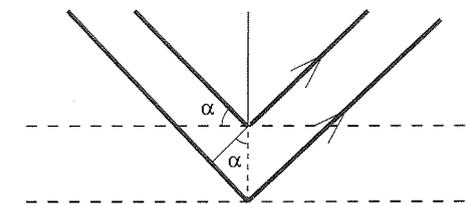
Las dificultades que presentaba el modelo de la luz como onda transversal, que se propaga en un medio de unas características muy particulares, resultaron superadas gracias a la Teoría Electromagnética de Maxwell. Dicha teoría predice que una carga acelerada o vibrante produce campos eléctricos y magnéticos que se propagan, sin necesidad de un medio material, en forma de ondas electromagnéticas. La velocidad de dichas ondas coincide con el valor experimental de la velocidad de la luz, por lo que se identificó la luz como una onda electromagnética que no necesita ningún medio para su propagación.

La explicación del efecto fotoeléctrico realizada por Einstein en 1905 llevó a la consideración de la luz como fenómeno corpuscular. Planteó la hipótesis de que la energía de la luz se encuentra concentrada en unidades llamadas fotones cuya energía es proporcional a la frecuencia de la onda electromagnética y cuya masa en reposo es nula.

El carácter dual de la luz condujo a la síntesis según la cual los fotones no se deben considerar como partículas ni como ondas sino como objetos de una naturaleza diferente denominados cuantos.

Actividades complementarias

- 1 Determinar el desplazamiento paralelo de un rayo de luz al atravesar una lámina plana de caras paralelas de espesor $d = 1$ cm, cuyo índice de refracción es 1,5, para un ángulo de incidencia de 60° . (Selectividad. 1994)
- 2 Un objeto se encuentra colocado entre el foco y el centro de curvatura de un espejo cóncavo. ¿Estará la imagen invertida? ¿La imagen será mayor que el objeto? (Selectividad. 1994)
- 3 Justificar por qué, cuando no se utilizan gafas de buzo en el agua, se ven los objetos borrosos y con ellas se ven nítidos. (Selectividad. 1988)
- 4 Explicar por qué parece quebrada una varilla que está parcialmente sumergida en el agua. (Selectividad. 1990)
- 5 Cuando se mira hacia el interior de una piscina llena de agua (índice de refracción 1,33), ¿se subestima o se sobrestima su profundidad? (Selectividad. 1992)
- 6 Una onda pasa de un medio en el que su velocidad es v_1 a otro medio en el que la velocidad v_2 es mayor, ($v_2 > v_1$). ¿Qué condición se debe dar para que se produzca reflexión total? (Selectividad. 1994)
- 7 Un buceador provisto de plomos se tumba en el fondo de una piscina de 1,5 m de profundidad. Si el índice de refracción del agua es n , ¿qué zonas del exterior y del interior de la piscina podrá ver?
- 8 Si hubiera que decidir si una radiación desconocida está formada por partículas o por ondas, ¿qué tipo de pruebas realizarías? (Selectividad. 1988)
- 9 (Opc.) Deducir las condiciones de interferencia constructiva y destructiva en la experiencia de Young. (La separación d entre las rendijas d es mucho menor que la distancia l a la pantalla).
- 10 (Opc.) La luz blanca atraviesa dos rendijas separadas 0,5 mm y se observa un diagrama de franjas de interferencia en una pantalla situada a 2,5 m, la franja de primer orden se asemeja a un arco iris con luces violeta y roja en sus extremos. La luz violeta está a unos 2,0 mm y la roja a 3,5 mm del centro de la franja central blanca. Estimar las longitudes de onda de las luces violeta y roja.
- 11 (Opc.) En 1913 W. Bragg afirmó que al incidir un haz de rayos X que forma un ángulo φ con la superficie, la difracción de los rayos X es debida a la dispersión desde diversas series de planos paralelos de átomos. ¿Cuándo se producirá la interferencia constructiva responsable de los puntos del espectro de Laue?
- 12 Justificar que:
 - a) amarillo y cian producen verde.
 - b) cian y magenta producen azul.
 - c) amarillo y magenta producen rojo.
- 13 a) ¿Por qué es azulado el humo de un cigarro?
b) ¿Por qué es gris el humo exhalado por el fumador?



La visión de los cuerpos se realiza gracias a los rayos de luz que llegan a los ojos procedentes de la reflexión de la luz que tiene lugar en cada uno de los puntos de los cuerpos. Con anterioridad al siglo XIX se propusieron dos teorías para explicar la naturaleza de la luz: la **teoría ondulatoria** (la luz es una onda que se propaga por los medios materiales) y la **corpuscular** (la luz es un haz de partículas).

La luz se propaga por los medios homogéneos en línea recta con una velocidad muy grande que es máxima en el vacío.

Cuando la luz llega a la superficie de separación de dos medios y cambia su dirección, propagándose por el primer medio, se dice que ha sufrido una reflexión. La **ley de la reflexión** indica que el ángulo de incidencia es igual que el ángulo de reflexión. La **reflexión difusa** (reflexión realizada en muchas direcciones) tiene lugar en las superficies no pulimentadas.

La imagen que se forma en un espejo plano es virtual, del mismo tamaño que el objeto, no invertida y situada a la misma distancia (por detrás del espejo) que el objeto. Por aplicación de la ley de la reflexión se pueden construir las imágenes formadas en los espejos cóncavos y convexos.

La **refracción** de la luz tiene lugar cuando llega a la superficie de separación de dos medios y se propaga por el segundo, cambiando su dirección y velocidad. El **índice de refracción** de un medio es igual al cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en dicho medio. Si la luz pasa de un medio con índice de refracción n_1 , a otro con índice de refracción n_2 , se cumple la **ley de la refracción**: $n_1 \sin i = n_2 \sin r$ donde i es el ángulo de incidencia y r el de refracción. Al aplicar la ley de la refracción, se pueden construir las imágenes que se forman en las lentes convergentes y divergentes.

Cuando la luz pasa de un medio a otro cuyo índice de refracción es menor, se produce reflexión pero no refracción para los valores del ángulo de incidencia mayores que cierto ángulo denominado ángulo límite. Dicho fenómeno se conoce como **reflexión total**.

La luz visible está formada por ondas cuyas longitudes de onda son muy pequeñas. Por dicha razón sólo se observa la **difracción** de la luz cuando se utilizan rendijas muy pequeñas. En el experimento de la doble rendija de Young se forman rayas brillantes y oscuras como resultado de las interferencias de las ondas procedentes de cada rendija. Los fenómenos de **difracción** y de **interferencias** prueban que la luz es de naturaleza ondulatoria.

Los **rayos X** son ondas electromagnéticas de longitud de onda muy pequeña. Se difractan cuando atraviesan sustancias cristalinas porque el espaciado atómico es del orden de la longitud de onda de dichos rayos.

Cuando la luz visible atraviesa un prisma transparente, se descompone en los colores que la forman. Dicho fenómeno se conoce como **dispersión**. Se produce porque los distintos colores de la luz se desvían ángulos diferentes debido a que se propagan con velocidades que dependen de su frecuencia. La dispersión de la luz visible por las gotas de agua produce el arco iris. Cuando la luz emitida por una sustancia atraviesa un prisma, se produce una imagen, llamada **espectro**, que caracteriza a la sustancia.

El color de los cuerpos se produce por transmisión si el cuerpo es transparente o por reflexión si es opaco. En el primer caso, el color no absorbido y transmitido por el cuerpo determina su color; en el segundo caso, el color del cuerpo coincide con el de la luz reflejada.

La **mezcla aditiva** de colores se aplica a los cuerpos que emiten luz. Los colores fundamentales son rojo, verde y azul. Su mezcla produce el blanco. Cualquier color puede obtenerse a partir de mezclas aditivas de dos o tres colores fundamentales.

Dos colores se llaman **complementarios** si su mezcla aditiva produce el blanco.

La **mezcla sustractiva** de colores se refiere a los cuerpos que absorben determinadas frecuencias de la luz incidente, como ocurre con los pigmentos de pintura. Los colores fundamentales son magenta (rojo azulado), cian (azul verdoso) y amarillo. Su mezcla da lugar al negro. Al mezclar sustractivamente dos o tres colores fundamentales se obtiene cualquier color.

Cuando la luz interacciona con partículas de tamaño inferior a su longitud de onda, se produce en todas direcciones una emisión de ondas, preferentemente las de frecuencia elevada. Este fenómeno se llama **dispersión**. Si la interacción se realiza con partículas mayores que la longitud de onda de la luz, se dispersan todas las frecuencias.

Se dice que la luz está **polarizada linealmente** cuando la dirección de vibración del campo eléctrico o magnético de la onda electromagnética se mantiene paralela a un línea fija. Si un rayo de luz incide sobre una superficie no metálica, se polariza en un plano paralelo a la superficie. La polarización máxima se consigue para un ángulo de incidencia, llamado de Brewster, tal que la suma del mismo y el de refracción es 90 grados.

Soluciones a los ejercicios propuestos

A.21. 30° ; 0,35 cm.

A.41. 53° .

Actividades complementarias

1. 1,41 cm.

7. Circunferencia de radio $1,5 \operatorname{tg}(\operatorname{arc} \operatorname{sen} 1/n)$.

10(Opc.). $4 \cdot 10^{-7}$ m; $7 \cdot 10^{-7}$ m.

4. La interacción electromagnética

Este capítulo va a estar dedicado al estudio de una forma de interacción, la electromagnética, que juega un papel fundamental en el comportamiento de la materia: desde las fuerzas de fricción y las uniones entre átomos para dar lugar a las diversas sustancias, hasta la propagación de la luz (integrando un dominio inicialmente autónomo como la Óptica), y todo el espectro de ondas electromagnéticas. También ha revolucionado la vida de la Humanidad: desde la electrificación que se inició a finales del siglo XIX hasta el gran desarrollo actual de los medios de telecomunicación (radio, televisión, radar, etc.).

En cursos anteriores se puso de manifiesto la existencia de cargas eléctricas y su conservación. Se vio asimismo que Coulomb (1738-1806), mediante una balanza de torsión similar a la utilizada por Cavendish, demostró que las cargas interactúan con fuerzas análogas a las gravitatorias.

En este tema se profundizará en el estudio de la electricidad y el magnetismo, hasta el establecimiento de la teoría de Maxwell. De acuerdo con ello, desarrollaremos el tema con el siguiente hilo conductor:

1. Electricidad
 - 1.1. Campo eléctrico
 - 1.2. Fuerzas entre campos eléctricos y cargas
 - 1.3. Estudio energético de la interacción eléctrica
2. Magnetismo
 - 2.1. Relación entre fenómenos eléctricos y magnéticos
 - 2.2. Campo magnético
 - 2.3. Fuerzas entre campos magnéticos y cargas móviles
 - 2.4. Explicación cualitativa del magnetismo natural
3. Electromagnetismo
 - 3.1. Inducción electromagnética
 - 3.2. Teoría electromagnética de Maxwell

1. Electricidad

1.1. Campo eléctrico

La idea newtoniana de acción a distancia entre los cuerpos presentaba una serie de dificultades que no pasaron inadvertidas al propio Newton, como ya hemos visto este mismo curso al hablar de interacción gravitatoria

A.1 Recordar dichos problemas e indicar cómo tendrá lugar la interacción de cargas distantes entre sí.

A.2 Introducir una definición operativa de intensidad de campo e indicar cómo medirla.

A.3 Determinar la intensidad del campo creado por una carga puntual y por una distribución de cargas puntuales.

En el S.I. y en el vacío, el valor de k es $9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$. Se utiliza normalmente $k = 1/4\pi\epsilon_0$, donde ϵ_0 es la constante dieléctrica del vacío cuyo valor será, por tanto, $\epsilon_0 = 1/4\pi \cdot 9 \cdot 10^9$. Si las cargas se encuentran en un medio material ilimitado, se utiliza la constante dieléctrica del medio ϵ , que es mayor que la del vacío (la del aire es prácticamente igual). Como aparece en el denominador, cuanto mayor sea su valor, más débil será la fuerza que ejercen las cargas. Es decir, un medio con un valor alto de ϵ transmite difícilmente la interacción eléctrica. De ahí el nombre de constante dieléctrica.

La expresión $E = kQu/r^2$ establece que la carga Q crea alrededor de sí misma un campo eléctrico $E(r)$. La expresión $F = qE(r)$ establece que dicho campo actúa sobre la carga q , situada a la distancia r de Q , con una fuerza qE . En cuanto al campo de aplicación de estas expresiones, la que nos da el campo E se utiliza para cargas puntuales o en el exterior de las esféricas. Sin embargo la expresión $F = qE$ es válida independientemente de cómo se ha creado el campo E .

A.4 Dibujar el campo creado por una carga $Q = 2 \text{ C}$ en el punto A en los tres casos siguientes:
 a) en A hay una carga $q = 1 \text{ C}$; b) en A hay una carga $q = -1 \text{ C}$; c) en A no hay nada.
 a) Q A b) Q A c) Q A

A.5 Dadas las cargas $q = 10^{-8} \text{ C}$ y $q' = -2q$ situadas respectivamente en los puntos $(0,0)$ y $(2,0) \text{ m}$, determinar el campo eléctrico E en los siguientes puntos A $(0,1) \text{ m}$, B $(1,0) \text{ m}$, C $(2,1) \text{ m}$. ¿En qué punto será nula la intensidad de campo? Representar de forma cualitativa $E_x = f(x)$ para dicho campo.

Valores de campos eléctricos en la naturaleza (N/C)	
Interior de cables eléctricos domésticos	10^{-2}
Ondas de la radio	10^{-1}
Partes bajas de la atmósfera	10^2
Cerca de un peine de plástico cargado	10^3
Luz solar	10^3
Bajo una nube tormentosa	10^4
Descarga de un relámpago	10^4
Acelerador de electrones de un televisor	10^5
Cilindro cargado de una fotocopiadora	10^5
Tubo de rayos X	10^5
En el electrón de un átomo de hidrógeno	10^{11}
Superficie de un átomo de uranio	$6 \cdot 10^{21}$

A.6 Trazar las líneas de campo de: a) una carga positiva; b) una negativa; c) dos placas cargadas, con cargas de igual magnitud y signo contrario (condensador).

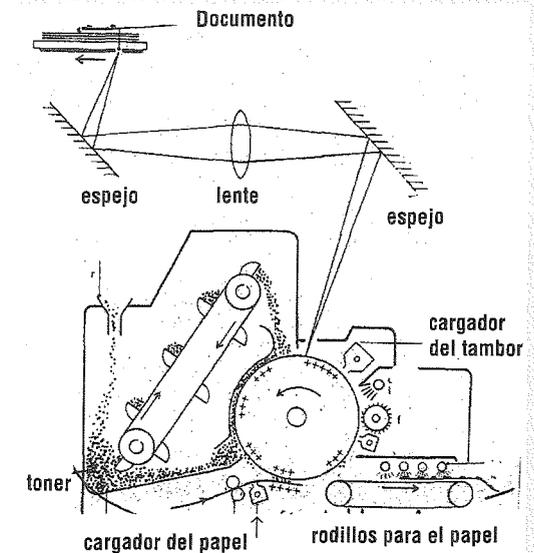
Cuadro 1

Aplicaciones de la electrostática

Entre las principales aplicaciones de la electrostática podemos mencionar los filtros de partículas y polvo que escapan por la chimenea, la fotocopiadora, las impresoras de chorro de tinta, etc.

En los humos que se producen en las industrias siderúrgicas y químicas así como en las plantas cementeras o en las centrales térmicas, se encuentran gran cantidad de partículas. Los **filtros electrostáticos** se utilizan para precipitar dichas partículas por medio de unas rejillas con carga negativa. Estas rejillas cargan a su vez a las partículas de polvo, las cuales son atraídas por unas placas cargadas positivamente. De esta forma las partículas capturadas caen a la base de la chimenea donde son recogidas.

El funcionamiento de la **fotocopiadora** se basa en las propiedades fotoconductoras del selenio. Cuando éste se ilumina, conduce la electricidad pero en la oscuridad se comporta como un aislante. En el interior de la fotocopiadora se encuentra un tambor de aluminio recubierto por una capa de óxido de aluminio y por otra más exterior de selenio, la cual se carga positivamente antes de comenzar a realizar la fotocopia. A continuación se ilumina el documento que se quiere copiar y su imagen se proyecta sobre el tambor. Las zonas iluminadas de éste se descargarán y las oscuras permanecerán con carga positiva debido a las propiedades del selenio. De esta forma se produce sobre el tambor una imagen latente formada por cargas positivas. Si se deposita sobre el tambor un polvo negro llamado "toner" cargado negativamente con anterioridad, será atraído a las zonas de carga positiva del tambor y repelido de las restantes. De esta manera se tendrá sobre el tambor una imagen latente formada por "toner". Al colocar sobre el tambor una hoja de papel cargada positivamente, el "toner" será transferido desde el tambor y formará la imagen sobre el papel.



Las **impresoras de chorro de tinta** utilizan un oscilador ultrasónico que convierte el chorro de tinta en un haz de gotas. El ordenador regula la carga positiva de un cilindro por el cual pasan las gotas. Cada una de ellas adquirirá una carga diferente de acuerdo con las instrucciones del ordenador sobre la carga del cilindro. A continuación las gotas atraviesan unas placas deflectoras entre las que existe una diferencia de potencial constante. Cada gota será desviada verticalmente de forma diferente según la carga que adquirió en el cilindro y lanzada hacia una hoja de papel. De esta manera se pueden formar los diferentes caracteres.

1.2. Fuerzas entre campos eléctricos y cargas

Hemos visto que la idea de campo simplifica el problema de la interacción eléctrica al desdoblarse en dos: 1) el estudio del campo eléctrico E creado por las cargas; 2) el estudio de las fuerzas que actúan sobre otras cargas situadas en el seno de dicho campo eléctrico E . En este apartado abordaremos este segundo problema, centrándonos en un caso de particular interés: la fuerza de un campo eléctrico E uniforme sobre una carga.

A.7 Determinar la fuerza que actúa sobre la carga q en el seno del campo eléctrico E . Aplicarlo al caso de campo creado por una distribución de cargas puntuales Q_i .

A.8 ¿Cómo se aceleraría linealmente una carga q mediante un campo eléctrico uniforme E ? ¿Cómo se cambiaría su dirección? ¿Qué tipo de movimiento realizará en cada caso?

A.9 Determinar las ecuaciones de movimiento de un electrón con velocidad inicial v_0 en el seno de un campo eléctrico uniforme de intensidad E en cada uno de los casos anteriores.

A.10 ¿Con qué ángulo sale desviado un electrón al pasar entre las placas de un condensador?

Cuadro 2

Movimiento de cargas eléctricas

El movimiento de las cargas eléctricas en un campo eléctrico tiene un gran interés práctico. Basta pensar en el tubo de rayos catódicos utilizado en la pantalla de los televisores y osciloscopios, o en los monitores de ordenador. Otro campo de interés lo constituye el de los aceleradores lineales.

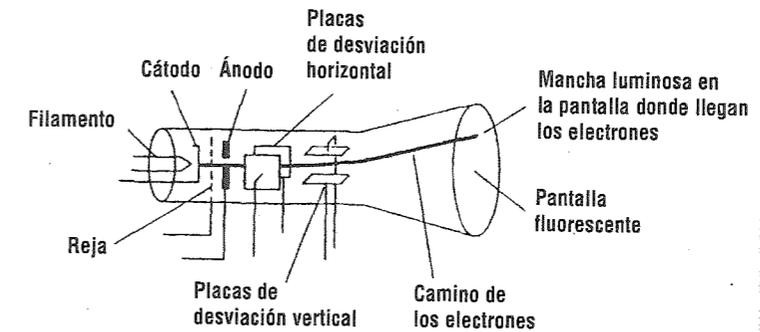
Los aceleradores lineales se utilizan para conseguir haces de partículas cargadas de gran energía cinética. El choque de dichos haces produce partículas cuyo estudio tiene como objetivo la investigación de la estructura subatómica de la materia.

El acelerador de Cockcroft-Walton consiste en un largo tubo en el que se ha hecho el vacío con el objeto de que las partículas cargadas se desplacen sin encontrar obstáculos. Cuando dichas partículas se encuentran en el interior del tubo, son aceleradas por medio de una placa que se encuentra a un potencial muy elevado. Al sobrepasar esta placa, las partículas encuentran otra que se encuentra a un gran potencial, lo cual produce que aumente la velocidad de las partículas. Si este proceso se repite sucesivamente, se pueden conseguir que las partículas alcancen energías del orden de varios MeV.

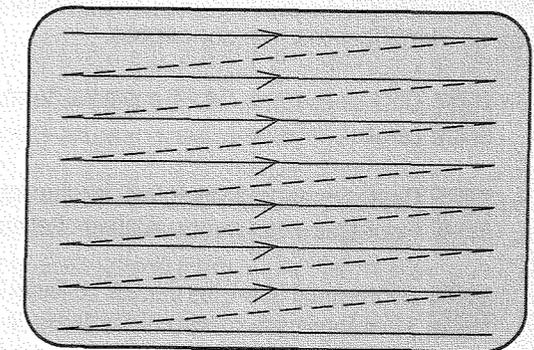
El acelerador de Sloan-Lawrence, al igual que el de Cockcroft-Walton, está formado por un largo tubo en el que se ha hecho el vacío. En su interior se encuentra un conjunto de placas paralelas entre las que existe una diferencia de potencial alterna muy grande. Cuando las partículas sobrepasan una de ellas, se sincroniza el potencial alterno de la siguiente, de forma que las partículas sean atraídas por ésta. Al repetir el proceso con cada una de las placas restantes, se obtienen partículas con velocidades cada vez más altas.

En el tubo de rayos catódicos de un televisor se produce un haz de electrones por medio de una placa caliente llamada cátodo. Dichos electrones son acelerados por otra placa, que se denomina ánodo, dispuesta de forma que exista una diferencia de potencial muy grande entre ella y el

cátodo. Los electrones atraviesan el ánodo por una pequeña abertura y llegan a una pantalla fluorescente en la que se produce un destello cuya intensidad depende de la intensidad del haz. Por medio de un campo eléctrico horizontal variable se puede lograr que el haz recorra la pantalla en dicho sentido, dando lugar a una línea de la pantalla. Si se aplica un campo eléctrico vertical al haz de electrones, es posible que al terminar el trazado de una línea horizontal, la siguiente sea desplazada hacia abajo. De esta forma dicho haz recorre todos los puntos de la pantalla creando puntos luminosos de intensidad variable que crean la sensación de una imagen. En las pantallas de televisión el haz electrónico traza 625 líneas en un tiempo de 0,04 segundos.



En el osciloscopio se utiliza un tubo de rayos catódicos semejante al de un televisor. Cuando se aplica una tensión eléctrica variable a las placas que producen el campo eléctrico vertical, en la pantalla se obtiene un desplazamiento vertical del haz electrónico que reproducirá, en la misma posición horizontal de la pantalla, las variaciones de la tensión de entrada. Para obtener una imagen de la tensión de entrada a lo largo del eje horizontal, es necesario que se produzca un desplazamiento horizontal del haz, simultáneamente con el movimiento vertical anterior. Dicho desplazamiento horizontal se produce por medio de un campo eléctrico en esa dirección. La velocidad de desplazamiento, denominada velocidad de barrido horizontal, se puede variar externamente.



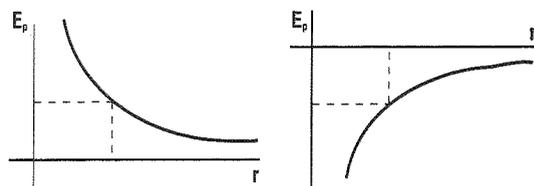
1.3. Estudio energético de la interacción eléctrica

Los conceptos de trabajo y energía van a permitir abordar las manifestaciones energéticas de la interacción eléctrica, es decir, de la relación entre el trabajo que se realiza al desplazar una carga en un campo eléctrico y las variaciones de energía que se producen.

A.11 Calcular el trabajo realizado por las fuerzas eléctricas cuando una carga q se desplaza desde r_1 a r_2 en el campo creado por otra carga Q . Dar así mismo la variación de la energía potencial del sistema que tiene lugar.

A.12 Obtener la expresión de la energía potencial eléctrica en un punto cualquiera del campo creado por Q sobre q , tomando como origen de la energía potencial E_p la separación infinita de las cargas. ¿Qué signo tendrá la energía potencial E_p ?

A.13 La siguiente gráfica muestra la variación de la energía potencial del sistema formado por dos cargas, en función de la distancia que existe entre ellas. Analizar dicha gráfica. Señalar cuándo dos cargas podrán formar un sistema ligado. ¿Cuándo pueden considerarse libres?



A.14 Introducir una nueva magnitud que juegue, desde el punto de vista energético, el mismo papel que la intensidad del campo eléctrico con respecto a las fuerzas. ¿Qué relación tiene con el campo eléctrico?

A.15 Calcular la diferencia de potencial entre dos puntos: a) en el caso del campo creado por una carga puntual; b) en el espacio comprendido entre dos placas conductoras cargadas con signos opuestos.

Así como en gravitación el concepto de potencial sólo tiene un interés formal, en electricidad es una magnitud muy importante, puesto que se puede medir con gran facilidad mediante el voltímetro y se utiliza en otros dominios (corriente continua, capacidad y condensadores, etc.). En cada uno de estos dominios se introdujo independientemente. En efecto, hacia 1800 Volta introdujo el concepto de tensión para el electrómetro condensador. En 1813 Poisson, viendo la analogía entre la ley de Coulomb y la de la Gravitación Universal, introdujo el concepto de potencial relacionándolo con la fuerza (como en este apartado), siguiendo la iniciativa de Lagrange (1772) y Laplace (1785). Por último, en 1826, Ohm introdujo la tensión en su conocida ley. Sólo en 1849 Kirchoff fue capaz de identificar los tres conceptos.

A.16 Obtener la expresión del potencial de una carga puntual Q . ¿Cuál será el de un conjunto de cargas puntuales?

A.17 Representar gráficamente el movimiento de las cargas positivas, inicialmente en reposo, colocadas en un campo eléctrico. Repetir la representación en el caso de cargas negativas.

A.18 Representar sobre los dibujos de líneas de fuerza de la A.6. las superficies equipotenciales. ¿Qué ángulos formarán con las líneas de campo? Esta actividad también se puede realizar experimentalmente con un papel de filtro empapado con una disolución saturada de nitrato de potasio, situada sobre un panel. Se utilizan clavos conectados a una fuente de alimentación como distribuciones de carga y un voltímetro para determinar los valores del potencial en cada punto del papel.

A.19 Elaborar un mapa conceptual de las principales magnitudes y relaciones introducidas para el estudio del campo eléctrico

A.20 Establecer semejanzas y diferencias entre el campo eléctrico y el gravitatorio. Predecir, además, los valores de sus respectivas fuerzas en un átomo de hidrógeno. Contrastar numéricamente dicha predicción.
(masaprotón = $1,7 \cdot 10^{-27}$ kg; masaelectrón = $1,9 \cdot 10^{-31}$ kg; cargaelectrón = $1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

2. Magnetismo

2.1. Relación entre fenómenos eléctricos y magnéticos

A.21 Realizar una revisión de las semejanzas y diferencias entre los fenómenos magnéticos y los eléctricos. Sugerir la introducción de magnitudes adecuadas para el estudio del campo magnético.

Las claras analogías entre dos fenómenos distintos, el magnetismo y la electricidad, dio lugar a la búsqueda de una relación entre ellos que pudiera explicar las características comunes.

A.22 Diseñar algún procedimiento experimental para poner en evidencia dicha relación.

A.23 Realizar las experiencias propuestas y analizar los resultados obtenidos. Señalar la diferencia fundamental entre la experiencia de Oersted y las que dieron un resultado negativo.

A.24 Considerar los problemas que plantean los resultados de la experiencia de Oersted, o dicho de otro modo, ¿qué investigaciones habría que emprender en torno a la relación que acabamos de establecer entre magnetismo y corriente eléctrica?

2.2. Campo magnético

El primer estudio que se realizó tras los experimentos de Oersted fue el del campo magnético creado por una corriente rectilínea por ser, evidentemente, el caso más simple.

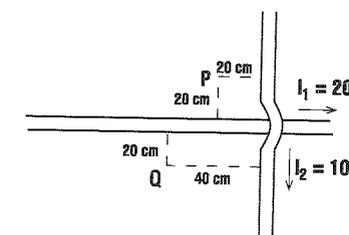
A.25 Teniendo en cuenta los resultados de la experiencia de Oersted representar, a título de hipótesis, las líneas del campo magnético creado por una corriente rectilínea. ¿De qué factores dependerá la intensidad del campo B en un punto próximo a la corriente? ¿Cuál es el sentido físico de la constante?

La constante depende del medio material que rodea al conductor. Se representa mediante $\mu/2\pi$, siendo μ la permeabilidad magnética del medio. Su valor en el vacío es $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ TmA⁻¹.

A.26 Diseñar experiencias para contrastar cualitativamente las hipótesis.

A.27 A partir de observaciones sobre cómo se desvía la aguja imanada, proponer una regla que relacione el sentido de las líneas de campo magnético con el sentido de la corriente.

A.28 Dados los conductores de la figura, determinar el campo magnético B en los puntos P y Q .



A menudo interesa obtener valores muy altos del campo magnético.

A.29 Indicar un modo de aumentar la intensidad del campo magnético sin tener que aumentar para ello la intensidad de corriente.

A.30 Dibujar las líneas de campo en la sección de un solenoide, comparando dicha distribución con la de un imán.

A.31 Transformar un solenoide en electroimán y observar las diferencias en cuanto a intensidad del campo creado. Razonar las ventajas de un electroimán sobre un imán natural y sugerir aplicaciones.

Valores del campo magnético (T)	
En una sala blindada magnéticamente	10^{-14}
En el espacio interestelar	10^{-10}
Campo magnético terrestre	10^{-4}
Imanes potentes	0,1-0,5
Grandes electroimanes industriales	1-2
Imanes superconductores	5
En la superficie de una estrella de neutrones	10^9

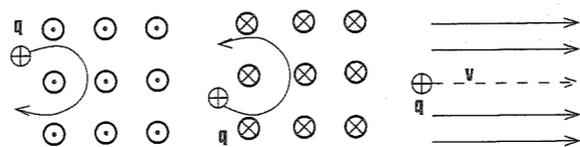
2.3. Fuerzas entre campos magnéticos y cargas móviles

Como ya hemos visto, toda carga móvil (ya sean cargas libres, imanes o corrientes naturales) crea a su alrededor un campo magnético. Estos campos magnéticos ejercen su acción sobre otras cargas, es decir, ejercen fuerzas magnéticas, cuyo estudio constituye la segunda línea de investigación.

2.3.a. Fuerza sobre una carga móvil

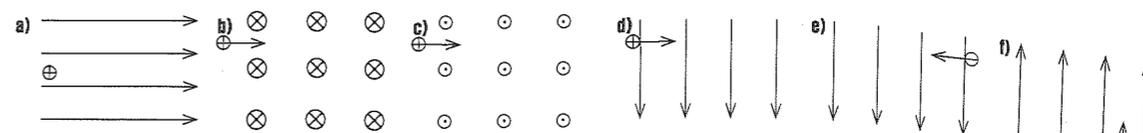
Para estudiar esta fuerza, dada su complejidad, utilizaremos campos magnéticos uniformes, es decir, constantes, como el que existe en el entrehierro de un imán de herradura.

A.32 En una zona en que existe un campo magnético constante entra una partícula positiva dotada de una velocidad v y las trayectorias que sigue en cada caso se indican en la figura adjunta. Se pide: a) en que casos está actuando una fuerza sobre q (teniendo en cuenta que el módulo de v se mantiene siempre constante); b) Dibujar la dirección y sentido de F en el caso en que corresponda.



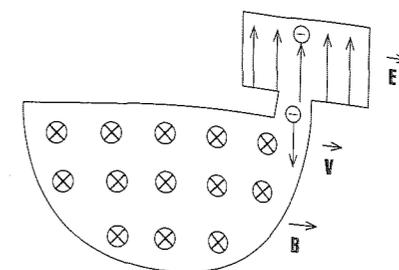
A.33 Enunciar, a título de hipótesis, de qué dependerá la fuerza que ejerce un campo magnético sobre una carga en movimiento.

A.34 Dar el sentido de la fuerza en cada uno de los casos representados en la figura.



A.35 Calcular el radio r de la trayectoria de una carga dotada de velocidad v , al penetrar en un campo B perpendicularmente al mismo.

A.36 A fines del s. XIX Thomson realizó una serie de experimentos para determinar la relación carga/masa (q/m) para el electrón mediante el uso combinado de campos eléctricos y magnéticos, como en el montaje de la figura. Se pide: a) representar la trayectoria de los electrones; b) ¿qué velocidad adquirirá el electrón siendo V la ddp entre las placas?; c) ¿cuál será el radio r de la órbita descrita?; d) ¿cuál será el valor de q/m ?



A.37 Dos partículas de carga q y masas m y m' son sometidas a las manipulaciones descritas en la actividad anterior. Deducir cuál será la relación de los radios para sus respectivas trayectorias.

A.38 Sugerir un procedimiento para separar los distintos isótopos de un mismo elemento y determinar sus masas respectivas.

Cuadro 3

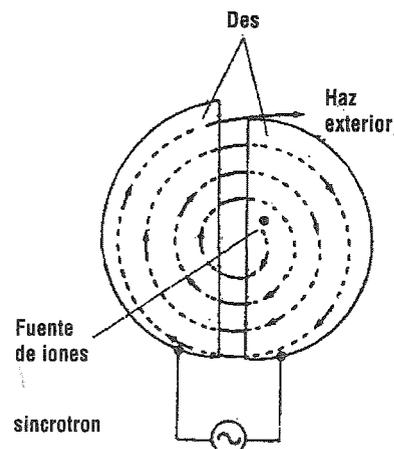
Papel de los campos magnéticos en el estudio de las partículas elementales

Los campos eléctricos y magnéticos pueden utilizarse para acelerar partículas elementales cargadas con el objetivo de que adquieran velocidades muy grandes. Esto se consigue con el ciclotrón, formado por dos cámaras huecas semicirculares en las que se ha hecho el vacío y entre las que existe una pequeña separación. Dichas cámaras se sitúan en un campo magnético perpendicular a ellas. Cada una de las cámaras se conecta a la terminal de un generador de corriente alterna de forma que entre las mismas se cree un campo eléctrico que cambia de sentido. Si en el centro de una de las cámaras se coloca una partícula cargada, el campo eléctrico la mueve hacia la cámara correspondiente y el campo magnético que existe en su interior produce un movimiento circular. En el momento en que la partícula alcanza la zona de separación de las cámaras, cambia la polaridad del campo eléctrico y penetra en la cámara enfrentada, con una velocidad mayor gracias a la acción del campo eléctrico. En el interior de la cámara, la partícula describe una trayectoria semicircular de mayor radio hasta que llega a la zona de separación donde se repite el proceso descrito. De esta forma aumenta la velocidad de la partícula al realizar trayectorias semicirculares de radio creciente. La estructura del ciclotrón determina sus limitaciones. La primera se refiere a la velocidad máxima que pueden alcanzar las partículas, la

cual viene dada por el radio de las cámaras. La segunda limitación se relaciona con el aumento de masa de las partículas cuando su velocidad aumenta, de acuerdo con la Teoría Especial de la Relatividad. Dicho crecimiento provoca una desincronización entre la frecuencia del campo eléctrico y la posición de las partículas en la zona de separación de las cámaras.

Los problemas anteriores se pueden resolver con el sincrotrón. En este aparato las partículas cargadas recorren órbitas circulares a través de un tubo en el que se ha hecho el vacío. Por medio de imanes situados regularmente y sincronizados, para compensar el aumento relativista de masa, se consigue desviar el haz de partículas para que siga una trayectoria circular. El aumento de velocidad de las partículas se realiza por medio de campos eléctricos alternos de frecuencia elevada, utilizando un procedimiento semejante al descrito en el ciclotrón.

El Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN) de Ginebra dispone de un sincrotrón denominado Super Proton Synchrotron (SPS). En él se consiguen energías de 450 GeV y utiliza 1000 electroimanes en una galería de 2,2 km de diámetro para realizar choques de protones con antiprotones. El Large Electron-Positron Collider (LEP) está formado por 3400 electroimanes que curvan las trayectorias de los haces de partículas cuyo enfoque se realiza con 760 cuadrupolos y 512 sextupolos en una galería de 8,6 km de diámetro.



Con el Tevatron del Fermilab de Chicago se alcanzan energías de 1 TeV para las colisiones protón-antiprotón en un anillo de 1,9 km de diámetro. La trayectoria circular de los haces de partículas se realiza por medio de 774 dipolos y 216 cuadrupolos.

La detección de partículas se basa en la ionización de un medio sólido, líquido o gaseoso al ser atravesado por partículas cargadas.

La cámara de niebla está formada por un recinto cerrado que contiene vapor de agua saturado. Las partículas cargadas actúan como núcleos de condensación y se forman pequeñas gotas de agua que permiten seguir la trayectoria. Si se coloca un campo magnético, se produce una desviación de las partículas cargadas de acuerdo con su carga y con su masa. De esta forma se puede calcular la cantidad de movimiento de la partícula conocida su carga, el campo magnético y el radio de curvatura de la trayectoria.

En la cámara de burbujas las partículas que la atraviesan ionizan un líquido (normalmente hidrógeno) en un estado próximo al punto de ebullición. Dicho estado produce la formación de burbujas en las posiciones ocupadas por las moléculas ionizadas. Por este procedimiento se puede seguir el camino recorrido por las partículas, las cuales serán desviadas por un campo magnético externo según su carga y su masa. Conocido el radio de curvatura de la desviación, el campo magnético y la carga, se puede deducir la cantidad de movimiento de las partículas.

Existen otros procedimientos para la detección de las partículas basados en la separación de las mismas por campos eléctricos (cámara de ionización y contador Geiger), en la luminiscencia que producen en ciertas sustancias (fotomultiplicadores) o en la emisión de luz por átomos polarizados (contador de Cerenkov).

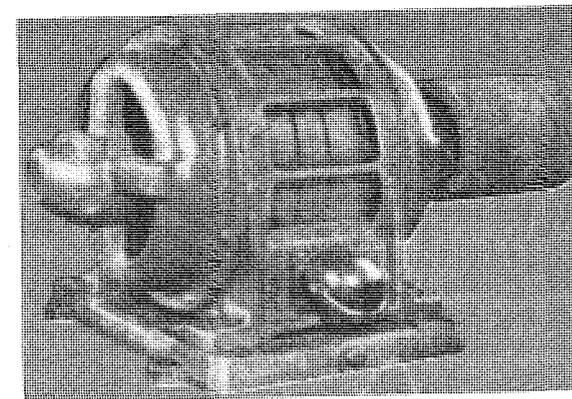
2.3.b. Fuerza magnética sobre una corriente

A.39 Emitir una hipótesis acerca de los factores de los que depende la fuerza sobre una corriente que atraviesa un conductor rectilíneo de longitud l en el seno de un campo magnético B . Comprobarla partiendo de la expresión que proporciona la fuerza magnética sobre un elemento de corriente dl en el que existe una carga $dq = ldt$ moviéndose con velocidad v en un campo magnético uniforme B .

A.40 Definir las unidades de intensidad del campo magnético en el S.I. (Tesla)

El estudio de la acción de un campo magnético sobre una espira es uno de los casos de interacción entre imanes y corrientes de mayor interés puesto que en él están basados los instrumentos de medida (galvanómetros, amperímetros, voltímetros).

A.41 Manejar y analizar un galvanómetro o un motor, explicando su funcionamiento.



Por último, y a modo de resumen, realizaremos la siguiente actividad.

A.42 Señalar las semejanzas y diferencias entre el campo eléctrico y el magnético.

2.4. Explicación cualitativa del magnetismo natural

Esta tercera línea de investigación sólo ha podido ser culminada con el establecimiento de la física cuántica. Sin embargo, en el siglo XIX Ampère avanzó hipótesis explicativas.

A.43 Plantear, a título de hipótesis, una explicación del magnetismo (imanes, hierro imanado).

3. Electromagnetismo

3.1. Inducción electromagnética

Iniciaremos esta línea de investigación planteándonos el estudio del efecto simétrico al detectado por Oersted: ¿cuáles son las condiciones en las que cabe esperar que un campo magnético puede engendrar corriente en un conductor?

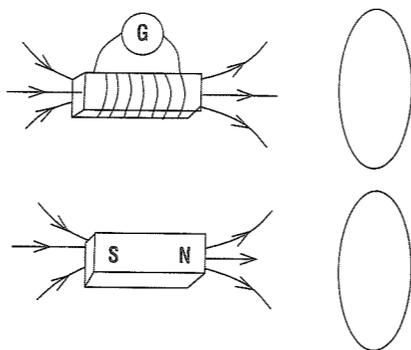
3.1.a. Ley de Faraday y Henry. Ley de Lenz

Faraday, Henry y Lenz establecieron las leyes cualitativas y cuantitativas por las que se crea corriente eléctrica a partir de un campo magnético.

A.44 Indicar, a título de hipótesis, en qué condiciones cabe esperar que un campo magnético produzca una corriente en un conductor.

A.45 Diseñar un montaje experimental para contrastar las hipótesis emitidas sobre la forma de inducir corriente en un conductor.

A.46 Recoger e interpretar las observaciones correspondientes a las siguientes manipulaciones: a) aproximar y alejar un imán al inducido (bobina) en reposo, aproximar el imán por su otro polo; b) mover el inducido, dejando el inductor (imán) en reposo; c) utilizar un electroimán de campo magnético variable y repetir las pruebas a) y b) cambiando el sentido de la corriente; d) dejar en reposo tanto la bobina como el electroimán modificando B mediante la variación de la intensidad que recorre el electroimán. ¿Qué tienen en común todas las experiencias antes descritas?



A.47 Recopilar, de las experiencias realizadas en la actividad anterior, los datos correspondientes al sentido de las corrientes inducidas.

Según estas experiencias, está claro que las corrientes inducidas son producidas en el inducido por la variación del flujo magnético que lo atraviesa. A esta misma conclusión llegaron Faraday y Henry en 1831, trabajando independientemente. Afirmaron que la fuerza electromotriz (fem) inducida en un circuito es igual y de signo opuesto a la variación del flujo magnético que atraviesa el circuito por unidad de tiempo, es decir

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

El signo menos de la ley de Faraday indica que la fuerza electromotriz inducida tiene un sentido tal que trata de oponerse a la causa (variación del flujo) que la produce. Más explícitamente: el campo magnético de la corriente inducida se ha de oponer a la variación del flujo. Esto se conoce como ley de Lenz y es una consecuencia del principio de conservación de la energía

A.48 Aplicar la ley de Lenz en los casos indicados en la actividad A.46. e indicar el sentido de la corriente inducida.

3.1.b. Aplicación de la inducción electromagnética a la producción de corriente

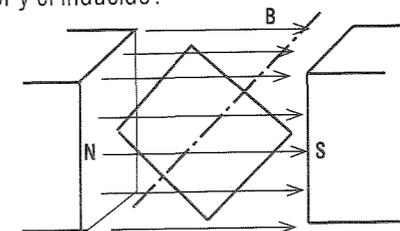
Empezaremos con un caso de gran interés teórico, como veremos en el siguiente apartado: las corrientes inducidas por campos magnéticos variables con el tiempo.

A.49 En la actividad A.46. ¿en qué casos se obtienen corrientes inducidas por ser el campo magnético B variable con el tiempo? ¿Cuál será la expresión de la fem inducida en dichos casos?

Si se mantiene constante un campo magnético, su flujo a través de un circuito puede variarse, ya sea por movimiento del circuito, ya por deformación de éste.

A.50 ¿Cómo puede conseguirse una variación ininterrumpida del flujo por movimiento relativo de inductor e inducido sin que ello se traduzca en una rápida anulación del flujo? ¿Qué ocurriría si recurriéramos simplemente a alejar el inductor y el inducido?

A.51 Una espira gira con rapidez angular ω , según la figura. Aplicar la ley de Faraday para calcular la fem inducida, teniendo en cuenta que B y S son constantes y $\Phi = \omega t$. ¿Qué valores máximos tomará la fem inducida? ¿A qué posiciones de la espira correspondarán? ¿En que posiciones se anulará la fem?

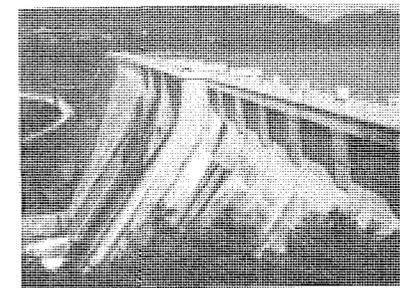


Esto presenta un gran interés desde el punto de vista práctico, ya que permite la aplicación más importante de la inducción electromagnética: los generadores de corriente

A.52 Proceder al manejo de generadores o dinamos. Explicar en qué se basa su funcionamiento.

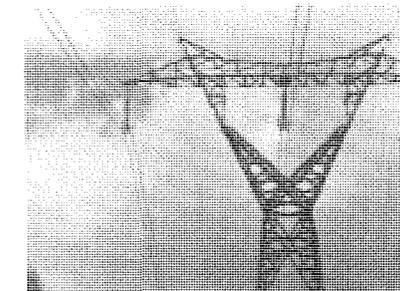
A.53 Si la bobina de un generador consta de 100 espiras de 500 cm² y gira en un campo magnético de 0,6 T, ¿qué velocidad angular debe tener para generar un voltaje máximo de 150 V? ¿Cuál será la frecuencia angular de la corriente?

A.54 Citar los diferentes tipos de centrales para obtener energía eléctrica que se conozcan, explicando las ventajas e inconvenientes que presenta cada una.



A.55 ¿Qué transformaciones energéticas tienen lugar en cada uno de dichos generadores?

A.57 ¿Cómo se transporta la energía eléctrica desde los lugares donde se produce hasta los lugares de consumo?



3.2. Teoría electromagnética de Maxwell

3.2.a. Síntesis de Maxwell. Predicción de las ondas electromagnéticas

Los hechos hasta aquí establecidos sobre el comportamiento de las cargas eléctricas sirvieron de base a J. C. Maxwell (1831-1879) para la elaboración de la teoría electromagnética, en la que abrazó de forma coherente las principales relaciones y fenómenos estudiados, al tiempo que establecía nuevas y fecundas líneas de investigación.

A.57 Recapitular los aspectos más significativos del comportamiento de las cargas y los campos eléctrico y magnético

Así comenzó el mismo Maxwell, que señaló en su *Tratado sobre la electricidad y el magnetismo* (1873): "Antes de comenzar el estudio de la electricidad resolví no leer más matemáticas sobre esta materia hasta haber leído totalmente las 'Investigaciones experimentales sobre electricidad' de Faraday".

Su punto de partida fue el análisis de la ley de Faraday, que muestra cómo engendrar un campo eléctrico mediante un movimiento relativo del campo magnético o su variación en el tiempo. Por otra parte, Oersted, Ampère, etc., habían mostrado que las corrientes eléctricas producen campos magnéticos.

A.58 Teniendo en cuenta la ley de Faraday y la notable simetría que muestran las relaciones entre los campos eléctricos y magnéticos, ¿habrá otra forma de engendrar un campo magnético?

Las ecuaciones de Maxwell establecen que no sólo todo campo magnético variable produce un campo eléctrico (según establece la ley de Faraday), sino que todo campo eléctrico variable produce un campo magnético. Los campos eléctrico y magnético aparecen, pues, íntimamente asociados, constituyendo lo que Maxwell llamó el campo electromagnético. La interacción entre cargas eléctricas se interpreta mediante la existencia del campo electromagnético, de forma que la fuerza que se ejerce sobre cualquier carga vendrá dada por:

$$F = q (E + v \times B)$$

Según Maxwell, es de esperar que se produzca un campo magnético si existe un campo eléctrico variable. A partir de aquí, Maxwell realizó otra predicción sorprendente. Si un campo magnético variable crea un campo eléctrico, éste será variable. El campo eléctrico variable creará a su vez un campo magnético, etc. Estos campos variables en interacción, es decir, este campo electromagnético, pueden propagarse en forma de onda por el espacio vacío, sin necesidad de un soporte material. De ahí su denominación de onda electromagnética. Como ambos campos son perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación, se trata de una onda transversal.

La teoría de Maxwell predice que una carga que vibra (o acelerada de cualquier forma) produce campos eléctricos y magnéticos variables que se propagan en forma de onda electromagnética (oem). La velocidad de las ondas viene dada por la expresión

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

A.59 Calcular la velocidad de propagación de las oem en el vacío (Datos $\epsilon_0=1/36\pi \cdot 10^9$ U.I. y $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ U.I.). ¿Qué sugiere el resultado obtenido?

Se trata de un resultado enormemente significativo que suponía la integración de la Óptica como un parte del Electromagnetismo. Se producía así un fenómeno presente en todos los grandes avances científicos: el establecimiento de relaciones entre dominios que aparecían inicialmente desligados.

Las ondas electromagnéticas transmiten energía y cantidad de movimiento, como se vio en el tema sobre vibraciones y ondas.

A.60 Recordando lo visto allí, indicar, a título de hipótesis, de qué dependerá la intensidad (potencia/superficie) de las oem.

A.61 Determinar el valor del campo eléctrico, a una distancia de 1 m, de la luz emitida por una bombilla de 100 w. Repetir los cálculos para el caso de la luz del Sol cuando llega a la superficie de la Tierra si su intensidad es de 1000 w/m².

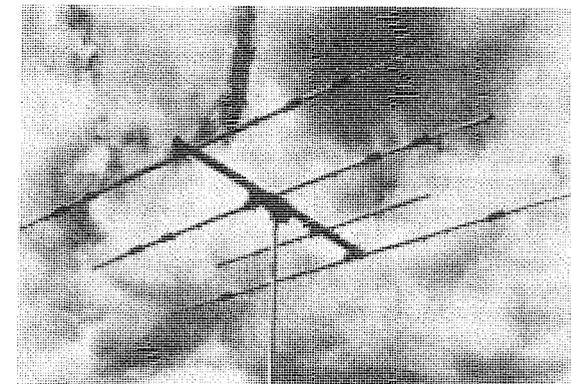
3.2.b. Experiencia de Hertz. Espectro electromagnético

La contrastación experimental de la predicción de Maxwell de que las cargas aceleradas (en giro, vibración, etc.) emiten oem planteó serias dificultades técnicas. En efecto, la frecuencia de las oem debía coincidir con la de vibración de las cargas (p.ej. para la luz visible $4 \cdot 10^{14}$ s⁻¹).

Ello hizo que sólo en 1887, veintitrés años después de los trabajos de Maxwell, el científico alemán H. Hertz (1857-1894) emprendiese la tarea de mostrar que una corriente eléctrica oscilante emite oem.

En esencia, el método de Hertz era relativamente simple. El emisor estaba constituido por dos esferas conectadas a un arrollamiento de inducción, que comunica a las esferas una gran cantidad de carga de signos opuestos. Su diferencia de potencial llega a ser tan grande que salta la chispa entre ellas, oscilando las cargas de una a otra hasta que se alcanza el equilibrio. Encontró que en el receptor se reproducía la oscilación, lo que ponía de manifiesto la existencia de una radiación electromagnética, aún denominada ondas hertzianas.

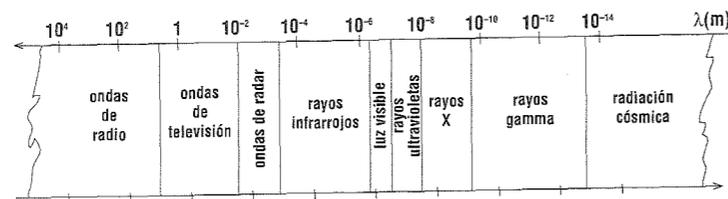
Estas ondas hertzianas se emiten, en la actualidad, con antenas (básicamente dos varillas conductoras conectadas a un generador de corriente alterna).



A.62 Si las cargas de la antena emisora empiezan a vibrar en el instante t , determinar el instante en el que recibirá la señal una antena receptora situada a una distancia d .

En 1800 Herschel descubrió que en los espectros siempre existía junto al rojo cierta radiación, de mayor longitud de onda, que se denominó infrarroja. Poco después se encontró la radiación ultravioleta. Los rayos X fueron descubiertos por Röntgen en 1895, como ya hemos visto en el capítulo de Óptica. En 1896 Becquerel descubre la radiactividad y a comienzos del siglo xx, Rutherford aísla en ella los rayos gamma. Todas estas radiaciones, junto con las ondas hertzianas, constituyen el espectro electromagnético.

A.63 La figura incluye los distintos tipos de radiación electromagnética ordenados por longitudes de onda decrecientes. Calcular sus correspondientes frecuencias.



Las oem pueden clasificarse según su principal fuente:

- 1) Las ondas de radio se generan a causa de la aceleración de electrones en circuitos oscilantes. En la década de 1890 Marconi las utilizó en la telegrafía sin hilos. El desarrollo de las válvulas de vacío, posibilitó su uso en la radio y, posteriormente, la televisión.
- 2) Las microondas se generan también con dispositivos electrónicos y su uso se inició en la Segunda Guerra Mundial con el desarrollo del radar. Actualmente se utilizan en hornos microondas.
- 3) El infrarrojo es producido por cuerpos calientes y emisiones moleculares (procesos no explicables clásicamente, como se verá en el tema de Física Moderna). Tienen aplicaciones en la industria, la medicina, la astronomía, etc.
- 4) El espectro visible es producido por emisiones atómicas y moleculares y su importancia es evidente en la visión y en los instrumentos ópticos.
- 5) Los rayos ultravioletas también son emitidos por átomos y moléculas. Por la magnitud de su energía producen muchos efectos químicos y, por ello, se pueden utilizar en la esterilización de instrumentos. La importancia de la capa de ozono reside en su capacidad de absorberlos, evitando los efectos perniciosos para la vida.
- 6) Los rayos X se generan por emisiones atómicas o por radiación de frenado (cuando los electrones rápidos son fuertemente desacelerados, p.ej. al chocar contra un blanco metálico). Se aplican en diagnóstico médico y en el tratamiento del cáncer.
- 7) Los rayos gamma son de origen nuclear. Se estudiarán en dicho tema.

Cuadro 4

Breve historia del concepto de campo

Tal y como sucede en otros ámbitos de la Física, la génesis y el desarrollo del concepto de campo han recorrido caminos de manera lenta y sinuosa. Los problemas históricos fundamentales se pueden plantear en dos sentidos: la superación del modelo de interacción instantánea y a distancia, y la aparición del campo como un ente físico (clásicamente la materia se presenta en dos formas: partículas y campos).

Tanto Coulomb en Electroestática (1785) como Ampère, Laplace, Biot y Savart, etc., en Magnetostática (1820-27) utilizan fuerzas a distancia en coherencia con el programa o paradigma mecanicista vigente.

La idea de campo aparece de forma confusa en las explicaciones cualitativas que Oersted presenta de su experiencia de 1820. Utiliza un lenguaje cartesiano y presenta torbellinos alrededor del hilo. Desde sus primeras experiencias de 1821 con el rotor electromagnético, Faraday (1791-1867) utiliza más explícitamente la noción de campo, al considerar las líneas de campo como entidades reales que llenan el espacio. Al utilizar la acción contigua, se aparta del programa mecanicista de la acción a distancia. Su propuesta carecía de una formulación matemática puesto que su origen social (hijo de un herrero) imposibilitaba, en aquella época, el acceso a una formación universitaria.

Por estas fechas encontramos dos vías de investigación en electricidad y magnetismo. En primer lugar, sigue vigente en el continente europeo el programa mecanicista. Físicos como Kirchhoff, Helmholtz, Weber, Neumann, etc. siguen utilizando la idea de acción a distancia, aunque se presentan algunos problemas: las fuerzas magnéticas son transversales y no centrales, es necesario introducir el retardo y por ello las fuerzas no son instantáneas, etc.

Por otra parte, la influencia de Faraday en Kelvin (W. Thomson) produce en Gran Bretaña la aparición de un nuevo programa de investigación basado en la acción contigua. Se abandona la fructífera idea de Faraday de las líneas de campo como entes físicos, considerándolas como tubos que transportan el éter (fluido incomprensible utilizado por Fresnel y otros como medio de propagación de la luz). Se trata de un intento de mantener una explicación mecánica de la electricidad y del magnetismo. En el marco de este programa Maxwell elabora entre 1861 y 1862 unas ecuaciones, en las que unifica la electricidad y el magnetismo e introduce una teoría electromagnética de la luz. La deducción de las ecuaciones de Maxwell implica la introducción de tubos de éter giratorios, con partículas eléctricas como rodamientos entre ellos, etc. En ese momento se presentan dos alternativas: la profundización en el modelo o liberar la teoría del mecanismo. Ante la complejidad del modelo, Maxwell opta en 1864-65 por la segunda propuesta y afirma que "en nuestra teoría la energía reside en el campo electromagnético, en el espacio que rodea los cuerpos electrizados y magnéticos...". Gran parte de los físicos que trabajaban en el marco de este programa, eligieron la primera opción, como Kelvin que en 1884 afirmaba: "No estoy satisfecho hasta haber construido un modelo mecánico del objeto que estoy estudiando. Si consigo hacer uno, comprendo; de lo contrario, no". Esto originó la proliferación de múltiples modelos de éter.

Ambos programas de investigación, el mecanicista y el del éter (o del campo electromagnético) coexisten hasta 1867. En dicho año Hertz descubre las ondas electromagnéticas predichas por Maxwell. Dichas ondas ponen en cuestión la idea de la acción a distancia e instantánea. En 1892 H. A. Lorentz culmina el programa del éter al establecer que todos los cuerpos cargados contienen minúsculas partículas que cumplen las ecuaciones de Maxwell en un éter en reposo. Confirmando dicho programa, J. J. Thomson descubre en 1897 el electrón. A este descu-

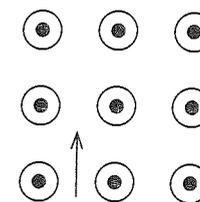
brimiento se han de añadir otros, relacionados con la estructura del átomo –las series espectrales del hidrógeno (Balmer 1885)–, el efecto fotoeléctrico (Hertz, Lenard 1887-89), los rayos X (Röntgen 1895), la radiactividad y los elementos radiactivos (Becquerel, P. y M. Curie 1896), etc.

Como consecuencia de los descubrimientos anteriores algunos físicos comienzan a advertir la crisis del programa mecanicista. Poincaré (1900) se plantea la búsqueda de una nueva Dinámica ante la evidencia de un hecho: si la teoría de Lorentz es cierta, no se cumple la ley de acción y reacción ni se conserva la cantidad de movimiento. Otros, como Wien, Abraham, Kauffmann (1900-03) van más allá y reducen la Mecánica a electromagnetismo. Consideran que la materia está constituida por electrones y éter, y regida por las leyes de Maxwell-Lorentz. Además, con la elección de un radio adecuado para el electrón, obtienen que toda su masa es electromagnética.

En 1908-1909 parte de la comunidad científica empieza a tomar conciencia de que la crisis es más profunda porque afecta a las teorías del éter o del campo electromagnético. Las soluciones planteadas no pasan por el programa del éter, sino por las teorías de la relatividad (Einstein 1905) y cuántica (Planck 1900, Einstein 1905). La primera de estas teorías nos libera del espacio absoluto y del éter que supuestamente lo llena. Con ella Einstein culmina un largo proceso iniciado por Faraday y Maxwell. Establece el campo como una realidad física, constituyente, junto con las partículas (electrones, etc.) de la materia. La teoría cuántica también realiza una importante contribución en esta línea, al poner de manifiesto que el campo electromagnético está constituido por fotones. Se establece así un nuevo modelo de interacción como intercambio de partículas.

Actividades complementarias

- 1 Dos esferitas iguales de masa m y carga q están suspendidas de un mismo punto por medio de dos hilos de longitud l .
Determinar el valor de la carga q y del campo eléctrico si el ángulo formado en su posición de equilibrio es α .
- 2 Cuatro cargas iguales, de valor q cada una, están situadas en los vértices de un cuadrado. ¿Cuál será la carga Q de signo contrario que es necesario colocar en el centro del cuadrado para que todo el sistema de cargas se encuentre en equilibrio?
- 3 Tres cargas positivas de $2 \cdot 10^{-6}$ C se encuentran situadas en tres vértices de un cuadrado de 1 m de lado. Calcular la intensidad del campo eléctrico y el potencial en el centro del cuadrado, indicando cuál es el significado físico de los valores obtenidos. (Selectividad. 1988)
- 4 Dadas las cargas $q_1 = 10^{-8}$ C y $q_2 = -2 \cdot 10^{-8}$ C, situadas a 2 m una de otra, se pide:
a) Determinar en qué punto se anula la intensidad del campo eléctrico creado por estas cargas.
b) Calcular el potencial eléctrico en dicho punto. (Selectividad. 1992)
- 5 Señalar analogías y diferencias entre los campos gravitatorio y eléctrico. (Selectividad. 1988)
- 6 Coméntese la siguiente afirmación: "Las líneas de fuerza son perpendiculares a las superficies equipotenciales". (Selectividad. 1992)
- 7 Se tiene un condensador plano cuyas placas son cuadrados de 20 cm de lado. Paralelamente a sus láminas penetra un electrón con una velocidad de $3 \cdot 10^6$ m/s. Calcular la intensidad del campo eléctrico en el condensador si el electrón sale del mismo formando un ángulo de 30° con una de sus placas. ($q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C; $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg)
- 8 Se tienen dos esferas metálicas de 5 y 8 cm de radio cargadas con $4 \cdot 10^{-5}$ C cada una.
a) Si las esferas están muy separadas, calcular la ddp entre las dos esferas.
b) Si se unen las esferas con un conductor, calcular la carga que pasa por el hilo hasta alcanzar el equilibrio.
c) Calcular el potencial de cada esfera cuando se ha alcanzado el equilibrio.
- 9 Por un conductor rectilíneo muy largo pasa una corriente eléctrica de intensidad I . Explicar cómo será la dirección y el sentido del campo magnético creado en un punto situado a 1 m del hilo. ¿Y en un punto situado a 2 m del hilo cuando la corriente aumenta en un factor 2? (Selectividad. 1991)
- 10 Se lanza una partícula cargada a una región del espacio en la que existe un campo magnético uniforme. La velocidad inicial de la partícula es perpendicular a la dirección del campo. Explicar cómo será el movimiento de la partícula. (Selectividad. 1989)
- 11 En una región en la que existe un campo magnético de $4 \cdot 10^{-6}$ T, penetra una carga de $3 \cdot 10^{-15}$ C, con velocidad de $2 \cdot 10^6$ m·s⁻¹, tal como se indica en la figura.
a) Determinar el módulo, dirección y sentido de la fuerza que actúa sobre la carga.
b) Calcular el radio de curvatura de la trayectoria descrita por la carga. (Selectividad. 1992)



- 12 ¿Es posible poner en movimiento un electrón en reposo mediante un campo eléctrico? ¿Y mediante uno magnético?
(Selectividad. 1991)
- 13 Explicar bajo qué condiciones una carga eléctrica podrá producir un campo magnético.
(Selectividad. 1992)
- 14 Describir el proceso de generación de una corriente alterna en una espira. Enunciar la ley en la que se basa.
(Selectividad. 1994)

La interacción de cargas eléctricas se explica por medio del concepto de **campo eléctrico**. Éste se debe considerar una forma de existencia de la materia a través del cual se propaga la interacción eléctrica. La intensidad del campo eléctrico E se define como $E = F/q$ siendo F la fuerza que dicho campo ejerce sobre una carga q colocada en él. El valor del campo eléctrico creado por una carga puntual o esférica Q , a una distancia r , viene dado por $E = kQ/r^2$ siendo u_r el vector unitario dirigido de la carga Q al punto considerado y k una constante que depende del medio. Los campos eléctricos se representan gráficamente por medio de las **líneas de fuerza**.

La fuerza entre dos cargas eléctricas puntuales o esféricas Q y q separadas una distancia r viene dada por la expresión $F = kQq/r^2$ llamada Ley de Coulomb siendo u_r un vector unitario en la dirección de la recta que une las dos cargas.

El movimiento de una carga q en un campo eléctrico E se realiza con una aceleración $a = qE/m$ siendo m la masa de la carga eléctrica. Si el campo eléctrico es constante, la ecuación de movimiento de la carga viene dada por la expresión $r = r_0 + v_0t + qEt^2/2m$.

Si una carga se mueve en un campo eléctrico, la relación entre el trabajo (W) realizado por dicho campo y la variación de energía potencial (E_p) viene dada por $W = -\Delta E_p$. La energía potencial del sistema formado por dos cargas q y Q separadas una distancia r se puede expresar como $E_p = kqQ/r$. Aunque el origen de la energía potencial se puede fijar en cualquier lugar arbitrario, se considera que la energía potencial es nula cuando las cargas q y Q están separadas una distancia muy grande.

Un sistema de cargas se llama **ligado** si la suma de la energía cinética y potencial (energía total) es menor que cero. El sistema se considera **libre** si la energía total es igual o mayor que cero.

El **potencial eléctrico** es igual a la energía potencial por unidad de masa. Si se tiene una carga puntual Q , el potencial eléctrico a una distancia r viene dado por $V = kQ/r$. La diferencia de potencial entre dos puntos y el campo eléctrico se relacionan por la expresión

$$\Delta V = - \int E \cdot dr$$

Las **superficies equipotenciales** unen los puntos de un campo eléctrico que tienen el mismo valor del potencial.

El **experimento de Oersted** demuestra que la corriente eléctrica crea un campo magnético. El módulo del campo magnético B creado por un conductor rectilíneo indefinido a una distancia r viene dado por $B = \mu_0 I / 2\pi r$ siendo I la intensidad de la corriente y μ_0 la permeabilidad del vacío. La dirección y el sentido del campo magnético se pueden obtener con la regla de la mano derecha.

La fuerza F sobre una carga q que penetra en un campo magnético B con una velocidad v es $F = qv \times B$ (Ley de Lorentz). El **espectrógrafo de masas** permite separar partículas cargadas de masas diferentes por medio de la fuerza de Lorentz. La fuerza F que un campo magnético B realiza sobre un conductor rectilíneo de longitud l se puede expresar como $F = Il \times B$ siendo I la intensidad de la corriente. El funcionamiento de los galvanómetros y motores se basa en dicha fuerza.

En las sustancias magnéticas los átomos están orientados de forma que se refuerza el campo magnético de cada uno de ellos. En las sustancias no magnéticas se anulan los campos magnéticos atómicos a causa de la orientación al azar de sus átomos.

Cuando existe una variación del flujo magnético (Φ) que atraviesa un conductor cerrado, se produce en él una corriente eléctrica inducida (Ley de Faraday). El campo magnético que crea dicha corriente se opone a la variación de flujo magnético (Ley de Lenz). Estas dos leyes se pueden expresar como $\varepsilon = -d\Phi/dt$ siendo ε la fuerza electromotriz inducida. Si un circuito cerrado gira en el interior de un campo magnético, se produce una corriente alterna inducida, de acuerdo con la Ley de Faraday. Dicho dispositivo se denomina generador. Las ecuaciones de Maxwell establecen que todo campo magnético variable produce un campo eléctrico y que todo campo eléctrico variable crea un campo magnético. Los campos eléctricos y magnéticos constituyen el campo electromagnético.

Si se acelera una carga eléctrica, se producen campos eléctricos y magnéticos, perpendiculares entre sí, que se propagan por el vacío como una onda transversal. Dicha onda se denomina onda electromagnética. Su velocidad viene dada exclusivamente en función de características eléctricas y magnéticas del medio por la expresión:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

La intensidad de las ondas electromagnéticas es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo eléctrico de acuerdo con la expresión $I = c\varepsilon_0 E^2$

El espectro electromagnético está formado por las ondas electromagnéticas ordenadas de acuerdo con su frecuencia y clasificadas en: ondas de radio, ondas de televisión, ondas de radar, rayos infrarrojos, luz visible, rayos ultravioleta, rayos X, rayos gamma y rayos cósmicos.

Soluciones a los ejercicios propuestos

- A.5. $16,1i + 57,8j$ N/C; $270i$ N/C; $8i - 163,9j$ N/C; $(-4,85, 0)$ m.
 A.20. Fuerza eléctrica 10^{40} veces mayor que la gravitatoria.
 A.28. $10^{-5}k$ T; $15 \cdot 10^{-6}k$ T.
 A.53. 50 rad/s; 7,96 Hz.
 A.59. $3 \cdot 10^8$ m/s.
 A.61. 54,78 V/m; 614,06 V/m.

Actividades complementarias

3. $2,55 \cdot 10^4 i - 2,55 \cdot 10^4 j$ N/C; $7,65 \cdot 10^4$ V.
 4. a) 4,83 m a la izquierda de q_1 ; b) -7,72 V.
 7. 147,5 V/m.
 8. a) $7,2 \cdot 10^6$ V; $0,92 \cdot 10^{-5}$ C; c) $5,54 \cdot 10$ V.
 11. a) $2,4 \cdot 10^{-14}$ N; b) $1,67 \cdot 10^{-16}$ m.

La crisis de la física clásica y el surgimiento de la física moderna

A fines del siglo XIX se consideraba la Física como una ciencia prácticamente elaborada y cerrada, cuyos principios y leyes estaban sólidamente establecidos. La actividad física consistiría así en aplicar estas leyes y principios a distintos fenómenos. Pero una serie de problemas que no pudieron ser explicados originaron, a principios del siglo XX, la crisis de la Física clásica, poniendo en cuestión hasta sus conceptos más evidentes y sólidos, y el surgimiento de un nuevo paradigma.

Entre 1861 y 1873 (año en que se publicó el *Tratado de Electricidad y Magnetismo*) Maxwell realizó la síntesis electromagnética, integrando, como ya hemos visto, los fenómenos hasta entonces considerados desconexos de Electricidad, Magnetismo y Óptica. Con ello parecía haberse dado respuesta satisfactoria a los principales problemas que planteaba la ciencia física. A lo largo de dos siglos se había erigido así un edificio imponente del que la mecánica newtoniana y la teoría electromagnética eran los pilares.

A.1 Señalar algunos de los principales éxitos (incluyendo sus aplicaciones prácticas) de la Física clásica, es decir, desde la época de Galileo a la de Maxwell.

A.2 Tratar de indicar qué imagen del comportamiento de la materia introduce la Física clásica (en particular, cómo se conciben el espacio, el tiempo, las radiaciones y los cuerpos).

Conviene recordar que esta Física clásica se edificó contra la visión que conocemos como “Física del sentido común” y supuso un profundo cambio metodológico. Resulta útil plantear las siguientes actividades:

A.3 La Física clásica –alguna de cuyas características acabamos de revisar– surgió contra un paradigma, la física aristotélico-escolástica que se había mostrado incapaz de resolver una serie de problemas. Señalar algunas de las tesis de esta “Física del sentido común” que derribó la Física clásica.

A.4 El hundimiento de la “Física del sentido común” no supuso únicamente la sustitución de una visión de la naturaleza por otra sino que estuvo asociada a un profundo cambio metodológico. Resumir las principales características del mismo.

Para finalizar esta revisión de las principales características de la ciencia clásica proponemos una reflexión en torno a las relaciones ciencia/técnica/sociedad.

A.5 Indicar algunas de las implicaciones más relevantes de la ciencia clásica en los dominios ideológico, social, medioambiental, etc.

Del mismo modo que las dificultades de la concepción aristotélico-escolástica contribuyeron al surgimiento del paradigma clásico en el siglo XVII, a finales del siglo XIX, una serie de problemas que no pudieron ser explicados originaron la crisis de la Física clásica –poniendo en cuestión los conceptos más evidentes y sólidos– y produjeron el surgimiento de un nuevo paradigma.

A.6 Como hemos visto hasta aquí, la Física clásica llegó a explicar prácticamente todos los fenómenos conocidos y se convirtió en un cuerpo coherente de conocimientos en el que sólo quedaban por resolver algunos pequeños problemas. Recordar algunos de estos problemas pendientes.

Estos pequeños problemas originaron dos líneas de investigación que provocaron la crisis del paradigma clásico y condujeron al establecimiento de la Física relativista y de la Física cuántica.

5. Elementos de física relativista

En la presentación general a la Física moderna nos hemos referido a la existencia de una serie de problemas que no pudieron ser explicados por la Física clásica. Dichos problemas fueron las primeras indicaciones de que la Física clásica exigía cambios fundamentales, y originaron dos líneas de investigación que contribuyeron a provocar la crisis del paradigma clásico.

Estas dos líneas fueron la Teoría Especial de la Relatividad y la Física cuántica. El estudio de la Física cuántica será el objeto de los capítulos siguientes. En este capítulo abordaremos algunas de las principales ideas de la Física relativista, así como sus implicaciones.

De acuerdo con ello, desarrollaremos el tema según el siguiente hilo conductor.

1. Fracaso en la detección de un sistema de referencia en reposo absoluto
2. Los postulados básicos de la relatividad especial
3. Algunas implicaciones de la Física relativista
 - 3.1. Dilatación del tiempo. Contracción de la longitud
 - 3.2. Equivalencia masa/energía
4. Principio de equivalencia

1. Fracaso en la detección de un sistema de referencia en reposo absoluto

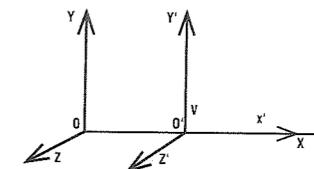
Abordaremos a continuación el problema de distinguir experimentalmente si un sistema de referencia dado se encuentra en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme (MRU). Este problema fue planteado por Galileo al preguntarse qué sucede en situaciones como las que presentamos a continuación.

A.1 En la orilla de un río un niño lanza un objeto al aire y lo recoge. Sobre una canoa que avanza con un MRU un segundo niño hace otro tanto. ¿Existe alguna diferencia en la forma en que ambos niños observarán el juego?

Esto nos permite afirmar que las leyes de la Mecánica no se modifican al referirlas a un sistema en reposo o a uno que se mueva con movimiento rectilíneo uniforme con respecto al anterior. Este enunciado se conoce como **principio de relatividad de Galileo**.

Se puede mostrar más rigurosamente el principio de relatividad de Galileo cuando se considera cómo cambian las magnitudes mecánicas al pasar de un sistema de referencia de origen O a otro de origen O' . Las dos actividades siguientes plantean ese cambio.

A.2 Supongamos que O' se desplaza respecto de O a lo largo del eje x con velocidad v . ¿Cuáles serán las ecuaciones que ligan las coordenadas (x,y,z) de un punto referidas al primer sistema y las (x',y',z') referidas al segundo sistema?

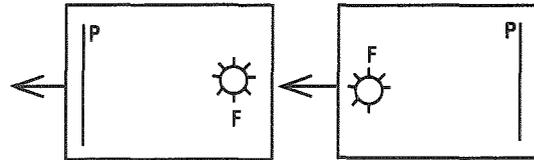


A.3 A partir de las transformaciones de Galileo obtener las relaciones entre las velocidades y aceleraciones de un punto en ambos sistemas. ¿Qué se puede concluir con respecto a las leyes de la Dinámica en ambos sistemas?

Aunque los fenómenos mecánicos no permiten, como ya hemos visto, distinguir entre dos sistemas en movimiento rectilíneo uniforme uno respecto al otro, nada se oponía a que otro tipo de experiencias (por ejemplo, las ópticas) hiciera posible esta distinción.

En efecto, en el siglo XIX se pensaba que la luz que llegaba a la Tierra desde el Sol o desde las estrellas era una onda y como tal se propagaba por un medio material denominado éter. Este medio tenía propiedades muy curiosas (era sólido, para permitir la propagación de ondas transversales y, a la vez, de una densidad muy baja), pero la más importante era que llenaba uniformemente todo el espacio. En consecuencia, sería posible determinar el movimiento con respecto al éter (o espacio absoluto) de un sistema de referencia inercial, sin más que utilizar fenómenos ópticos.

A.4 Aceptando que la Tierra se mueve con respecto al éter con velocidad v y siendo c la velocidad de la luz en dicho éter, calcular el tiempo que tardará la luz emitida por el foco F en alcanzar la pantalla P —situada a una distancia d — en cada uno de los casos.



El tiempo que tardará la luz en recorrer la distancia d dependerá de la dirección en que la luz la recorra.

Esta fue la idea básica de Michelson y Morley, cuyo interferómetro fue diseñado para poner en evidencia las diferencias de tiempo previstas. Pero el experimento siempre dio resultados negativos: la velocidad de la luz c no se veía afectada por el movimiento de la Tierra. O dicho de otro modo, la velocidad de la luz para todos los observadores, cualesquiera que fuera su velocidad respecto al éter, era siempre la misma.

Se produjeron algunos intentos de justificar los resultados de Michelson dentro del marco de las teorías clásicas, con pequeñas modificaciones de las mismas, sin lograr una explicación satisfactoria.

Se hizo necesario un cambio más radical que pusiese en cuestión los fundamentos de la Mecánica newtoniana.

2. Los postulados básicos de la relatividad especial

Los resultados de la experiencia de Michelson implicaban la imposibilidad de distinguir por procedimientos ópticos (igual que lo era por procedimientos mecánicos) si un sistema está en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme. Einstein generaliza este resultado en 1905 afirmando:

1. Todas las leyes de la Física (no sólo las de la Mecánica) son invariantes en todos los sistemas de referencia inerciales entre sí (**Principio de la relatividad especial**).
2. La velocidad de la luz en el vacío tiene el mismo valor c en todos los sistemas de referencia inerciales.

Esto condujo a Einstein a replantear la validez de las transformaciones galileanas que predicen distintos valores de la velocidad de la luz cuando se miden en un sistema de referencia inercial o en

otro. Para ello explicitó las hipótesis subyacentes en las que estas ecuaciones están basadas. En primer lugar, se consideraba la identidad de las escalas temporales para uno y otro sistema, es decir, una cuarta ecuación $t = t'$ que, por ser tan evidente, ni siquiera se había explicitado. En segundo lugar, la identidad de los intervalos espaciales, es decir, de las distancias entre dos puntos, dadas en uno y otro sistema.

Conviene, sobre todo, resaltar el valor metodológico de la contribución de Einstein, consistente en poner al descubierto los supuestos implícitos que escapan así a la crítica y constituyen una de las barreras fundamentales con que se enfrentan los cambios profundos como el que aquí vamos a abordar.

Cuadro 1

Albert Einstein

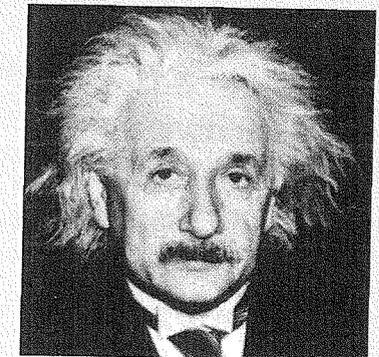
Nació en 1879 en Ulm, suroeste de Alemania, trasladándose un año más tarde a Munich. En 1888 pasó de la escuela al Instituto hasta 1895. En todos estos años obtuvo el primer o segundo puesto en matemáticas y latín, es decir, carece de fundamento la difundida creencia de que fue un mal alumno. Le disgustaban los métodos autoritarios, la enseñanza memorística, etc. En su autobiografía señala que "la sospecha contra todo tipo de autoridad desarrolló una actitud escéptica hacia las convicciones que persistían en cualquier ambiente".

Aunque sólo tenía 16 años (era dos años más joven que la mayor parte de los candidatos) se presentó al examen de ingreso de la Escuela Politécnica Federal (EPF) de Zurich (Suiza) y fue suspendido en biología y francés. Para obtener el diploma de enseñanza media, que le permitiese inscribirse en la Universidad, asistió a la Escuela de Aarau, donde le impresionó su espíritu liberal y democrático. Desde 1896 a 1900 estudió en la EPF y obtuvo el título de Fachlehrer (profesor de Matemáticas y Física de enseñanza media). "La mayor parte del tiempo trabajaba en el laboratorio de Física, fascinado por el contacto directo con la observación". Estudió por su cuenta algunos temas avanzados, como la teoría electromagnética de Maxwell.

Sin embargo su carrera académica fue difícil. No pudo conseguir un puesto de ayudante de universidad, y tuvo que aceptar en 1902 el cargo de técnico en la Oficina de Patentes de Berna, en la que permaneció hasta 1909. En el año 1905 publicó tres artículos que conmovieron los cimientos de la Física: sobre el efecto fotoeléctrico (que estudiaremos en el próximo tema), una aplicación de la teoría cinético molecular al movimiento browniano y lo que más tarde se llamó Teoría Especial de la Relatividad.

En 1909 sus trabajos alcanzaron el reconocimiento del mundo científico y fue nombrado profesor de la Universidad de Zurich y un año después, catedrático de la Universidad de Praga. En 1912 regresó a Zurich como catedrático de la EPF y un año después alcanzó la máxima aspiración de un científico europeo de aquel tiempo: una cátedra en la Universidad de Berlín, en la que permaneció hasta 1933.

En 1916, tras ocho años de esfuerzos, publica la Teoría General de la Relatividad, una nueva teoría de la gravitación. El astrónomo británico Eddington comprobó en 1919, una vez finalizada la I Guerra Mundial, durante un eclipse total, una de las predicciones de la Relatividad General: la curvatura, en las proximidades del Sol, de los rayos de luz de una estrella.



Este hecho produjo un gran impacto en la opinión pública mundial, debido fundamentalmente al carácter revolucionario de la teoría y a la prensa. Y con la fama llegaron los viajes por todo el mundo: Japón, España (en 1923), EE.UU., Latinoamérica, etc.

El impacto de la Teoría de la Relatividad no debe hacer olvidar la importancia de otras contribuciones de Einstein a la Física, en particular, a la cuántica. En 1905 publicó un artículo, antes mencionado, sobre el efecto fotoeléctrico por el que se le concedió el Premio Nobel de Física en 1921. En 1907 apareció un estudio sobre el calor específico de los sólidos, el primer trabajo sobre teoría cuántica del estado sólido. En 1916 y 1917 la teoría de las transiciones espontánea e inducidas, base del láser. Entre 1924 y 1925 desarrolló con Bose, la estadística cuántica de los bosones (fotones, etc.). A partir de 1927, cuando se establece la teoría cuántica y su interpretación probabilística, su actitud respecto a dicha teoría se convierte en escéptica, desarrollando la famosa paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen en 1935.

Desde el comienzo de la I Guerra Mundial, Einstein respaldó públicamente la causa del pacifismo y de la democracia. En los años 20 comenzó a interesarse por el destino de los judíos. Todo ello contribuyó a atraerse las críticas del movimiento político nazi, caracterizado por su nacionalismo racista, belicismo y su carácter dictatorial. Esto significó un ataque a la teoría de la Relatividad como ejemplo de física judía o no aria.

Al comenzar el año 1933, cuando Hitler llegó al poder y empezó las purgas raciales en Alemania, Einstein aceptó una oferta del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton (EE.UU.). En 1939 escribió desde dicho Instituto una carta al presidente F. D. Roosevelt en la que sugería el desarrollo de armas nucleares, para adelantarse al proyecto de los alemanes.

Al final de la II Guerra Mundial y tras la explosión de la bomba atómica, Einstein se implicó más que nunca en la política. Participó, junto con Born y otros, en movimientos internacionales de científicos a favor del desarme nuclear. Planteó la necesidad de llegar a un gobierno internacional, para combatir el militarismo y el nacionalismo. Criticó las irrationalidades del capitalismo. Apoyó la educación en general y una educación científica "para que una ciudadanía informada pueda, de forma inteligente, determinar y dar forma a su acción, para que sirva al mejor interés, propio y de la humanidad". Condenó públicamente las acciones del gobierno de los EE.UU. contra Oppenheimer que no quiso participar en la construcción de la bomba de hidrógeno.

Todo esto hizo que el FBI, en el período de McCarthy, abriese un dossier sobre él, que fue cerrado en 1955, año de su muerte.

C.1 El Premio Nobel de Física J. Franck afirmaba que "(los científicos) solemos ser cautos y, por tanto, tolerantes. Es precisamente la objetividad la que nos impide tomar resueltamente partido en política porque aquí no está la razón de ninguna parte". Contrástala con los datos de la vida de Einstein expuestos en el cuadro. ¿Qué opinas?

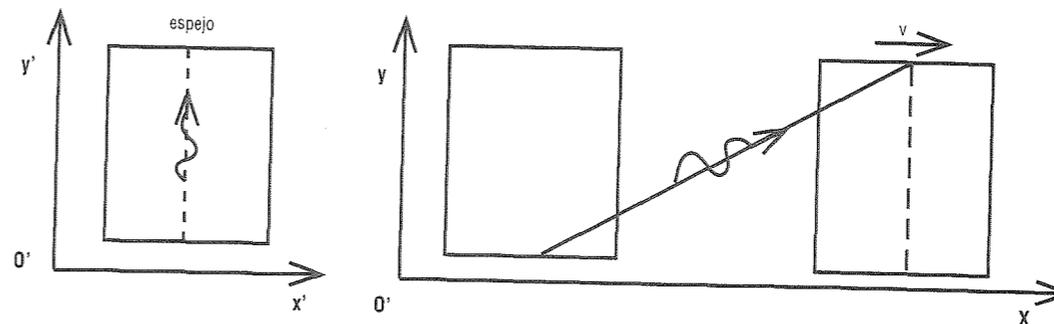
C.2 ¿Qué piensas del contraste entre el pacifismo de Einstein y su apoyo a la construcción de la bomba atómica?

3. Algunas implicaciones de la física relativista

3.1. Dilatación del tiempo. Contracción de la longitud

Fue precisamente la crítica realizada por Einstein al concepto de tiempo, la que abrió las puertas a la solución del problema planteado por el resultado negativo de la experiencia de Michelson. Ilustraremos esta modificación del concepto de tiempo analizando el comportamiento de lo que podríamos llamar un "reloj de luz" constituido por un cilindro en cuya base inferior se emite luz y en cuya base superior hay un espejo (ver fig.). Sea t el tiempo necesario para que un pulso luminoso que parta desde el fondo, alcance el espejo superior.

Consideremos ahora dos observadores O y O' , inicialmente superpuestos, de forma que O' (ligado al reloj) se desplace con respecto a O con velocidad v . Es evidente que O observa (ver fig.) que el camino recorrido por el rayo luminoso en el reloj es mayor que el que recorre para O' , lo que obliga a admitir que los tiempos han de ser diferentes, si la velocidad de la luz es la misma en ambos casos.



Trataremos ahora de establecer la relación entre los tiempos t y t' medidos por ambos observadores.

A.5 En función de la velocidad de la luz c dar el valor de las distancias a y b , con respecto a O y O' , recorridas por la luz. Dar igualmente, en función de su velocidad v , la distancia recorrida por el reloj con respecto a O .

A.6 Aplicar el teorema de Pitágoras al triángulo de la figura para obtener la relación entre los tiempos. Interpretar el resultado.

$$\text{Se obtiene } t = \frac{t'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

Denominamos tiempo propio al intervalo de tiempo entre dos sucesos que ocurren en el mismo lugar de un sistema de referencia. En nuestro ejemplo, esto es lo que sucede para el observador O' y por tanto t' será el tiempo propio. Como la velocidad de la luz c ha de ser siempre la misma, el tiempo t será siempre mayor que el tiempo propio t' . A este aumento se le llama dilatación temporal.

Esta dilatación temporal ha sido verificada experimentalmente mediante medidas de los períodos de semidesintegración de partículas inestables aceleradas hasta altas velocidades.

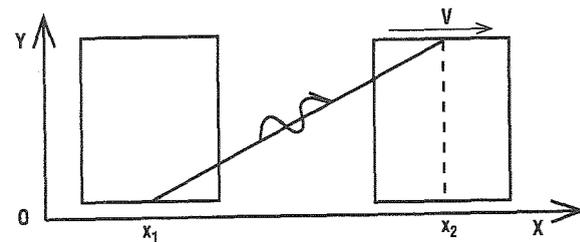
A.7 El período de semidesintegración de una partícula elemental es de $2,5 \cdot 10^{-8}$ s. ¿Cuál sería el período medido si dichas partículas fueran aceleradas hasta alcanzar velocidades de $0,7c$ con respecto al observador?

En resumen, encontramos que el tiempo transcurre de forma diferente para dos observadores situados en sistemas de referencia distintos, uno de los cuales se mueve con velocidad v respecto al otro.

A.8 ¿Cómo explicar que las experiencias cotidianas, un viaje en tren, por ejemplo, no señalen tal diferencia?

La dilatación temporal está relacionada con otro fenómeno: la contracción de longitudes.

A.9 Determinar, en la figura del reloj de luz, la longitud de la varilla para el observadores O y O' (ligado al reloj en movimiento).



Dado que el tiempo propio es t' y la longitud propia es L , resulta conveniente unificar la notación usando el subíndice o para denotar los valores propios, por lo que

$$t = \frac{t_o}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

$$L = L_o \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

A.10 Explicar el aumento de vida media de la partícula a partir de la contracción de longitud.

Simultaneidad

A primera vista los resultados sobre la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud no sólo contradicen nuestras ideas intuitivas, sino también la idea más simple de autoconherencia. Volvamos al primer ejemplo del observador O' en un reloj de luz que se mueve con velocidad v respecto al observador O . Si el observador O dice que el reloj de O' atrasa porque está en movimiento, el observador O' puede decir exactamente lo mismo.

¿Cómo puede haber coherencia si cada observador ve que el reloj del otro atrasa?

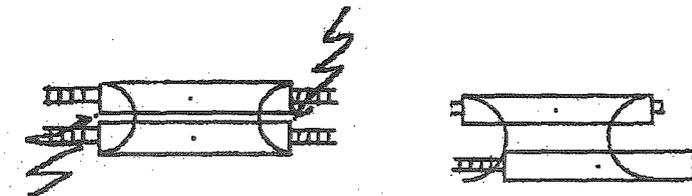
La respuesta de esta aparente contradicción se obtiene tras reflexionar sobre el concepto de simultaneidad y la sincronización de relojes. Un suceso es algo que ocurre en un determinado instante y lugar. Dos sucesos son simultáneos cuando ocurren en el mismo tiempo. Si dos sucesos ocurren en el mismo lugar es fácil determinar si suceden también en el mismo instante y determinar si son simultáneos. Si se dice que un tren llega a las 7 se quiere indicar que se producen simultáneamente dos sucesos: 1) la llegada del tren y 2) el reloj marca las 7. Si dos sucesos ocurren en lugares distintos resulta más difícil determinar si son o no simultáneos. La dificultad estriba en el retraso que existe entre el instante en que ocurren los sucesos y el instante en que esa información llega al observador que decide si son o no simultáneos. Por ello una posibilidad sería colocar al observador equidistante de los lugares en los que se producen los dos sucesos. Si se emite una señal luminosa hacia este observador equidistante, simultá-

neamente a la realización de cada suceso, estas señales serán percibidas simultáneamente por el observador.

Consideremos la siguiente situación: dos observadores O y O' se mueven entre sí con velocidad v (p.ej. dos vagones en vías paralelas). El observador O dice que O' se mueve con velocidad v mientras que O' dice que O se mueve con velocidad $-v$. Ambos puntos de vista son correctos según el principio de relatividad y las descripciones que ambos observadores realicen de los fenómenos físicos serán equivalentes.



Supongamos ahora dos sucesos: la llegada de dos rayos a los extremos de los vagones A, B y A', B' respectivamente. Supongamos que O está en el punto medio del segmento AB y O' lo está en el de $A'B'$.



¿Serán simultáneos estos sucesos para los observadores O y O' ?

Desde O vemos que O' se mueve con velocidad v , durante el tiempo que la luz se propaga de A' a B' y de B' a A' . La luz procedente de B' llegará a O' antes que la luz procedente de A' . Para el observador O los sucesos no serán simultáneos. En general, dos sucesos simultáneos para un observador no lo son necesariamente para otro. ¿Qué observador tiene razón? Ambos. No hay ningún sistema de referencia mejor que el otro. La simultaneidad no es un concepto absoluto. Sin embargo, el observador O puede calcular la diferencia de tiempo que separa la llegada a O' de las señales A' y B' . Y al revés, si O' conoce este intervalo de tiempo, podrá deducir que los sucesos serán simultáneos para O .

3.2. Equivalencia masa/energía

Como ya hemos visto en el tema de Electromagnetismo, en 1897 J. J. Thomson diseñó un método para determinar la velocidad v y la razón q/m de los electrones. Entre dicho año y 1910, Kaufmann y otros muchos físicos comprobaron que para los electrones se obtenía el valor $q/m = 1,76 \cdot 10^{11}$ C/kg sólo en el caso de que la velocidad de los mismos fuera mucho menor que la de la luz. Se observó, además, que el valor de q/m disminuía con la velocidad de los electrones. Se supuso que este hecho se debía a la variación de la masa con la velocidad. Dicha variación puede determinarse, por ejemplo, aplicando un campo magnético conocido, perpendicularmente a la trayectoria de un electrón y midiendo el radio de la trayectoria, dado que $qB = mv/R$. Se encontró que el haz no se desviaba tanto debido a la mayor masa.

Para explicar este fenómeno se realizaron múltiples hipótesis en el marco de la teoría clásica. La más aceptada fue la de Abraham y Bucherer. Consideraban que una parte de la masa del electrón era de origen electromagnético, debido a la inducción mutua entre las partes de éste. Por otra parte, la masa variaba con la velocidad de acuerdo con unas determinadas ecuaciones.

Al margen de estas controversias, Einstein realiza una crítica de los conceptos básicos de Cinemática, como hemos visto en los apartados anteriores. Ello exigió, a su vez, una modificación de los conceptos fundamentales de la Física clásica. En efecto, las leyes fundamentales de la Mecánica clásica –tales como las leyes de conservación de la energía o de la cantidad de movimiento–, dejaban de ser válidas, lo que, o bien implicaba reducir la validez de estas leyes a una mera aproximación para pequeñas velocidades, o bien exigía una modificación de las definiciones operativas de cantidad de movimiento, energía, etc.

Einstein, para preservar la validez de los principios de conservación, siguió la segunda opción. Así, para que se cumpla la conservación de la cantidad de movimiento, la masa de un cuerpo ha de variar con la velocidad según:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

donde m_0 es la masa medida por un observador con respecto al cual la partícula está en reposo.

Kaufmann anunció en 1906 que sus resultados concordaban mejor con las ecuaciones de Abraham y Bucherer que con la de Einstein, pero en 1909 el propio Bucherer obtuvo confirmación experimental para los resultados de Einstein. Estos mostraron, además, una gran fertilidad en el establecimiento de nuevas predicciones, que la experiencia había de verificar plenamente, como veremos a continuación.

A.11 Representar la gráfica $m = f(v)$, de acuerdo con la Física clásica y b) 195a Física relativista (Datos: $v = 0,1c, 0,2c, 0,3c, 0,5c, 0,7c$ y $0,99c$; $m = 1$ kg).

A.12 Indicar en qué condiciones puede considerarse prácticamente constante la masa de un cuerpo tal como supone la Mecánica clásica.

El aumento de la masa con la velocidad se ha comprobado experimentalmente en los aceleradores de partículas elementales, donde se han encontrado hechos como el que se muestra en la siguiente actividad.

A.13 Supóngase un electrón de masa $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg que se mueve a una velocidad de $0,8c$. a) ¿Cuál será su masa para un observador en reposo respecto a él? b) ¿Y para un observador con su misma velocidad?

El aumento de la masa provoca que no se desvíe tanto un haz de partículas cargadas en el campo magnético de un acelerador circular, como el ciclotrón o el bevatrón. Este es un hecho al que se enfrentan todos los días los físicos que trabajan con partículas de alta energía.

Einstein propuso además una relación de equivalencia entre masa y energía. Con sus propias palabras: "La masa de un sistema de cuerpos puede considerarse precisamente como una medida de su energía. La ley de conservación de la masa de un sistema equivale a la ley de conservación de la energía."

Por tanto, si E es la energía total de un sistema, podremos escribir la probablemente más famosa ecuación de la Física

$$E = mc^2$$

o también

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

expresión que denota la existencia de energía incluso para velocidades nulas, lo que lleva a concluir que la masa en reposo está relacionada con una energía en reposo

$$E_0 = m_0 c^2$$

La relación $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$ puede considerarse, desde este punto de vista, como una variación de la masa que tiene lugar al comunicar energía cinética al cuerpo, luego

$$m = m_0 + E_c/c^2$$

o lo que es equivalente

$$E = m_0 c^2 + E_c$$

Por tanto la energía cinética no se obtiene sustituyendo la masa por su expresión relativista m en la expresión clásica $E_c = mv_0^2/2$, sino que $E_c = mc^2 - m_0 c^2$.

A.14 Aplicar el desarrollo del binomio $(1+x)^n = 1 + nx + n(n-1)x^2/2 + \dots$ a la expresión de la energía cinética obtenida. ¿Qué sucede cuando v es mucho menor que c ?

A.15 Determinar la energía cinética de un electrón con velocidad: $0,99c, 0,50c, 0,20c, 0,10c, 0,01c$. ¿Para cuáles de estas velocidades pueden utilizarse las expresiones no relativistas de la energía cinética?

Conviene escribir de otra forma la energía de la partícula en términos de p .

A.16 Escribir p y E en función de m y v . Eliminando v de ambas expresiones, obtener una relación directa entre E y p .

En la expresión $E = mc^2$ el elevado valor del coeficiente c ofrece la posibilidad de liberación de grandes cantidades de energía, consistente en aprovechar reacciones con "defecto de masa", tales como la fisión o la fusión.

A.17 Calcular la energía que podría liberarse si se desintegrara 1 g de materia. Comparar dicha cantidad con la que se libera al quemar 1 g de petróleo (poder calorífico aproximado 10,3 kcal/g).

Cuadro 2

Influencias de la Teoría de la Relatividad en la sociedad

Las primeras décadas de este siglo constituyen un período revolucionario en lo político, social, económico, artístico, científico, etc. Baste citar como ejemplos la Revolución Rusa de 1917, que puso de manifiesto que la economía capitalista no era la economía natural, como las leyes de Newton, sino una economía; los movimientos sufragistas femeninos; el nacimiento del estado de bienestar, teorizado por Keynes y realizado por F. D. Roosevelt, con su "new deal"; la aparición del psicoanálisis; el vanguardismo y el surrealismo en literatura; el cubismo en pintura; las revoluciones relativista y cuántica en ciencia; etc.

En este contexto, la Teoría de la Relatividad, presentada en la prensa como la teoría revolucionaria por excelencia, ejerció un gran impacto tanto en científicos como en artistas, escritores, etc.

Para los científicos supuso la crisis de muchos supuestos fundamentales. De hecho, inicialmente Einstein prefería hablar de teoría de los invariantes, insistiendo en la idea de que las ecuaciones fundamentales conservan la misma forma en todos los sistemas de referencia inerciales. A partir de 1911 Einstein empieza a hablar de relatividad recordando así que los con-

ceptos de espacio y tiempo absolutos de Newton no son válidos y subrayando el cambio que había llevado a cabo.

Hubo científicos que efectuaron la transición a la nueva mecánica sin dificultad pero para otros el cambio fue doloroso y no siempre bien asimilado. También contribuyó a que numerosos científicos escribieran libros para hacer comprensible al lector la Teoría de la Relatividad, es decir, estimuló la divulgación científica.

Al mismo tiempo ejerció un considerable impacto en el pensamiento contemporáneo. Gran número de artículos y libros que aparecieron en los años 20 y 30 utilizaron las formas de expresión relativistas para adquirir un cariz revolucionario y heterodoxo.

La Relatividad tuvo evidentes implicaciones en la percepción del espacio y del tiempo, que influyeron en la arquitectura, pintura, literatura (el tiempo lento en la narrativa). Contribuyó, asimismo, al establecimiento de un género literario, la ciencia ficción. Ideas como la pluralidad de perspectivas han influido en pintura (el cubismo), literatura (narrar historias desde diferentes puntos de vista).

En filosofía ejerció un gran influjo sobre los positivistas del Círculo de Viena y, en particular, en el falsacionismo de Popper (la ciencia no busca verificar sus teorías sino experimentos cruciales que las refuten).

Todo esto, junto con el gran impacto que tuvo de la Relatividad en la prensa, hizo que esta se convirtiera en una moda y convirtió a Einstein en el científico más famoso del mundo.

C.1 Profundizar desde diferentes disciplinas (historia, filosofía, literatura, arte, etc) en la influencia que la Relatividad ejerció en el pensamiento contemporáneo.

4. Principio de equivalencia

Hasta aquí hemos considerado implícitamente que la masa inercial que figura en la ley de movimiento de Newton coincide con la gravitatoria, que aparece en la ley de la Gravitación Universal.

A.18 Mostrar que efectivamente es así, a partir del hecho de que todos los cuerpos caen con la misma aceleración en las proximidades de la superficie terrestre.

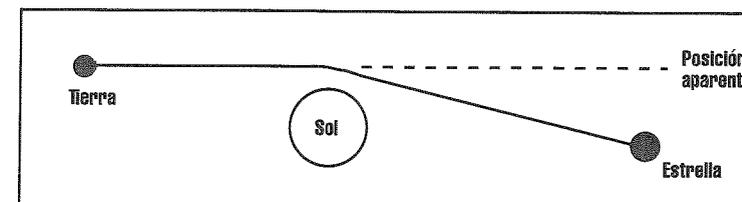
Einstein señaló que la antigua Mecánica registró estos hechos pero no los interpretó. La interpretación satisfactoria de los mismos condujo a Einstein al **postulado de la Relatividad General**.

A.19 Imaginar una nave en una región del espacio libre, sin gravedad: a) sin motor (en MRU) y b) con el cohete acelerando (en MRUA con aceleración g). Comparar, respectivamente, con una nave en una región con gravedad (proximidades de la Tierra): c) en caída libre y d) posada sobre la Tierra.

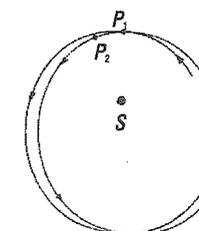
Las leyes de la naturaleza deben ser expresadas de forma que sea imposible distinguir entre un campo gravitatorio uniforme y un sistema de referencia acelerado. Esta expresión constituye el **principio de equivalencia**, base de la teoría gravitatoria de Einstein, la **Relatividad General** enunciada en 1915.

Con el objeto de evitar una imagen excesivamente especulativa de la Física, se pueden mencionar brevemente las tres predicciones que realizó Einstein y mostrar su confirmación experimental:

a) la desviación de un haz luminoso al pasar por una región en la que exista un campo gravitatorio. Einstein señaló la posibilidad de observar esta desviación cuando la luz procedente de una estrella lejana pasara cerca del Sol. Esta desviación fue observada en 1919, durante un eclipse de Sol. Una estrella de posición conocida fue observada en una posición distinta y la desviación observada era compatible con la predicha por la Teoría de la Relatividad. Como un ejemplo más de las múltiples interacciones de la ciencia con la sociedad, se puede señalar que esta predicción no se comprobó antes debido a la Primera Guerra Mundial.



b) el avance del perihelio de Mercurio. La órbita de Mercurio gira lentamente alrededor del Sol, de tal modo que la posición de máxima aproximación (perihelio) varía. El valor predicho por Einstein (43 segundos de arco por siglo) coincide con el observado por Le Verrier en 1859.



c) el desplazamiento gravitatorio al rojo de la luz emitida por una estrella de gran masa. Los intervalos de tiempo se dilatan en regiones del espacio con intensos campos gravitatorios. Por tanto, la frecuencia la luz producida en tales regiones es menor cuando se mide en otra parte.

Otro ejemplo de predicción de la Teoría General de la Relatividad se refiere a los agujeros negros. Si la densidad de un objeto es suficientemente grande, la atracción gravitatoria resulta tan enorme que dentro del radio crítico o de Schwarzschild, nada puede escapar a su acción, ni siquiera la luz.

A.20 Si en un agujero negro se iguala la velocidad de escape a la velocidad de la luz y se despeja el radio, se obtiene el llamado radio de Schwarzschild. Determinar el radio de agujeros negros cuya masa sea igual a la de la Tierra y a la del Sol.

Como un agujero negro es pequeño y no emite radiación, sus efectos sólo se pueden detectar si es compañero de una estrella normal en un sistema binario. Actualmente existen varios candidatos, uno en la constelación del Cisne, otro en Circe, etc.

Cuadro 3

La generación de científicos españoles que hizo posible la visita de Einstein a España

Tras el colapso de la actividad científica española durante la Guerra de la Independencia y el reinado de Fernando VII, que ya vimos el curso anterior, se inicia un largo proceso de recuperación, de importación sistemática de los conocimientos producidos en el extranjero, de fundación de instituciones científicas, etc. Ejemplos notables de figuras intermedias fueron el ingeniero y premio Nobel de Literatura José Echegaray (1832-1916) y el astrónomo Josep Comas i Solà (1868-1937), que difundieron en España las ciencias Físicas y Matemáticas contemporáneas.

Después de la derrota de España en 1898, atribuida entre otras causas al retraso científico, se crea en nuestro país una amplia base de apoyo para la ciencia. Este proceso culminó con la fundación en 1907 de la Junta de Ampliación de Estudios, dirigida por el premio Nobel Santiago Ramón y Cajal. Se inicia así una política de becas para la ampliación de estudios y la investigación en el extranjero así como la creación de laboratorios. Entre ellos cabe mencionar el de Investigaciones Físicas (1910) dirigido por Blas Cabrera; el de Automática (1906) dirigido por Leonardo Torres Quevedo (1852-1936) y, sobre todo, los laboratorios de Química, muy vinculados a los intereses de las industrias, como el de la Residencia de Estudiantes (1912) o el Laboratorio General d'Assaig de la Mancomunitat catalana (1908). También se crean observatorios astronómicos, como el Fabra de Barcelona en 1904, dirigido por Josep Comas o el del Ebro en Tortosa en 1905. Estos esfuerzos permitieron que la generación de científicos nacidos hacia 1880 situase la Física española al nivel de los tiempos. Entre sus miembros destacan:

Blas Cabrera (1878-1945), catedrático de Electricidad y director del Laboratorio de Investigaciones Físicas. Destacó como físico experimental en sus estudios sobre las propiedades magnéticas de la materia, tema en el que se inició con Weiss en 1910-12 en Zurich. Su trabajo alcanzó una difusión internacional. Defendió con entusiasmo y divulgó la Teoría de la Relatividad y la Física cuántica. Llegó a ser rector de la Universidad Central de Madrid. Tras la Guerra Civil se exilió en París y luego en México, donde murió.

José María Plans (1878-1934). Autor de una de las pocas contribuciones originales españolas sobre la relatividad en los años 20: una nueva ecuación para explicar la deflexión de la luz en campos gravitatorios. Otra de ellas fue realizada por el matemático Puig Adam en su tesis doctoral, dirigida por Plans. Publicó un libro de difusión, *Nociones fundamentales de mecánica relativista* y tradujo el famoso *Space, time and gravitation* de Eddington.

Esteban Terradas (1883-1950). Físico, matemático e ingeniero. Catedrático de Acústica y Óptica. Sus grandes conocimientos del alemán le permitían seguir día a día los avances en Relatividad y Física cuántica. Utilizó métodos innovadores de enseñanza. Hacia 1910 había incorporado la Física cuántica en la enseñanza universitaria y hacia 1915 introdujo la Relatividad. En 1915 diseñó la red telefónica catalana y trabajó en la red de ferrocarriles secundarios de Cataluña.

Gracias a la difusión de la Teoría de la Relatividad entre los profesionales con formación científica (ingenieros, profesores de segunda enseñanza, farmacéuticos, médicos, etc.), los científicos anteriores hicieron posible la visita de Einstein a España en marzo de 1923. En particular, Terradas, Cabrera y el matemático Julio Rey Pastor organizaron el viaje y la estancia.

Entre los físicos de la siguiente generación, formada por los citados anteriormente, se destaca a:

Julio Palacios (1891-1970). Estudió con Terrades y con el premio Nobel Kamerling Onnes en Leiden en 1918, realizando investigaciones sobre bajas temperaturas, tema que no pudo proseguir en España por no tener instalaciones adecuadas. Hizo contribuciones teóricas señaladas, una de las cuales merecería ser publicada por Wienn en los *Annalen der Physick*. Tuvo un gran conocimiento de la Física cuántica y una temprana admiración por la teoría de Einstein, que contrasta con su obcecación antirrelativista en sus últimos años.

Arturo Duperier (1896-1954). Estudió con Cabrera. Fue un experimentador notable que ideó procedimientos para localizar y estudiar rayos cósmicos, disciplina que se convertiría después en la Física de partículas elementales. Se exilió a Londres en 1939 donde trabajó en el Imperial College. Su regreso a Madrid tuvo lugar en 1953, sufriendo grandes dificultades burocráticas la entrada de su equipamiento científico.

Miguel Angel Catalán (1894-1957). Investigó sobre espectroscopía atómica con Fowler en Londres en 1920-21, donde descubrió los multipletes del manganeso. Sommerfeld conoció sus investigaciones durante su viaje a Madrid en 1922 y, como consecuencia de ello, le fue concedida una beca Rockefeller, que condujo a Catalán al laboratorio de Sommerfeld en Munich en 1923-25. Regresó al Laboratorio de Investigaciones Físicas de Madrid en compañía de K. Bechert para proseguir sus trabajos sobre espectroscopía.

La Guerra Civil y la derrota de la República por el franquismo provocan un nuevo colapso económico, cultural y científico. Hasta los años 50 no se recupera el nivel de vida anterior a la guerra. Al inicio de la guerra se exilian algunos científicos como Severo Ochoa. El número de personas muertas, exiliadas y desaparecidas durante la guerra y la inmediata posguerra, supera el millón, de las que un 80 por ciento corresponden a los republicanos. La mayoría de los exiliados son obreros cualificados, técnicos, artistas, profesores (Cabrera, Duperier, del Río, etc). Los republicanos que permanecen en España son desterrados o postergados, los cuerpos docentes depurados (Catalán, etc.). La ciencia y la tecnología se resintieron durante decenios de estas pérdidas, así como de la hostilidad franquista hacia la ciencia moderna en los años 40.

La recuperación científica empieza con el desarrollismo de la década de los 60. Dadas las escasas inversiones en investigación y desarrollo (I+D) realizadas por el régimen franquista, el cambio tecnológico no podía apoyarse en un desarrollo autónomo por lo que se basó en la importación de tecnología. En 1980 sólo se invertía en I+D un 0,4% del Producto Interior Bruto (PIB). En la última década se ha realizado un gran esfuerzo inversor, alcanzando un 0,8% del PIB. Estas cifras son insuficientes si se comparan con el 2% de media de los países de la OCDE. Alemania invierte un 2,85%, Francia un 2,33%, el Reino Unido un 2,29%, Japón un 2,87%, EE.UU. un 2,71%, Italia un 1,32%, etc.

C.1 A la vista de lo expuesto ¿crees que es cierto el tópico de que "el suelo español es infértil para la ciencia"?

C.2 ¿Qué políticas parecen aconsejables para conseguir en España un nivel de desarrollo científico y tecnológico?

- 1 Si se aplicara una fuerza constante a un cuerpo durante un tiempo indefinido, explicar cómo variaría con el tiempo la velocidad adquirida por el cuerpo.
(Selectividad. 1991)
- 2 La vida media del neutrón libre es 700 s. ¿Cuál sería su vida media si fuese acelerada hasta alcanzar velocidades de 0,7 veces la velocidad de la luz respecto al observador? Interpretar el resultado.
(Selectividad. 1988)
- 3 Una varilla de 1 m de longitud se mueve con velocidad constante en sentido longitudinal respecto de un observador. ¿Qué valor ha de tener la velocidad para que el observador mida una longitud de 0,5 m?
(Selectividad. 1992)
- 4 La longitud propia de cada uno de los lados de un cuadrado es a. Hallar el perímetro de este cuadrado en un sistema de referencia, que se mueve a velocidad constante u en la dirección paralela a la base. Estudiar el resultado para los casos en que $u \ll c$ y para cuando u tiende a c. (c es la velocidad de la luz).
(Selectividad. 1994)
- 5 En el hemisferio Norte, la estrella más brillante es Sirius A, que se encuentra a 8,5 años-luz de la Tierra. Calcular a qué velocidad constante deberá viajar una nave espacial para llegar a la estrella en 12 años, medidos por un observador de la nave. Dato: $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
(Selectividad. 1991)
- 6 Calcular la distancia, medida por un observador situado en la Tierra, recorrida por un mesón pi antes de desintegrarse si su velocidad es 0,8c. La vida media en reposo es de $2,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$.
- 7 ¿Es aplicable la fórmula $E = m \cdot c^2$ a partículas que se mueven con la velocidad de la luz? ¿Es aplicable sólo a ellas?
- 8 El neutrino es una partícula elemental con masa en reposo nula que se mueve con la velocidad de la luz. Justificar si se puede captar un neutrino.
- 9 La masa del protón es $1,672 \cdot 10^{-24} \text{ g}$. ¿Cuál sería su masa si fuese acelerado hasta alcanzar una velocidad de 0,8 veces la de la luz con respecto al observador? Interpretar los resultados.
(Selectividad. 1988)
- 10 Razónese la veracidad o falsedad de la siguiente frase: Para aumentar la velocidad de un objeto de masa m desde el reposo hasta la velocidad de la luz c, el trabajo necesario es mc^2 .
(Selectividad. 1992)
- 11 Demostrar que si un cuerpo emite energía E en forma de radiación, la masa disminuye en E/c^2 . ¿A qué velocidad debe convertirse masa en energía para producir 30 Mw?
(Selectividad. 1994)

Se dice que un sistema de referencia es inercial cuando tiene un movimiento rectilíneo y uniforme con respecto a otro. Según el principio de relatividad de Galileo, las leyes de la Mecánica no se modifican al referirlas a un sistema en reposo o a uno inercial. Si se observa un punto cuyas coordenadas en un sistema de referencia son (x,y,z) y en otro inercial (x',y',z'), las transformaciones de Galileo establecen que

$$\begin{aligned}x &= x' - vt \\ y &= y' \\ z &= z'\end{aligned}$$

siendo v la velocidad del sistema inercial con respecto al primero y t el tiempo en el que se hace la observación.

Las relaciones entre la velocidad (Vx, Vy, Vz) del punto observada desde el primer sistema de referencia y la velocidad (Vx', Vy', Vz') observada desde el segundo sistema son:

$$\begin{aligned}V_x' &= V_x - v \\ V_y' &= V_y \\ V_z' &= V_z\end{aligned}$$

y entre las aceleraciones:

$$\begin{aligned}a_x' &= a_x \\ a_y' &= a_y \\ a_z' &= a_z\end{aligned}$$

El experimento de Michelson-Morley demostró que la velocidad de la luz no depende del movimiento que el observador tiene con respecto al supuesto éter. Los postulados de la Teoría de la Relatividad Especial de Einstein establecen que:

1. Todas las leyes de la Física son invariantes en todos los sistemas de referencia inerciales (Principio de la relatividad especial).
2. La velocidad de la luz en el vacío tiene el mismo valor en todos los sistemas de referencia inerciales.

De la Teoría de la Relatividad Especial se deducen los siguientes hechos:

1. Dilatación del tiempo. El intervalo de tiempo (t) entre dos sucesos es mayor cuando se mide desde un sistema de referencia que se mueve con un MRU de velocidad v que cuando se realiza la medida (t₀) desde un sistema de referencia en el que los dos sucesos ocurren en el mismo lugar:

$$t = t_0 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$$

2. Contracción de la longitud. La longitud (L) de un objeto medida por un observador para el cual el objeto tiene un MRU de velocidad v es menor que la medida (L₀) por un observador que se encuentra en reposo con respecto al objeto.

$$L = L_0 (1 - v^2/c^2)^{1/2}$$

La contracción de la longitud afecta sólo a la dimensión del cuerpo que tiene la misma dirección que la velocidad.

3. **Simultaneidad.** Dos sucesos pueden ser considerados simultáneos para un observador y no simultáneos para otro.

4. **Variación de la masa.** La masa (m) de un cuerpo es mayor cuando se mide desde un sistema de referencia en el cual se observa que la masa se mueve con un MRU de velocidad v , que cuando se mide desde un sistema de referencia para el cual la masa está en reposo (m_0):

$$m = m_0 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$$

Los hechos anteriores no son apreciables cuando la velocidad v es mucho menor que c .

La masa (m) y la energía (E) de un sistema son dos magnitudes equivalentes según la relación $E = mc^2$ por lo que el principio de conservación de la masa y el de la energía son equivalentes. Los sistemas en reposo tienen una energía, llamada **energía en reposo**, que viene dada por $E_0 = m_0c^2$ donde m_0 es la masa medida en un sistema de referencia en el que el sistema se encuentra en reposo. La energía cinética (E_c) de un sistema de masa m y masa en reposo m_0 es $E_c = E - E_0 = mc^2 - m_0c^2$.

La Teoría de la Relatividad General de Einstein se refiere a sistemas de referencia no inerciales. El postulado de la Teoría de la Relatividad General, conocido como **principio de equivalencia**, establece que "un observador no tiene ninguna forma para distinguir si se encuentra en un campo gravitatorio uniforme o en un sistema de referencia acelerado".

Soluciones a los ejercicios propuestos

A.7. $4,5 \cdot 10^{-8}$ s.

A.13. a) $15,2 \cdot 10^{-31}$ kg; b) $9,11 \cdot 10^{-31}$ kg.

A.15. $1,69 \cdot 10^{-21}$ J; $4,10 \cdot 10^{-23}$ J; $5,47 \cdot 10^{-24}$ J; $1,37 \cdot 10^{-24}$ J; $1,37 \cdot 10^{-26}$ J.

A.17. $9 \cdot 10^3$ J; $4,3 \cdot 10^4$ J.

Actividades complementarias

2. 980,20 s.

3. $0,87c$ m/s.

4. $2a(1 - v^2/c^2)^{1/2} + 2a$ m; $4a$ m; $2a$ m.

5. $0,58c$ m/s.

6. 10,32 m.

9. $2,79 \cdot 10^{-24}$ kg.

11. $3,3 \cdot 10^{-10}$ kg/s.

6. Elementos de Física cuántica

La crisis de la Física clásica, que tiene lugar a comienzos del siglo xx, está relacionada con la imposibilidad de detectar un sistema de referencia en reposo absoluto –a la que nos hemos referido en el capítulo anterior– y con problemas relacionados con la emisión y absorción de ondas electromagnéticas y que, de forma coincidente, iban también a exigir un cambio profundo en dichas concepciones clásicas.

Dichos problemas son: el efecto fotoeléctrico –liberación de electrones por superficies iluminadas– y los espectros discontinuos de los gases. Es preciso referirnos a un tercer problema –aunque su mayor complejidad no recomienda su estudio a este nivel–, el relativo a la interpretación de los espectros continuos emitidos por sólidos y líquidos incandescentes.

Estos problemas originaron la crisis de la Física clásica, marcando sus límites de validez y pusieron en evidencia la necesidad de profundos cambios en ella. Aunque los primeros aparecen históricamente como retoques, es decir, como hipótesis parciales que rectificaron el edificio teórico existente, pronto se vio la necesidad de un replanteamiento global, elaborándose un nuevo marco conceptual que conocemos como Física cuántica.

De acuerdo con ello desarrollaremos el tema según el siguiente hilo conductor:

1. El efecto fotoeléctrico: los fotones
2. Espectros atómicos y modelo de Bohr
3. De Broglie y la difracción de electrones
4. Relaciones de indeterminación de Heisenberg
5. La función de ondas y su interpretación probabilista
6. Aplicaciones de la Física cuántica
7. Recapitulación de la Física moderna

1. El efecto fotoeléctrico: los fotones

Conviene iniciar el tema abordando el estudio de algunos problemas que, a fines del siglo pasado, quedaban pendientes de solución en el marco casi acabado de la Física clásica. Dichos problemas eran, en particular, el efecto fotoeléctrico y los espectros atómicos.

En 1886 y 1887 H. Hertz llevó a cabo los experimentos que por primera vez confirmaron la existencia de las ondas electromagnéticas predichas por la teoría electromagnética de Maxwell. En el curso de estos experimentos Hertz descubrió que ocurría más fácilmente una descarga eléctrica entre dos electrodos cuando llegaba luz a uno de ellos.

A.1 A título de hipótesis, tratar de dar alguna explicación del fenómeno observado por Hertz, es decir, del hecho de que se produce más fácilmente la descarga de un electrodo cuando se ilumina.

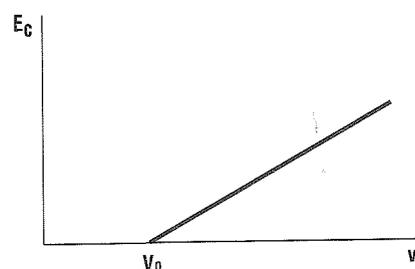
Conviene ahora operativizar las ideas expuestas en la actividad anterior.

A.2 Partiendo de la teoría de Maxwell que concibe la luz como una onda electromagnética –que como tal onda, lleva distribuida uniformemente su energía–, considerar, a título de hipótesis, la influencia de la frecuencia y de la intensidad luminosa sobre la emisión de electrones (la cantidad de electrones emitidos por segundo, su energía cinética, el tiempo que tardaran en ser emitidos...). Analizar el efecto de cambiar el metal.

Veamos a continuación que los resultados experimentales contradicen las hipótesis emitidas en la actividad anterior.

Básicamente estos resultados pueden resumirse como sigue:

1. Para un metal dado, el efecto fotoeléctrico sólo se presenta por encima de una cierta frecuencia umbral ν , sea cual sea la intensidad luminosa.
2. Si la frecuencia ν se mantiene constante por encima de un valor mínimo ν_0 , el número de electrones crece con la intensidad luminosa, pero no ocurre así con la energía cinética de dichos electrones que se mantiene constante.
3. La energía cinética de los electrones aumenta linealmente con la frecuencia ν a partir de un valor umbral ν_0 , característico de cada metal de acuerdo con la figura



4. La emisión de electrones es prácticamente instantánea.

A.3 Analizar los resultados experimentales anteriores señalando cuáles contradicen la teoría clásica de la radiación como onda electromagnética que se distribuye uniformemente por el espacio. Extraer conclusiones sobre la naturaleza de la luz.

A.4 Sugerir alguna nueva hipótesis sobre el comportamiento de la luz, capaz de interpretar los resultados experimentales relativos al efecto fotoeléctrico. En particular se trata de explicar con dicha hipótesis:

1. Por qué dicho efecto sólo se presenta para frecuencias de la luz superiores a un valor umbral, distinto para cada metal.
2. Por qué la energía cinética de los electrones liberados es siempre la misma para una frecuencia $\nu > \nu_0$ dada, sea cual sea la intensidad luminosa.
3. Por qué la emisión de electrones es prácticamente instantánea y su número aumenta al hacerlo la intensidad, manteniendo la frecuencia constante.

Einstein en su trabajo de 1905 sobre el efecto fotoeléctrico planteó la hipótesis de que las ondas electromagnéticas son una distribución de “paquetes de energía” o cuantos –posteriormente fotones– cada uno de los cuales posee una energía proporcional a la frecuencia, $E = h\nu$, en donde h es una constante cuyo valor es $6,6 \cdot 10^{-34}$ Js, denominada **constante de Planck**, introducida por este físico en 1900 al explicar los espectros continuos de sólidos y líquidos incandescentes, tema que por su complejidad no se aborda en este nivel.

A.5 Calcular el número de fotones por segundo y m^2 a una distancia de 1 m de una bombilla de 100 w, suponiendo una longitud de onda media de 550 nm. Idem para la luz del Sol, sabiendo que cuando llega a la Tierra tiene una intensidad de unos 1400 w/m^2 , valor denominado constante solar.

A.6 Siendo n la frecuencia de la radiación (superior a la frecuencia umbral ν^0 necesaria para que se presente el efecto fotoeléctrico), escribir, de acuerdo con la hipótesis anterior, una ecuación que ligue la energía del fotón incidente con la energía cinética del electrón liberado.

A.7 El trabajo de extracción para el sodio vale $3,65 \cdot 10^{-19}$ J. Calcular la energía cinética máxima de un electrón emitido por una superficie de sodio, cuando se ilumina con una luz de longitud de onda: a) $4,1 \cdot 10^{-7}$ m, b) $5,5 \cdot 10^{-7}$ m.

La hipótesis de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico fue confirmada en 1915 por el físico americano R. A. Millikan cuyos experimentos posibilitaron uno de los procedimientos para determinar la constante de Planck h .

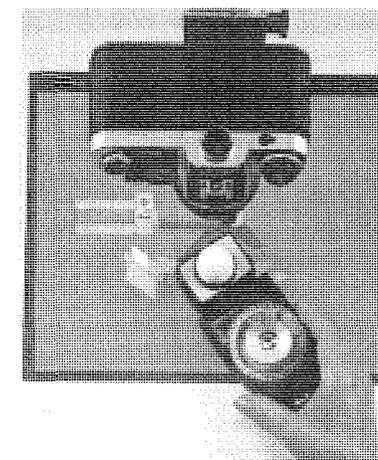
Las fotocélulas eléctricas y sus aplicaciones

El efecto fotoeléctrico se puede observar fácilmente utilizando una célula fotoeléctrica. Se trata de un tubo de vidrio en el que se ha hecho el vacío, con una placa metálica y un electrodo menor llamado colector.

C.1 Diseñar un montaje que permita determinar si se produce corriente cuando iluminamos la placa.

La energía cinética máxima de los electrones emitidos por la placa iluminada puede medirse utilizando una fuente de tensión variable. Si se conecta la placa de la célula fotoeléctrica al polo positivo de la fuente y el colector al polo negativo, no todos los electrones emitidos por la placa llegarán al colector. Al aumentar la tensión de la fuente disminuirá el número de electrones que alcanzan el colector. Para una tensión determinada, llamada potencial de frenado, no llegará ningún electrón lo cual puede ser detectado por un amperímetro colocado en el circuito.

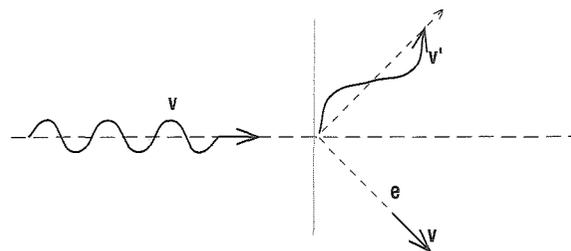
Entre las aplicaciones de las células fotoeléctricas cabe mencionar las alarmas antirrobo y la apertura electrónica de puertas. Muchos detectores de humos se basan en el mismo hecho: se interrumpe el paso de la luz, lo que produce una caída de corriente que activa el interruptor. También utilizan este circuito los fotómetros de los fotógrafos y otros dispositivos para medir la intensidad de luz, p.ej., los espectrofotómetros. Finalmente, un tipo de banda sonora de las películas consiste en una sección estrecha de sombreado variable existente a un lado de la película. La señal eléctrica producida en el detector de una célula fotoeléctrica reproduce las frecuencias de la banda sonora.



En resumen, la luz además de su evidente comportamiento ondulatorio (interferencia, difracción, etc.) manifiesta un comportamiento corpuscular (efecto fotoeléctrico, etc.). ¿Cómo podemos interpretar esto? En el apartado 2 se analizará con detalle tras plantearnos el problema simétrico, es decir, si los objetos clásicamente etiquetados como partículas (p.ej., los electrones) mostrarán propiedades ondulatorias.

Pero antes nos referiremos a nuevos hechos que ilustran la validez de la teoría del fotón, en particular, el efecto Compton y la frecuencia máxima de los espectros de rayos X. En el siguiente apartado se aplicará el concepto de fotón a los espectros discontinuos de los átomos.

En el efecto Compton, descubierto por dicho físico en 1923, las ondas electromagnéticas de frecuencia elevada (por ejemplo, rayos X) que inciden sobre un obstáculo (por ejemplo, una fina lámina de calcita) son difundidas con su propia frecuencia ν y con una frecuencia ν' menor que la incidente. Por otra parte, de la calcita surgen algunos electrones libres, tal como se esquematiza en la figura. Esto resulta sorprendente desde el punto de vista clásico porque la frecuencia de las ondas difundidas debe ser igual a la de las ondas incidentes, según la teoría ondulatoria clásica.



A 8 Dar una interpretación cualitativa de dicho fenómeno y, en particular, del hecho que la frecuencia difundida ν' sea menor que la incidente ν . ¿Qué conclusión extraemos con respecto a la naturaleza de la luz?

Los rayos X se generan en un tubo de vacío, al bombardear un ánodo metálico con electrones emitidos por un cátodo caliente. La radiación obtenida se presenta como un espectro continuo, con una frecuencia máxima que depende de la energía cinética de los electrones, es decir, de la diferencia de potencial aplicada. Esto se explica porque los electrones, al frenarse, emiten fotones, cuya energía máxima no puede ser mayor que la energía cinética de los electrones.

A 9 En un tubo de rayos X la diferencia de potencial es de 40 KeV. Hallar: a) la energía cinética de los electrones; b) la frecuencia máxima del espectro de rayos X emitido y su longitud de onda mínima.

2. Espectros atómicos y modelo de Bohr

Como ya es conocido, los modelos atómicos basados en la Física clásica (Thomson y Rutherford) no podían explicar algunos de los fenómenos observados. Así, el modelo de Thomson (1904) era incapaz de dar cuenta de la dispersión de partículas alfa por una fina lámina de oro (Geiger y Mardsen 1909) y el modelo de Rutherford (1911), si bien explicaba lo anterior, era inconsistente con la teoría electromagnética clásica. Según ésta, un electrón que gira alrededor del núcleo, emite energía continuamente en forma de ondas electromagnéticas, lo cual le llevaría a caer muy rápidamente sobre el núcleo, en contradicción con la evidente estabilidad de los átomos. Además, ambos modelos eran incapaces de explicar el carácter discontinuo y característico de los espectros atómicos.

Para poder explicar dichos espectros, Bohr aplicó en 1913 las nuevas ideas de la teoría cuántica de Einstein al modelo nuclear de Rutherford, modificándolo de forma que diera cuenta de los hechos

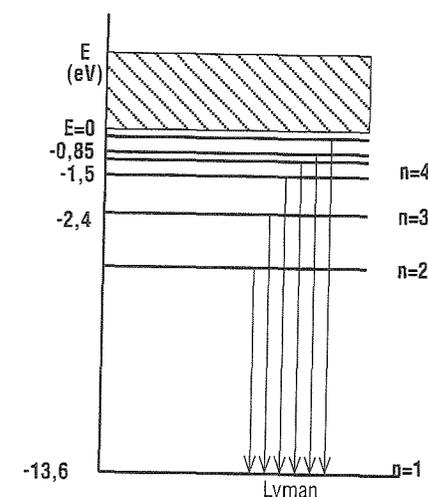
experimentales relativos a la emisión de luz. De forma esquemática podemos exponer los postulados de Bohr:

1. En el átomo, un electrón se mueve en una órbita circular alrededor del núcleo.
2. De la infinidad de órbitas que permite la Física clásica, el electrón sólo puede moverse en las que el momento angular orbital cumple $mvr = nh/2$.
3. El electrón se mueve en una órbita permitida sin radiar energía electromagnética. De esta forma su energía total E permanece constante.
4. La emisión o absorción de energía radiante se realiza cuando el electrón pasa de una órbita a otra.

A.10 Indicar en qué contradicen los postulados de Bohr a la Física clásica.

Bohr introduce para los estados del electrón la cuantificación tanto de la energía E como del momento angular L : el electrón sólo puede estar en estados con la energía E y el momento angular L bien definidos. Como estos estados son estacionarios, es decir, de energía constante, supera así el carácter autodestructivo del modelo de Rutherford. Pero además, el modelo de Bohr pudo explicar los espectros de absorción y emisión del hidrógeno (las distintas series espectrales), como veremos a continuación. Esto es así porque las ideas de Bohr son correctas simplemente sustituyendo el término órbita por nivel energético o estado estacionario, caracterizado por la energía E y el momento angular L .

Es útil representar los distintos valores posibles de la energía por rectas horizontales en un diagrama de niveles energéticos. El estado más bajo tiene una energía E_1 y se denomina estado fundamental. Los estados superiores E_2, E_3, \dots se denominan estados excitados. A temperatura ambiente casi todos los átomos están en el estado fundamental. A temperaturas más elevadas o durante una descarga, muchos átomos pueden estar en estados excitados.



Las hipótesis de Bohr aplicadas al átomo de hidrógeno posibilitaron el cálculo de las órbitas (estados) permitidas y de las energías correspondientes a las mismas. Asimismo permitió deducir la expresión de la longitud de onda de la radiación emitida al pasar de un estado a otro. Abordaremos dicho problema en la actividad siguiente.

A.11 Utilizando las ideas de Bohr, justificar los espectros de absorción y emisión.

El espectro visible del hidrógeno está formado por una secuencia de rayas, cada vez más apretadas y que se aproximan a un límite definido en la región ultravioleta UV, conocida con el nombre de serie de Balmer. Éste descubrió en 1885 que las rayas pueden ser expresadas por una sencilla fórmula

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

donde R es la constante de Rydberg ($R = 1,0974 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$), $m = 2$ y n toma los valores 3, 4, 5, ... Posteriormente se descubrieron las series de Lyman en el UV ($m = 1$), de Paschen en el infrarrojo ($m = 3$), etc. Bohr, en 1913, al calcular el valor de la energía y sustituirlo en la expresión $E_m - E_n = h\nu$ obtuvo la fórmula empírica de Balmer. Aquí seguiremos el proceso inverso.

A.12 Comparando las expresiones $E_n - E_m = h\nu$ y $1/\lambda = R(1/m^2 - 1/n^2)$ deducir el valor de la energía del estado enésimo e interpretar el origen de las series espectrales y de la energía de ionización.

Se obtiene

$$E_n = -Rhc/n^2$$

Se observa que la energía del electrón está cuantizada por el número cuántico principal n . El nivel fundamental se obtiene para $n = 1$, $E_1 = -2,17 \cdot 10^{-18} \text{ J} = -13,6 \text{ eV}$. Las energías de los estados excitados vendrán dadas por $E_n = -13,6/n^2$. Así pues $E_2 = -3,4 \text{ eV}$, $E_3 = -1,5 \text{ eV}$, etc. Las transiciones de cualquier nivel n a $m = 1$, originan la serie de Lyman, a $m = 2$, la de Balmer, a $m = 3$, la de Paschen, etc. Por otra parte, el potencial de ionización corresponde a la transición de $n = 1$ a $n \rightarrow \infty$ ($E = 0$) donde el electrón estará libre.

A.13 Explicar qué sucederá si un átomo de hidrógeno en su estado fundamental absorbe un fotón de energía: a) $16,43 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; b) $21,9 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; c) $17,0 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Determinar la longitud de onda de la luz emitida cuando el átomo vuelva a su estado fundamental (en los casos en que sea posible). Datos $E_1 = -21,86 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $E_2 = -5,43 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $E_3 = -2,42 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Asimismo, se determinó experimentalmente el siguiente enunciado, que se conoce como principio de combinación de Rydberg: "Si dos frecuencias son observadas también lo son sus sumas y diferencias".

A.14 (Opc.) Interpretar dicho principio a partir del modelo de Bohr.

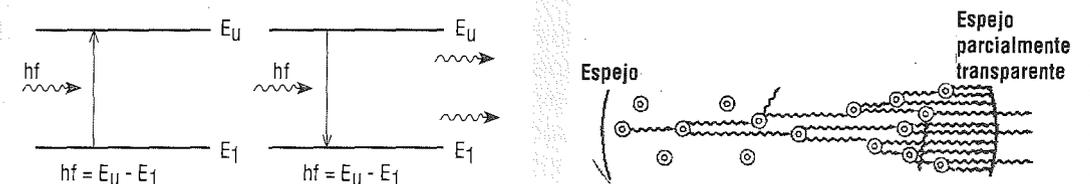
Sin embargo, y a pesar de sus éxitos, pronto surgieron dificultades que obligaron a modificarlo (modelo de Sommerfeld) y finalmente a sustituirlo por otro, producto del establecimiento de la Mecánica cuántica que supuso un cambio radical de los conceptos físicos. Entre las deficiencias del modelo de Bohr mencionaremos: no explicaba los espectros de los átomos polielectrónicos e, incluso, el espectro del hidrógeno: al utilizar espectroscopios más potentes o al aplicar campos eléctricos o magnéticos, resultaba ser más complicado de lo previsto en la teoría (aparecían desdoblamientos de las rayas espectrales); tampoco explicaba la mayor intensidad de unas rayas sobre otras, la anchura de las mismas, la existencia de direcciones privilegiadas en los enlaces atómicos, etc.

Cuadro 2

El láser

La palabra láser proviene de las iniciales de *light amplification by stimulated emission of radiation* (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación).

La acción del láser se basa en la Teoría cuántica. Las primeras ideas sobre emisión estimulada de radiación fueron establecidas por Einstein en 1917. Un átomo puede absorber un fotón si su energía $h\nu$ corresponde a la diferencia entre la energía del electrón y la de un estado disponible. Si el átomo se halla en el estado excitado, el electrón puede pasar espontáneamente al estado inferior emitiendo un fotón y también cuando un fotón de la misma frecuencia alcanza el átomo excitado. Este fenómeno se denomina emisión estimulada y los dos fotones están en fase.



Como normalmente los electrones se encuentran en el estado más bajo, los fotones incidentes se absorberán. Para obtener luz amplificada por emisión estimulada se deben cumplir dos condiciones. Primera, los átomos del material utilizado deben excitarse previamente al estado superior para que la emisión predomine sobre la absorción. Segunda, el estado superior debe ser metaestable –los electrones deben permanecer en él más tiempo de los 10^{-8} s normales– a fin de que la transición al estado inferior tenga lugar por emisión estimulada y no espontáneamente.

Éstas y otras dificultades provocaron que esta nueva tecnología se iniciase a finales de los años 40, cuando N. Bassov, A. Prokhorov y Ch. Townes realizaron investigaciones sobre la amplificación de microondas, que llevó en 1945 a la construcción del primer maser operativo. Recibieron por ello el premio Nobel de 1964. En 1957 Gordon Gould y Ch. Townes plantearon una amplificación análoga de la luz, lo que condujo en 1960 al primer láser de rubí satisfactorio.

Las múltiples aplicaciones del láser empiezan hacia 1980 y se pueden mencionar las siguientes: como lectores (de códigos de barras en los supermercados, de discos compactos CD y de videodiscos), bélicas (dirección de proyectiles), industriales (dirección de túneles, soldadura y grabado de metales, taladro de materiales duros, corte de tejidos, etc.), médicas (microcirugía), científicas (facilitan las experiencias de interferencia, difracción, etc.), artísticas, impresoras láser, holografía, etc. Ha dado lugar a una tecnología nueva llamada optoelectrónica, que incluye las telecomunicaciones por fibra óptica, así como los sistemas de almacenamiento de datos de ordenador en CD. La utilización del láser en optoelectrónica se basa en el hecho de que la luz es preferible a las ondas de radio para transmitir información porque la cantidad de datos transmitidos aumenta con la frecuencia del agente empleado.

C.1 Completar y ampliar las múltiples aplicaciones del láser.

3. De Broglie y la difracción de electrones

Aunque los trabajos de Planck, Einstein, Bohr y otros habían confirmado de manera rotunda la naturaleza cuántica, discontinua de la luz y de los sistemas atómicos, dichos trabajos sólo pudieron ser considerados como los orígenes de la nueva concepción de la materia que habría de sustituir a las teorías clásicas.

En efecto, podemos considerar que el establecimiento de la Física cuántica se inicia, como ya hemos dicho, en 1923 con los trabajos de Louis De Broglie, en los que introduce una nueva y atrevida hipótesis consistente en atribuir a los electrones –y, en general, a cualquier objeto– un comportamiento ondulatorio, además de su evidente comportamiento corpuscular.

A.15 Indicar posibles argumentos en apoyo de la hipótesis de De Broglie.

De Broglie no se limitó, por supuesto, a enunciar una simple hipótesis cualitativa sino que trató de relacionar las magnitudes características del aspecto ondulatorio –la frecuencia o la longitud de onda– con las del corpuscular –la cantidad de movimiento–. Para obtener la expresión de De Broglie podemos seguir el siguiente camino: establecer la relación entre la longitud de onda y la cantidad de movimiento para los fotones, generalizando después el resultado para todos los objetos materiales.

A.16 Teniendo en cuenta que la energía de un fotón, según la hipótesis de Planck, puede escribirse como $E = h\nu$ y según la Relatividad ha de ser $E = pc$, establecer la relación existente entre la longitud de onda de un fotón y su cantidad de movimiento.

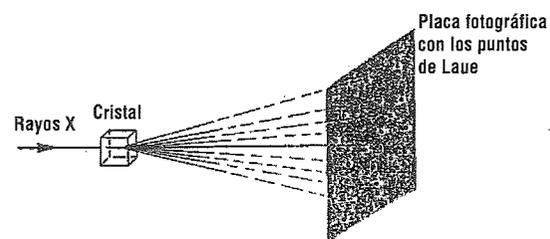
A.17 Calcular la longitud de onda de los siguientes cuerpos, comparándola con la de los rayos X (del orden de 10^{-10} m):

- La Tierra en su rotación alrededor del Sol ($m = 6 \cdot 10^{24}$ kg y $v = 3 \cdot 10^4$ m/s)
- Un guijarro de 10 g lanzado a 1 m/s
- Un electrón que, sometido a un campo eléctrico, ha adquirido la velocidad de $6 \cdot 10^6$ m/s ($m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg)

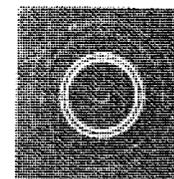
Como muestra la actividad anterior, la longitud de onda correspondiente al movimiento de los objetos macroscópicos (incluso los más diminutos) es tan pequeña que no puede producir efectos perceptibles. En cambio, el valor predicho para la longitud de onda de un electrón que se mueva a velocidades moderadas resulta comparable a la de los rayos X y cabe pensar en la posibilidad de detectar la existencia de dichas ondas.

A.18 ¿A qué fenómenos convendría recurrir para poner en evidencia el comportamiento ondulatorio de los electrones? Describir el posible experimento.

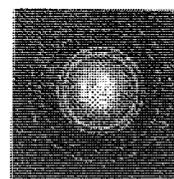
Este problema era análogo al que plantearon los rayos X en 1912. La solución de Von Laue fue recurrir a redes cristalinas. Sin embargo, los electrones plantean dificultades, dado que no pueden atravesar tan fácilmente un cristal como una radiación electromagnética. Por ello es necesario estudiar los electrones reflejados en superficies cristalinas o los transmitidos por hojas extremadamente finas. Tres años después, utilizando dichas técnicas, Davisson y Germer, y Thomson obtuvieron respectivamente diagramas de manchas y de círculos como los obtenidos con rayos X por



Von Laue y Debye-Scherrer, que mostraban con toda claridad la difracción de electrones (ver figura). Además, los cálculos realizados a partir de las figuras de difracción obtenidas proporcionaban valores de la longitud de ondas que correspondían con los predichos por la relación de De Broglie.



a)



b)

(a) Diagrama de difracción producido por rayos X de longitud de onda 0,71 Å y un blanco de hoja de aluminio. (b) Diagrama de difracción producido por electrones de 600 eV (longitud de onda de De Broglie de 0,5 aproximadamente) y un blanco de lámina de aluminio.

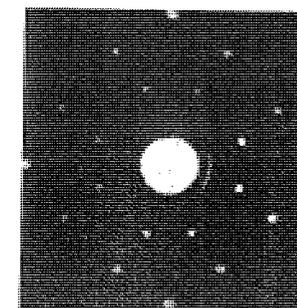
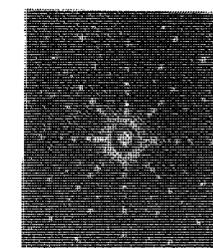


Diagrama de Laue con neutrones en NaCl

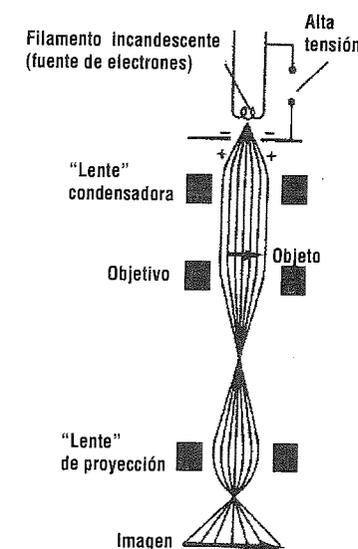


Espectro de difracción de rayos X de tipo Laue utilizando un cristal de diboruro de niobio y rayos X procedentes del molibdeno a 20-KV

Aplicaciones del carácter ondulatorio de los electrones

La primera fue su utilización para ampliar objetos con mucho mayor detalle que con el microscopio óptico ordinario. En efecto, la resolución de éste viene limitada por la longitud de onda de la radiación utilizada que, en el caso de la luz, es de 20 a 30 Å. Un haz de electrones, en cambio, puede obtenerse fácilmente con una longitud de onda $\lambda = 0,1$ Å, lo que multiplica por 100 o incluso por 1000 nuestra posibilidad de ampliación. Esto dio origen en la década de 1930 a los primeros microscopios electrónicos en los que las lentes de vidrio fueron sustituidas por lentes magnéticas.

También se utilizan electrones, neutrones, etc. para determinar la estructura de los cristales o incluso de moléculas importantes biológicamente, con las que es posible formar un cristal. Sin embargo, los electrones son poco penetrantes dado que interactúan mucho con la materia, por lo que se emplean para el estudio de superficies, cristales finos, etc.



A.19 Establecer la relación entre la energía de los electrones, neutrones, etc. y su longitud de onda. Idem para los fotones.

A.20 Estimar la energía que deben tener los fotones, electrones y neutrones para que puedan ser utilizados en el estudio de estructuras cristalinas.

A.21 Determinar la longitud de onda de un haz de electrones de 65 eV.

En resumen, hemos visto dos problemas característicos del desarrollo de la Física. El primero es típico de los orígenes de una disciplina: se trata de un efecto, el fotoeléctrico, que no puede ser explicado con los conocimientos previamente existentes (la Física clásica) y, por ello, exige nuevas hipótesis que lo explique. El segundo se presenta en un estado más desarrollado de la disciplina: los conocimientos (conceptos, experiencias, etc.) existentes permiten enunciar una hipótesis (la de De Broglie) que experiencias ulteriores confirmarán o no.

Ambos problemas nos llevan a una situación paradójica: en el primero, un fenómeno ondulatorio (la luz) manifiesta propiedades corpusculares; en el segundo, objetos inicialmente etiquetados como partículas, manifiestan un comportamiento ondulatorio.

Mostraremos a continuación los esfuerzos que realizaron los físicos de la época para solucionar esta doble paradoja. En particular, nos centraremos en la interpretación del comportamiento ondulatorio de los electrones aunque los razonamientos son extrapolables al comportamiento corpuscular de la luz.

A.22 ¿Cómo se puede interpretar el comportamiento ondulatorio de objetos como los electrones? ¿En qué pueden consistir dichas ondas?

Todos los intentos de reducir la complejidad onda/corpusculo a un único efecto fracasaron y necesitamos una nueva interpretación que, en palabras de R. Feynman, podemos expresar así:

“Newton pensaba que la luz estaba compuesta de partículas, pero luego se descubrió que ésta se comporta como una onda. Más tarde sin embargo (a principios del siglo xx) se descubrió que la luz algunas veces se comporta verdaderamente como una partícula. Históricamente, por ejemplo, se creía que el electrón se comportaba como una partícula pero luego se pensó que, en algunos aspectos, lo hacía como una onda. Pero, en realidad, éste no se comporta como ninguna de ellas. Renunciando, diremos: ‘No es como ninguna de las dos’.

Sin embargo podemos decir algo más: los electrones se comportan exactamente como la luz. El comportamiento cuántico de los objetos atómicos (electrones, protones, neutrones, fotones, etc.) es el mismo para todos ellos. Todos son ‘ondas de partículas’ o como se quieran llamar. De este modo, todo lo que sabemos de las propiedades de los electrones (...) se lo aplicaremos también a todas las ‘partículas’ incluyendo los fotones de luz”.

En resumen, los electrones o los fotones, por ejemplo, no son ni pequeñas bolas (partículas) ni pequeñas olas (ondas) y deben ser absolutamente concebidos como objetos de tipo nuevo, los cuantos.

Por tanto, un cuanto no es ni una partícula clásica ni un campo clásico, que sólo son modelos aproximados que describen el comportamiento de un gran número de cuantos.

En los siguientes apartados se desarrollarán algunas implicaciones de la hipótesis de De Broglie.

4. Relaciones de indeterminación de Heisenberg

La hipótesis de De Broglie, al establecer una relación entre el aspecto corpuscular y el ondulatorio para todos los objetos físicos, venía al mismo tiempo a invalidar las leyes clásicas de descripción del movimiento y exigía nuevos conceptos y nuevos principios, es decir, una nueva Mecánica, que incluyera la clásica como caso particular.

Como ya hemos visto, la Mecánica clásica permite, si conocemos la ecuación de movimiento $r = r(t)$ y el estado del sistema en un instante dado, es decir, las condiciones iniciales, determinar el estado en cualquier otro instante.

En ello reside la base del determinismo clásico, doctrina que afirma que si se conoce el estado presente de un sistema y su ley de fuerzas es posible predecir con exactitud el resultado de cualquier medida sobre el mismo.

A.23 Mostrar, a partir del carácter ondulatorio del electrón, que no es posible determinar simultáneamente su posición r y su cantidad de movimiento p en cualquier instante, es decir, su movimiento a lo largo de una trayectoria.

El razonamiento cualitativo anterior puede no dejar claro que el problema no es determinar con precisión la posición del electrón, dado que nada prohíbe un estado de movimiento para el que la posición se conoce con altísima precisión, sino la imposibilidad de determinar simultáneamente con precisión absoluta la posición x y la cantidad de movimiento p del electrón, señalando que los límites de dicha precisión vienen dados por las relaciones de indeterminación de Heisenberg:

$$\Delta x \Delta p > \frac{h}{2\pi}$$

siendo Δx y Δp las imprecisiones de la posición y la cantidad de movimiento.

Si el principio de incertidumbre establece límites a la precisión con que puede determinarse la posición y la velocidad de un objeto, cabe suponer que dicha imprecisión reaparecerá en la determinación de otras magnitudes cuyo producto tenga las mismas dimensiones que h , como por ejemplo, la energía y el tiempo.

Efectivamente, Heisenberg estableció también que:

$$\Delta E \Delta t > \frac{h}{2\pi}$$

donde Δt no es una imprecisión sino un intervalo característico de la evolución del sistema (por ejemplo, la vida media de un estado).

A continuación proponemos la aplicación de las relaciones de indeterminación al mundo de los objetos macroscópicos y microscópicos, lo que nos permitirá comprobar cómo en el primer caso no se introducen modificaciones prácticas con respecto a las predicciones de la Física clásica.

A.24 Considerar un grano de polvo (de 10^{-6} m de diámetro) que pese 10^{-6} kg y avance a una velocidad de $(1,00 \pm 0,01)$ m/s. ¿Cuál será la indeterminación en la posición? Determinar igualmente la imprecisión en la posición de un electrón (cuyo tamaño convencional se puede considerar 10^{-18} m) que avance con la misma velocidad. ¿Qué importancia tendrá dicha imprecisión respecto al tamaño de ambos? (Dato: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg).

En resumen, las implicaciones de las relaciones de indeterminación son:

- La imposibilidad del conocimiento simultáneo de la posición y de la cantidad de movimiento.
- Consecuentemente, el concepto de trayectoria deja de tener sentido.
- El establecimiento de los límites de validez de la Física clásica.

A.25 (Opc) Comentar las siguientes proposiciones señalando hasta qué punto pueden considerarse correctas o incorrectas:

1. La indeterminación puede considerarse fruto de la imprecisión de los instrumentos y técnicas de medida utilizados y sólo es subsanable en la medida en que dichos instrumentos y técnicas se perfeccionan.
2. La indeterminación es consecuencia del mismo proceso de medida que, como toda interacción, perturba aquello que se observa (así para ver a un electrón hay que iluminarlo y al hacerlo se le comunica energía alterando su estado y modificando su posición). Según ello la indeterminación aparece indisolublemente unida a la observación.
3. La indeterminación hace referencia a la propia naturaleza de la materia, que no se presenta en forma de objetos con contornos absolutamente definidos que siguen trayectorias perfectamente determinadas.

5. La función de ondas y su interpretación probabilista

La crítica radical de los conceptos clásicos que realiza la Mecánica cuántica, y de la que son expresión la ecuación de De Broglie o las relaciones de indeterminación de Heisenberg, exige consecuentemente una modificación radical del formalismo matemático utilizado para describir el estado de un sistema y su evolución temporal.

A.26 ¿Cómo podría describirse en Física clásica el estado de movimiento de una partícula? ¿Y el de una onda?

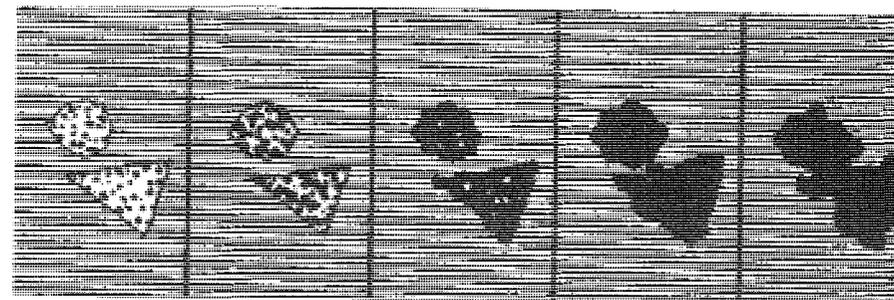
Pero como los fotones, los electrones, etc., no son ni simplemente ondas ni simplemente partículas, se necesita un modelo más general para describir su comportamiento. Para esto Schrödinger introdujo una función que denominó **función de ondas** o **función de estado**. Así como la ecuación de un movimiento se obtiene a partir de la ecuación de Newton, para obtener la función de estado desconocida, debe resolverse una ecuación, denominada **ecuación de Schrödinger**. En general, hay diversas funciones posibles correspondientes a distintos valores de la energía que son soluciones de esta ecuación.

Esta función planteó el problema de determinar su significado, que fue resuelto por Born en 1926, apoyándose en consideraciones análogas a las planteadas en las siguientes actividades.

A.27 Teniendo en cuenta que, como hemos visto en temas anteriores, la intensidad de una onda luminosa es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico y que según Einstein es proporcional al número de fotones por unidad de tiempo y de superficie, indicar qué significado podemos atribuirle a dicha amplitud.

A.28 Determinar el significado de la intensidad I que atraviesa un polarizador suponiendo que incide sobre él un único fotón.

A.29 La fotografía que se adjunta muestra cómo se van formando franjas de interferencia al aumentar el tiempo de exposición, es decir, al incrementar el número de fotones que contribuyen a su formación. ¿Cómo se puede interpretar esto?



Es conveniente insistir en la probabilidad (para cada partícula) por su importancia como nueva ley del comportamiento de la materia. Por otra parte, al plantearse en diversas situaciones se comprueba que la probabilidad no se limita sólo a la probabilidad de localización. También existen la probabilidad de encontrarse en un determinado estado de polarización, o de ser dispersado en un ángulo determinado, o la de emisión y absorción, etc.

Por analogía con la luz, Born pensó que $\Psi^2(r,t)$ es la probabilidad por unidad de volumen de encontrar al electrón en un elemento de volumen dV . Es conveniente recalcar la conexión de la interpretación probabilista con la dualidad y la indeterminación que, al impedir describir el estado del electrón en un instante determinado dando simultáneamente los valores de las coordenadas y las velocidades como en la Mecánica clásica, sólo permiten predecir las probabilidades de los distintos valores que pueden obtenerse al medir las coordenadas —o la magnitud de que se trate—.

Por último, señalar que si aplicamos la ecuación de Schrödinger a un sistema ligado, como un electrón en un átomo, se obtienen orbitales atómicos y sus correspondientes niveles energéticos.

A.30 ¿Qué es un orbital atómico?

Si aplicamos la ecuación de Schrödinger a un sistema ligado, como un electrón en un átomo aparece la discontinuidad en los valores posibles de la energía, encontrándose los mismos niveles energéticos que Bohr había calculado.

Pero estos niveles permitidos de energía surgen como consecuencia del carácter ondulatorio del electrón y no ligados a la supuesta existencia de órbitas electrónicas que carecen de sentido. En efecto, en vez de órbitas, la ecuación de ondas nos proporciona funciones de estado Ψ u orbitales atómicos, caracterizadas no por un número cuántico, como las órbitas de Bohr, sino por cuatro (n, l, m_l, m_s) que nos dan toda la información posible sobre el estado del sistema. Es decir, nos dan los valores de la energía E , del momento angular L , de las terceras componentes del momento angular L_z y del spin S_z del electrón en átomos hidrogenoideos. Además el cuadrado del módulo de Ψ nos proporciona la probabilidad de encontrar al electrón en una determinada zona del espacio. Es conveniente señalar que el espín es un momento angular intrínseco característico del electrón y otras partículas elementales, como la masa y la carga, pero sin análogo clásico.

En sistemas más complejos –átomos polieletrónicos, moléculas, etc., que se estudian en la Química– sólo es posible obtener soluciones aproximadas. Así, en los átomos polieletrónicos, la interacción entre electrones origina más niveles energéticos (subniveles), aunque las distribuciones de probabilidad de los orbitales atómicos tengan formas similares.

Asimismo, cuando se unen átomos para formar moléculas, la interacción de los electrones más externos, provoca la deslocalización de las distribuciones de probabilidad electrónica de los orbitales moleculares por toda la molécula y el desdoblamiento de los niveles atómicos para dar niveles moleculares. Esta deslocalización de los electrones más externos es la responsable de los enlaces.

6. Aplicaciones de la Física cuántica

A.31 Enumerar, en conexión con los diversos niveles de organización de la materia, los progresos científicos y tecnológicos fruto de la nueva Física.

Entre las aplicaciones ya hemos visto la célula fotoeléctrica, el maser y el láser, y el microscopio electrónico. En el siguiente tema estudiaremos la Física nuclear y sus implicaciones. Aquí abordaremos algunas aplicaciones técnicas e implicaciones sociales de la microelectrónica.

Cuadro 3

La electrónica y sus aplicaciones

El desarrollo de la electrónica como tecnología se inicia durante la Segunda Revolución Industrial, con la invención del diodo por Fleming en 1904 y del triodo por De Forest en 1906. La primera aplicación fue la radio hacia 1912. La televisión en blanco y negro comenzó hacia 1930 y pasados 10 años ya se había comercializado en los EE.UU. La televisión comercial en color se inició hacia 1950.

Pero el actual desarrollo de la electrónica se produce cuando la antigua electrónica de válvulas es reemplazada por la electrónica de estado sólido. Ambas se basan en el control del comportamiento de los electrones mediante campos eléctricos, primero en el vacío y actualmente en los semiconductores.

El comportamiento de los electrones en los semiconductores se explica por la teoría cuántica, mediante la denominada teoría de bandas. En efecto, al igual que sucede con las moléculas, cuando los átomos se unen para formar un sólido, la interacción de los electrones más externos provoca la deslocalización de las distribuciones de probabilidad electrónica por todo el cristal. Los niveles energéticos de dichos electrones, debido a sus interacciones, toman valores de energía que difieren muy poco entre sí, originando una serie de niveles prácticamente continuos (bandas). Entre dichas bandas existen zonas no permitidas energéticamente (bandas prohibidas).

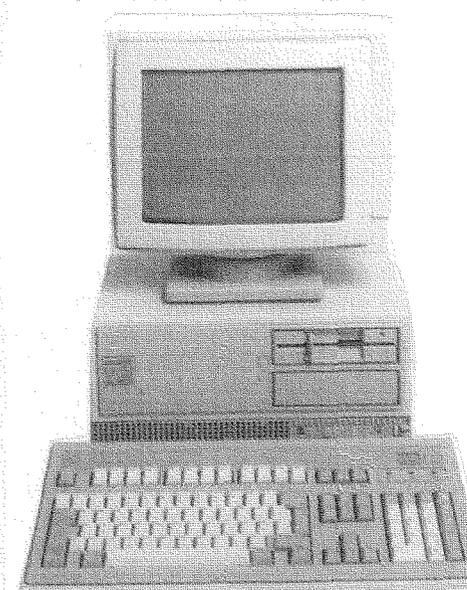
Aunque inicialmente la tecnología de válvulas era superior a la de semiconductores, el gran impulso socioeconómico de los militares estadounidenses a estos últimos, a partir del proyecto

de desarrollo del radar en la II Guerra Mundial, permitió el desarrollo de la microelectrónica. Ésta se inicia en 1947 con la invención del transistor de contacto por J. Bardeen, W. Brattain y W. Shockley, por el que recibieron el premio Nobel de Física en 1956.

Las ventajas de los transistores sobre las válvulas triodo residen en la miniaturización de los primeros y, en consecuencia, el aumento de velocidad y la disminución del consumo energético. Esto ha favorecido la extraordinaria difusión de la microelectrónica que se ha convertido en la tecnología básica de la actual revolución científico-tecnológica.

Otros descubrimientos importantes de la electrónica de semiconductores han sido la invención del **circuito integrado**, en 1958, por Kilby, que lo patentó en 1959 y, ese mismo año, Noyce realiza la misma patente, pero con la actual tecnología planar. En 1970 Ted Hoff y la empresa Intel desarrollan el primer microprocesador (chip).

Este desarrollo ha originado una serie de industrias electrónicas que pueden incluirse en uno o más de los siguientes grupos: componentes, comunicaciones, control (empleo de dispositivos electrónicos en el manejo y control de máquinas, base de la automática y la robótica) y ordenadores.



Los productos de la electrónica están presentes en todas las esferas sociales: en la industria, en la administración, en las viviendas (electrodomésticos, ordenadores personales), en el armamento, etc. Sus implicaciones en la vida de los hombres son múltiples: la productividad, la destrucción de empleo, la generación de nuevos empleos, el control de la intimidad de los individuos, etc.

- C.1 Profundizar, mediante artículos de prensa, bibliografía, etc. en las implicaciones de la microelectrónica en la tecnología actual.
- C.2 Valorar críticamente, sopesando ventajas e inconvenientes, su papel en la vida de las personas.

7. Recapitulación de la Física moderna

A título de revisión proponemos las siguientes actividades:

A.32 Establecer las diferencias más notables entre Física clásica y Física moderna.

A.33 Establecer los límites de validez de la Física clásica.

Cuadro 4

El desarrollo de la Física en Alemania

Los resultados acumulativos de todas las innovaciones científicas que se produjeron en la ciencia del siglo XIX (en Química, Electromagnetismo, etc.) dieron un empuje tan importante al desarrollo industrial que, a partir de 1870, podemos hablar de una Segunda Revolución Industrial. En este período se origina la extensión espacial del fenómeno industrial: EE.UU., Japón, Alemania, etc. El crecimiento continuado de la producción permite inundar los mercados europeos. Esta saturación de los mercados, unida a la creciente demanda de materias primas y a la necesidad de invertir capitales con mayores beneficios, provocó la expansión en África, Asia y Oceanía del imperialismo de los países desarrollados.

En estos países, especialmente en Alemania, se tiene el convencimiento de que las nuevas industrias dependen de la ciencia y la tecnología y, por ello, se potencia un sistema de educación científica y técnica; se vinculan las investigaciones científicas de los laboratorios universitarios con la industria que contribuye a su financiación; se crean los primeros laboratorios de investigación en las empresas (Siemens); el estado participa en la industria (instalación de ferrocarriles) y en la investigación (Instituto Imperial de Física y Tecnología, 1887; los Institutos Kaiser Wilhelm, a partir de 1912).

Con todo ello, hacia 1895 Alemania empieza a ocupar una posición de liderazgo científico e industrial. Como prueba de esta situación baste citar que la producción de acero en 1895 en Alemania era superior a la de Inglaterra y en 1900 era responsable del 90% de la producción mundial de tintes. Otra manifestación del liderazgo científico de Alemania es el hecho de que los principales creadores de las teorías relativista y cuántica –salvo Bohr (danés), De Broglie (francés) y Dirac (inglés)– son alemanes: Einstein, Planck, Sommerfeld, Schrödinger, Born, Heisenberg, Pauli, etc.

Cuando Hitler sube al poder en 1933, se inicia una política belicista, nacionalista y antisemita, promulgándose la ley de restauración de la carrera del funcionariado, según la cual “los funcionarios que no sean de linaje ario han de ser jubilados o pasar a la situación de excedencia”. Más de 500.000 personas tuvieron que exiliarse de Alemania, Austria y Checoslovaquia, entre ellos unos 2.500 científicos. Uno de los primeros en ser perseguido fue Einstein. Reunía alguna de las características que más odiaban los nazis: era judío, pacifista y progresista. Schrödinger, pese a su origen judío, podría haber conservado su cátedra en Berlín por ser católico, pero abandonó Alemania por su aversión al nazismo. Pasó a Austria, de donde tuvo que exiliarse al ser anexionada por Alemania en 1938. De los treinta y tres profesores de Física y Matemáticas de la Universidad de Gotinga, veintidos tuvieron que abandonar sus puestos, entre

ellos M. Born y J. Frank. Otros físicos exiliados fueron Debye, Hees, Stern, Bloch, Wigner, Bethe y Gabor –que alcanzarían el premio Nobel–, Heitler, London, Nordheim, Peierls, Teller, Szilard, Weisskopf, Baade, Minkowski, Schwarzschild, etc. Muchos de ellos colaboraron en los EE.UU. con el proyecto Manhattan (construcción y lanzamiento de las primeras bombas atómicas) y con el proyecto radar (localización de aviones o blancos con ondas de radio) y contribuyeron al gran desarrollo científico estadounidense tras la II Guerra Mundial.

Sin embargo, el nivel científico alemán era tan elevado que aún quedaron muy buenos profesionales en Alemania, como los Premios Nobel Lenard y Stark, miembros del partido nazi, que intentaron desarrollar una física aria (combatiendo las teorías de origen judío, como la relatividad) que sólo fueron apoyados por los nazis inicialmente. Cuando comenzó la guerra, el apoyo nazi se dirigió hacia los físicos que podían participar en el desarrollo armamentístico. En las bombas volantes colaboraron físicos como von Braun y en el proyecto de bomba atómica alemana, Heisenberg (que además presionó a Bohr para que colaborase con los alemanes, por lo cual éste huyó de su país, refugiándose en los EE.UU. en 1942, donde apoyó el proyecto nuclear norteamericano), Hahn (que descubrió con Strassman la fisión nuclear en 1938), Gerlach, von Weizsäcker, Wirtz, Harteck, etc. Aunque no llegaron a producir la bomba por falta de recursos económicos, consiguieron un reactor nuclear, producir agua pesada, separar los isótopos del uranio, etc. Por último, otros físicos como Planck, Sommerfeld, von Laue, etc., permanecieron al margen.

C.1 Analizar la situación de la ciencia en Alemania bajo el nazismo. ¿Qué efectos puede tener una dictadura sobre la ciencia? o dicho de otra forma, ¿favorece la democracia el desarrollo científico?

- 1 Explicar brevemente en qué consiste el efecto fotoeléctrico e indicar alguna aplicación práctica. (Selectividad. 1991)
- 2 Explicar qué es el trabajo de extracción de un electrón (o función trabajo) de un metal y cómo se puede medir. (Selectividad. 1989)
- 3 Una superficie de potasio se ilumina sucesivamente con dos haces de luz monocromática de $\lambda = 500 \text{ nm}$ y $\lambda = 700 \text{ nm}$. Razonar en qué caso se extraerán electrones. Datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, trabajo de extracción del potasio = $2,00 \text{ eV}$. (Selectividad. 1991)
- 4 Se ilumina una placa metálica con luz ultravioleta de cierta intensidad, observándose los electrones emitidos y midiéndose su energía cinética máxima. ¿Cómo variará esta energía si se duplica la intensidad de la luz? ¿Y si se duplica la frecuencia?
- 5 El trabajo de extracción de un electrón en el sodio metálico es de $3,68 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. La constante de Planck vale $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.
a) ¿Cuál será la mínima frecuencia que ha de poseer un haz de luz para que al iluminar con él una porción de sodio metálico se emitan electrones?
b) Si dicha porción se iluminara con luz de $7 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, ¿cuál sería la energía cinética máxima de los electrones emitidos? (Selectividad. 1992)
- 6 Indica qué razones existen desde el punto de vista de la Física cuántica en contra de las órbitas de Bohr. (Selectividad. 1988)
- 7 ¿Por qué los rayos ultravioletas (invisibles) al incidir sobre una pantalla fluorescente se transforman en azules y verdes? (Selectividad. 1995)
- 8 Explicar cualitativamente por qué el poder de resolución de un microscopio electrónico es mayor que el de un microscopio óptico. (Selectividad. 1990)
- 9 La distancia media entre protones y neutrones dentro del núcleo es de unos 10^{-15} m , por lo que para explorar el interior de los núcleos se han de utilizar sondas cuya longitud de onda de De Broglie sea al menos igual a esta distancia media. La constante de Planck vale $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.
a) ¿Qué cantidad de movimiento mínima ha de poseer una sonda para poder explorar el interior del núcleo?
b) Si como sonda se utilizan partículas α , cuya masa es de $6,64 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, ¿cuál debe ser la energía cinética mínima? (Selectividad. 1992)
- 10 Razonar la siguiente expresión: "La indeterminación de la cantidad de movimiento de una partícula debe ser siempre mayor que h , según el principio de indeterminación de Heisenberg". (Selectividad. 1994)

El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones de una superficie metálica cuando se ilumina con luz de una frecuencia (ν) superior a cierto valor (ν_0), característico de cada metal. Ante la imposibilidad de explicar el efecto fotoeléctrico a partir de la teoría clásica de la radiación, Einstein lo interpretó suponiendo que la luz, considerada como onda electromagnética, es una distribución de "paquetes de energía" o "cuantos" llamados posteriormente fotones cuya energía es proporcional a la frecuencia de la luz. La ecuación del efecto fotoeléctrico establece que

$$h\nu = h\nu_0 + E_c$$

siendo h la constante de Planck y E_c la energía cinética máxima de los electrones. El producto $h\nu_0$ se llama **trabajo de extracción** del metal.

Si se dirige un haz de ondas electromagnéticas de frecuencia elevada hacia un obstáculo, se observan ondas dispersadas con un frecuencia menor que la incidente y la aparición de electrones libres. Este fenómeno se conoce como **efecto Compton**.

Los **rayos X** son ondas electromagnéticas de frecuencia muy grande. Se producen al chocar un haz de electrones con un metal. Aparece un conjunto de ondas cuyas frecuencias son inferiores a un valor determinado por la energía cinética de los electrones.

El efecto fotoeléctrico y el Compton así como la producción de rayos X ponen de manifiesto el comportamiento corpuscular de la luz.

El **modelo atómico de Bohr** permite calcular el nivel energético o estado estacionario de los átomos hidrogenoides. Dicho nivel energético se caracteriza por la energía E y el momento angular L que están cuantizados. Si un electrón de un átomo pasa de un nivel de energía E_1 a otro de menor energía E_2 , se emite un fotón de frecuencia ν tal que

$$E_1 - E_2 = h\nu$$

De Broglie estableció que cualquier cuerpo posee un comportamiento ondulatorio además del comportamiento corpuscular. La longitud de onda λ de una partícula que tiene una cantidad de movimiento p es $\lambda = h/p$. Tanto la luz como las partículas se comportan ondulatoria y corpuscularmente en distintas experiencias y deben ser concebidos como objetos nuevos llamados cuantos.

Como consecuencia de lo anterior, no es posible determinar simultáneamente con precisión absoluta la posición (x) y la cantidad de movimiento de un cuerpo (p) o la energía (E) y un intervalo de tiempo (τ) de los sistemas cuánticos. Las **relaciones de indeterminación de Heisenberg** relacionan las incertidumbres de las magnitudes anteriores:

$$\Delta x \Delta p > h/2\pi$$

$$\Delta E \Delta t > h/2\pi$$

La **función de ondas** o **función de estado** describe el comportamiento de la materia de acuerdo con su naturaleza cuántica. Se obtiene como solución de la ecuación de **Schrödinger**.

ger. El cuadrado del módulo de la función de ondas representa la probabilidad por unidad de volumen de que una partícula se encuentre en dicho volumen.

Si se resuelve la ecuación de Schrödinger aplicada a un sistema ligado como el formado por un electrón en un átomo, se obtienen las funciones de estado u orbitales correspondientes, caracterizados por cuatro números cuánticos. Los orbitales especifican totalmente el estado del sistema dando la energía, el momento angular, la tercera componente del momento angular y el spin del electrón ligado al átomo.

La Física cuántica explica numerosos fenómenos, desde el mundo microscópico (partículas elementales, estructura del átomo, enlaces químicos, etc.) hasta la formación y evolución del Universo así como múltiples aplicaciones tecnológicas (láser, semiconductores y microelectrónica, superconductores, etc.).

Soluciones a los ejercicios propuestos

A.5. 0,22 fotones/m²s; 38,9·10²⁰ fotones/m²s.

A.7. a) 1,18·10⁻¹⁹ J.

A.9. a) 6,4·10⁻¹⁵ J; b) 9,7·10¹⁸ Hz; 3,02·10⁻¹¹ m.

A.13. a) 16,43·10⁻¹⁹ J.

A.17. a) 3,6·10⁻⁶³ m; b) 6,6·10⁻³² m; c) 1,2·10⁻⁹ m.

A.20. 10 keV; 100 eV; 0,08 eV.

A.21. 1,5·10⁻¹⁰ m.

A.24. 10⁻²⁵ m; 0,1 m.

Actividades complementarias

3. Si la longitud de onda es 500 nm.

5. 5,55·10¹⁴ Hz; 9,6·10⁻²⁰ J.

9. a) 6,63·10⁻¹⁹ kg m/s; b) 3,31·10⁻¹¹ J.

7. Física nuclear y de partículas

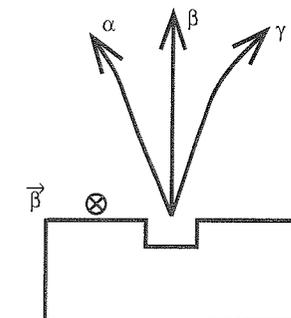
La Física nuclear y la Física de partículas, íntimamente ligadas, constituyen uno de los dominios más relevantes de la Física moderna. La creciente importancia de la energía nuclear; la existencia de instituciones internacionales como el CERN, con grandes presupuestos; la construcción de aceleradores de partículas y otros instrumentos cada vez más potentes son prueba indudable de ello.

Por otra parte, los hechos de este nuevo dominio resultan inexplicables por la Física clásica y harán ver, una vez más, la potencia explicativa de la Física relativista y cuántica. Desarrollaremos el tema de acuerdo con el siguiente hilo conductor:

1. Orígenes de la Física nuclear
2. Interacciones nucleares y energías de enlace
3. Radiactividad
 - 3.1. Modos de desintegración radiactiva
 - 3.2. Período y velocidad de desintegración (opc.)
 - 3.3. Utilización, efectos y dosis de la radiactividad
4. Reacciones nucleares. Fisión y fusión
5. Partículas elementales
 - 5.1. Partículas y antipartículas
 - 5.2. Las interacciones como intercambio de partículas
 - 5.3. Partículas e interacciones

1. Orígenes de la Física nuclear

Alrededor de 1900 había culminado el largo proceso que condujo al establecimiento de la estructura atómica de la materia, de la que el Sistema Periódico vino a ser en cierto modo la culminación. Incluso era conocido el tamaño de los átomos a partir de la teoría cinética: 10⁻¹⁰ m = 1 Å (Angstrom). Pero una serie de hechos –la existencia de electrones, los espectros atómicos, la radiactividad, etc.– ponían en cuestión la inmutabilidad de los átomos, postulada por Dalton. De todos ellos, nos centraremos en el estudio de la radiactividad, descubierta por Becquerel en 1896, cuyos trabajos fueron proseguidos por Pierre y Marie Curie. Se encontró que los átomos de los elementos más pesados emitían continuamente algún tipo de radiación, que se podía clasificar por su capacidad de penetrar la materia e ionizar el aire, hechos relacionados, respectivamente, con la masa y la carga. Para el análisis de la carga se recurre a campos, observándose, al penetrar el haz de radiación en un campo magnético B, desviaciones como las que muestra la figura.



A.1 ¿Qué puede decirse sobre la naturaleza eléctrica de las radiaciones en que queda dividido el haz incidente? ¿Y sobre su masa?

Si se iguala la expresión de la fuerza centrípeta con la de Lorentz para el campo magnético, $qvB = mv^2/r$, se obtiene una relación entre el radio de la trayectoria descrita r y la masa m , que permite determinar las masas de los rayos.

Se encontró, asimismo, que los rayos α apenas podían penetrar un trozo de papel y eran muy ionizantes, que los beta β podían atravesar hasta 3 mm de aluminio y eran menos ionizantes y, por último, que los gamma γ eran muy penetrantes, podían atravesar hasta varios centímetros de plomo, siendo su ionización muy pequeña. Pronto se vio que los tres tipos de radiación consistían en tipos conocidos de partículas: los rayos α son núcleos de He-4, los β son electrones y los γ , fotones de energía elevada (mayor que la de los rayos X).

Estos rápidos rayos proporcionaron el instrumento necesario para verificar el siguiente paso importante: comprobar el extraño interior del átomo. El estudio de la dispersión de partículas α por finas láminas de oro llevó a Rutherford en 1911 a la conocida idea de un átomo formado por un núcleo central (masivo y cargado positivamente), alrededor del cual se movían los electrones.

Una primera consecuencia importante de las experiencias de difusión fue que, mediante los resultados obtenidos, se pudo determinar la carga del núcleo de una serie de elementos y se constató que coincidía con el número de orden del elemento en el Sistema Periódico, o sea, con su número atómico Z . Una segunda consecuencia está relacionada con el tamaño del núcleo.

A.2 ¿Cómo puede determinarse aproximadamente el radio de un núcleo de oro bombardeado por partículas α de velocidad $2 \cdot 10^7$ m/s? Determinar la longitud de onda y la energía (en MeV) de la partícula α ($m = 6,6 \cdot 10^{-27}$ kg).

El modelo atómico en desarrollo planteó dos cuestiones: a) ¿cuál es la composición y estructura del núcleo?, b) ¿cómo están ordenados los electrones alrededor del núcleo? Ambas cuestiones ponen de manifiesto el carácter crucial de la experiencia de Rutherford ya que son el origen de las modernas teorías sobre la estructura atómica y nuclear. El descubrimiento de la radiactividad sugirió un primer modelo de núcleo, tomando las partículas α y β como elementos fundamentales.

A.3 Exponer razones contra este primer modelo nuclear. Proponer consecuentemente otro modelo.

Precisamente el hecho de que tanto la carga como la masa de cualquier isótopo fuera múltiplo de la del núcleo del hidrógeno 1 (H-1), llevó a un segundo modelo, según el cual cualquier núcleo estaría constituido por un cierto número de H-1 y de electrones. En 1920 se adoptó el nombre de protón para esta partícula. Según esto, el núcleo de helio 4 (He-4) está constituido por dos protones y dos pares electrón-protón, a los que en 1920 se denominó neutrones.

A.4 Estimar, a partir del principio de indeterminación, la energía cinética mínima de un electrón confinado en un núcleo.

A.5 Indicar toda la información contenida en N-14 y O-16.

A.6 Explicar la existencia de nuevos elementos con propiedades químicas idénticas a las de los elementos ya conocidos, aunque difieran en propiedades físicas.

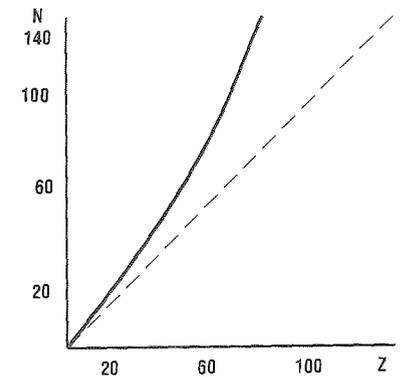
A.7 El antimonio natural, de masa 121,8 u (unidades atómicas de masa, cuyo valor es $1,66 \cdot 10^{-27}$ kg) es una mezcla de isótopos de masas atómicas 121 u y 123 u. Calcular la proporción en que se encuentran.

2. Interacciones nucleares y energías de enlace

Con el establecimiento de la composición nuclear a base de protones y neutrones, queda planteado como problema más urgente la interpretación de la estabilidad nuclear, dado que los protones se repelen entre sí por interacción electromagnética. Se hace necesario introducir una nueva interacción entre los protones y los neutrones.

A.8 ¿Qué características (intensidad, alcance) debe tener la interacción entre protones y neutrones?

Si se representa el número de neutrones N en función del número atómico Z para núcleos estables se obtiene la siguiente figura



A.9 Justificar la forma de la gráfica anterior, teniendo en cuenta las interacciones puestas en juego.

Aún no se ha podido lograr una descripción matemática precisa de la interacción nuclear fuerte, pero su gran intensidad confiere al núcleo una gran estabilidad que podemos medir.

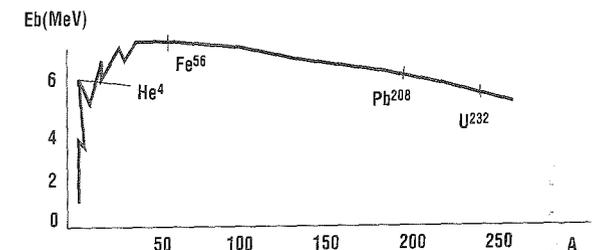
A.10 Comparar la masa isotópica del deuterio H-2 (2,01410 u) con las del H-1 (1,00783 u) y neutrón (1,00867 u) que lo constituyen. Justificar el resultado.

A.11 Calcular el valor en MeV de una unidad de masa atómica y utilizarlo para determinar la energía de enlace del O-16 (15,99491 u)

La comparación de la estabilidad de los distintos núcleos puede hacerse atendiendo a la energía de enlace E_b . Es evidente que esta energía será más elevada cuantos más nucleones contenga el isótopo considerado. Por ello se establece el concepto de energía de enlace por nucleón E_b/A siendo A el número másico (número de nucleones).

A.12 Las masas atómicas del C-12 y C-13 son respectivamente 12,00000 y 13,00335 u. Determinar cuál es más estable.

A.13 Si se representa la energía de enlace por nucleón para los isótopos naturales en función del número másico ($E_b/A = f(A)$) se obtiene la siguiente curva. Señalar cuáles son los aspectos más significativos que se aprecian en la misma.



3. Radiactividad

3.1. Modos de desintegración radiactiva

En el apartado 1 hemos estudiado el descubrimiento de la radiactividad y la clasificación de los rayos en tres tipos distintos. Vamos a estudiar, a continuación, más detalladamente la radiactividad alfa.

A.14 Emitir una hipótesis acerca de las transformaciones que experimentará el núcleo de un átomo cuando se emite una partícula α . Aplicarla a la desintegración del Ra-226.

A.15 ¿Qué relación debe existir entre la masa del núcleo padre y la de las partículas resultantes para que se produzca la desintegración? En conexión con esto, ¿por qué los núcleos emiten partículas α y no cuatro nucleones?

A.16 Calcular la energía cinética de la partícula α emitida cuando se desintegra el U-232 (232,0372 u) en Th-228 (228,0287 u).

A continuación, estudiaremos la radiactividad beta.

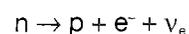
A.17 Emitir una hipótesis de las transformaciones que experimenta el núcleo de un átomo cuando emite una partícula β . Aplicarla a la desintegración del C-14.

Hemos visto como el principio de indeterminación impide la existencia de electrones en el interior del núcleo. La radiactividad β tiene su origen en un electrón que se crea dentro del núcleo, al convertirse un neutrón en protón emitiendo un electrón $n \rightarrow p + e^-$.

A.18 ¿Qué energía cinética podríamos esperar que tuviera el electrón emitido en la desintegración beta del C-14? (C-14 14,00324 u; N-14 14,00307 u).

En la actividad anterior se ha puesto de manifiesto que el electrón emitido en la desintegración beta cabe esperar que tenga una energía de 0,16 MeV. Pero, de hecho, la energía de los electrones puede tomar cualquier valor entre 0 y 0,16 MeV. Parece que se viole la conservación de la energía. Asimismo se puso de manifiesto que la cantidad de movimiento y el momento angular tampoco se conservaban. ¿Qué otra solución alternativa se puede proponer?

Existen dos posibles soluciones. Bohr supuso que la energía no se conserva en los procesos microscópicos, aunque macroscópicamente sí se conserva. Ante la perspectiva de tener que abandonar estos principios tan bien fundamentados, los físicos optaron por otra solución. En 1930 Pauli supuso que durante la desintegración β , se emitía además del electrón una nueva partícula muy difícil de detectar, a la que Fermi dio posteriormente el nombre de **neutrino**, cumpliéndose



Para explicar la inestabilidad del neutrón (y de otras partículas) Fermi tuvo que postular la existencia de una cuarta interacción fundamental en la naturaleza, a la que denominó débil (dado que su intensidad era menor que la correspondiente a las interacciones nuclear y electromagnética), responsable de dichas interacciones. Por otra parte, para que se conserve el número de leptones, la partícula emitida es un antineutrino, como veremos en el apartado de partículas.

Por último, abordaremos la radiactividad gamma.

A.19 Teniendo en cuenta que la emisión de rayos gamma de un núcleo es muy parecida a la emisión de fotones por átomos excitados, proponer una hipótesis de las transformaciones que experimenta un núcleo al emitir fotones.

3.2. Período y velocidad de desintegración (opc.)

En una muestra de isótopos radiactivos no podemos predecir cuándo se desintegrará un núcleo dado. Es un ejemplo más del carácter probabilístico de los fenómenos cuánticos. Sólo podemos determinar la probabilidad por unidad de tiempo de que se desintegre un núcleo cualquiera.

Por otra parte, las sustancias radiactivas se desintegran de forma que, después de transcurrido un tiempo llamado período de semidesintegración, sólo quedan sin desintegrar la mitad de los núcleos. Al cabo de otro período, quedan la mitad de las anteriores y así sucesivamente.

A.20 Teniendo en cuenta lo anterior, calcular el número de núcleos de una sustancia radiactiva que quedarán sin desintegrar cuando hayan transcurrido 60 años. El período de semidesintegración es 10 años y el número inicial de núcleos, $64 \cdot 10^{40}$. Realizar la representación gráfica del número de núcleos sin desintegrar en función del tiempo. Extraer conclusiones.

La curva anterior muestra un decrecimiento exponencial cuya ecuación es $N = N_0 e^{-\lambda t}$ donde N_0 es el número inicial de núcleos y λ es una constante, llamada **constante radiactiva**, relacionada con el período de semidesintegración. Para deducir dicha ecuación se puede suponer que el número de átomos que se desintegran, dN , será tanto mayor cuanto mayor sea el número de átomos presentes N y el intervalo de tiempo dt , o sea, $-dN = \lambda N dt$, donde λ es la constante radiactiva, diferente para isótopos diferentes. Dicho de otro modo, la velocidad de desintegración o actividad, $-dN/dt$, es mayor cuanto mayor sea λ (es decir, más radiactivo el isótopo) y el número de isótopos presentes. La actividad se mide en desintegraciones por segundo (becquerelios, Bq) o en curios (Ci), que corresponde a $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq. Para resolver la ecuación se separan variables $dN/N = -\lambda dt$ e integrando se obtiene $\ln(N/N_0) = -\lambda t$, y de aquí, $N = N_0 e^{-\lambda t}$, donde N_0 es el número inicial de núcleos.

Una de las implicaciones de la variación exponencial de N es que no se puede dar ningún valor finito para el tiempo t que tardaría en desaparecer toda la muestra radiactiva. Por ello, hay que recurrir, como en la actividad anterior, al tiempo en que se desintegre una fracción dada de la misma.

A.21 Determinar la relación entre el período de semidesintegración y la constante radiactiva.

Cuanto mayor sea el período de un átomo, más despacio se desintegra y, por tanto, menor será λ . Los isótopos muy activos (λ grande) tienen períodos de semidesintegración muy cortos. Pueden tomar valores comprendidos entre 10^{-22} s y 10^{28} s (unos 10^{21} años).

A.22 Uno de los productos de fisión que se encuentra en el polvo radiactivo procedente de la explosión de una bomba atómica es el estroncio 90 (Sr-90). Una muestra pura de Sr-90 proporciona una actividad de 1000 desint/min. Si la actividad de la muestra después de un año es de 975,2 desint/min ¿cuál es el período de Sr-90?

A.23 Una muestra de carbón de madera procedente de un tronco de ciprés de la tumba de un rey egipcio tiene una relación C-14/C-12, que es el 54,2% de la que presenta el carbón actual. Determinar aproximadamente cuándo se cortó el ciprés.

3.3. Utilización, efectos y dosis de la radiactividad

Los radioisótopos han permitido grandes avances en una serie de dominios: la medicina y la biología, arqueología, geología, metalurgia y construcción, análisis e investigación química, agricultura, etc. Las aplicaciones de los radioisótopos en dichos campos se pueden dividir en tres categorías:

- Como fuentes de radiación (igual que los rayos X). Se utiliza en medicina, para tratar enfermedades como el cáncer (radioterapia); en agricultura, para esterilizar alimentos, combatir plagas, crear nuevas variedades de trigo (producir cambios genéticos), etc.; en química, para activar reacciones, etc.
- La acción de la materia sobre las radiaciones (absorción, dispersión) nos da información sobre la propia materia. En industria y construcción se utiliza para determinar estructuras internas de metales u hormigones (gammagrafía); en diagnosis médicas, etc.
- Como trazadores, categoría de utilización más extendida. En medicina y biología, el seguimiento de los flujos de elementos químicos en el organismo, las anomalías en el funcionamiento de algún órgano, etc.; en análisis de reacciones químicas, para seguir el curso de un proceso, indicando los compuestos que se van formando; en el transporte de fluidos (oleoductos, etc.), detección de fugas, etc.; en análisis hidrológicos (conexiones de corrientes subterráneas); estudios geológicos (movimiento de terrenos); estudio de la edad de restos vegetales y animales fosilizados o técnica del carbono 14 como se puede ver en la actividad A.23.

Entre los efectos que produce la radiación a su paso por la materia cabe citar los siguientes:

Las partículas cargadas pueden ionizar los átomos o moléculas de cualquier material que atraviesan. Dado que sus energías son del orden del MeV, en tanto que las energías de ionización son del orden del eV, una sola partícula puede producir miles de ionizaciones.

Los rayos X y gamma pueden ionizar átomos arrancándoles electrones por efecto fotoeléctrico y Compton, o si tiene energía suficiente originar producción de pares, proceso que estudiaremos en el apartado 5.

Los neutrones interactúan con la materia principalmente por colisión de los núcleos. A menudo se rompe el núcleo a causa de dicha colisión, lo que altera la molécula de que formaba parte y los fragmentos producidos pueden originar ionizaciones.

Por todo ello, la radiación cuando atraviesa la materia puede ocasionar daños considerables. En los metales y otros materiales estructurales se puede debilitar su resistencia (centrales nucleares, vehículos espaciales).

A continuación se estudiarán los efectos en los organismos biológicos. Las causas de contaminación radiactiva son el paso de radiación por la materia y la asimilación de radioisótopos mediante la alimentación, respiración, etc., que al instalarse en el organismo se constituyen en focos de radiación internos. El daño en los organismos biológicos se debe principalmente a la ionización producida en las células: producción de iones o radicales que interfieren en las reacciones químicas normales de la célula; ruptura de enlaces en moléculas o alteración de su estructura de manera que no se realice su función normal; se puede alterar el ADN, etc. En resumen, puede producir la muerte de las células o que sobrevivan y sean defectuosas, pudiendo producir el cáncer.

Los daños en organismos biológicos pueden ser somáticos y genéticos. Los primeros se producen

en cualquier parte del cuerpo, causando cáncer, radiopatías (náuseas, fatigas, pérdida de pelo, etc.) o incluso la muerte. Los genéticos perjudican el aparato reproductor y, por tanto, afecta a la descendencia del individuo (posibilidad de mutaciones).

A 24 Profundizar mediante bibliografía, recortes de prensa, etc., en los tiempos de aplicación y efectos de la radiactividad.

Cuadro 1
Dosis de radiactividad

La dosis de radiactividad es la cantidad de energía que se absorbe por unidad de masa sometida a radiación. En el Sistema Internacional se mide en gray que corresponde a 1 J/kg. Un submúltiplo es el rad, que corresponde a 10^{-2} J/kg.

Sin embargo, esta unidad no es la más significativa para medir el daño biológico causado por la radiación. Para ello se define la dosis equivalente que es el producto de la dosis absorbida por la eficacia biológica relativa (EBR). La EBR es el número de rad de radiación X de 250 kV que produce el mismo daño biológico que 1 rad de la radiación dada. La unidad es el rem, que se define $1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \times \text{EBR}$.

Según esta definición, un rem de un tipo cualquiera de radiación produce la misma magnitud de daño biológico. Pero 50 rem de neutrones rápidos son sólo 5 rad, mientras que 50 rem de rayos X son 50 rad, porque su EBR es, respectivamente, de 10 y 1.

Algunas legislaciones especifican el límite superior de radiación permisible para un individuo fijándolo en 0,5 rem. No obstante, como se cree que dosis aún más bajas aumentan los peligros de cáncer o de defectos genéticos, lo recomendable es mantener la dosis de radiación lo más baja posible. Dosis mayores pueden enrojecer la piel, reducir el número de glóbulos blancos y producir náuseas, fatiga y pérdida de vello. Una dosis de 400 rem durante un tiempo no muy grande es fatal en el 50% de los casos.

Hay tablas que permiten determinar las dosis de radiación anual a las que estamos expuestos.

Fuentes de radiación	Total anual (mrem)
Radiación cósmica a nivel del mar	40
cada 30 m de altitud	1
Material de la casa	
madera	35
hormigón	45
ladrillo	45
piedra	50
Terreno	15
Agua, alimentos y aire	25
Viajes en avión (1500 km)	1
TV en color (1 hora diaria)	1
Rayos X	
pecho	100
aparato gastrointestinal	2000
dentición	20
Vivir en las proximidades de una central nuclear	
al lado mismo	0,2 (*)
a 5 km	0,02 (*)
a 9 km	0,002 (*)

(*) La dosis anual se calcula multiplicando el factor indicado por el número de horas diarias de exposición.

C.1 Utilizando la tabla, determina la dosis de radiación a la que estás expuesto.

4. Reacciones nucleares. Fisión y fusión

Se dice que se produce una reacción nuclear cuando un núcleo se ve alcanzado por otro o por una partícula más simple.

A.25 Señalar las leyes de conservación que se cumplen en una reacción nuclear. Aplicarlas para escribir las siguientes reacciones: la transmutación del N-14 al bombardearlo con He-4, en la que Rutherford observó la emisión de protones en 1919; el bombardeo de Be-9 con He-4, que condujo a Chadwick al descubrimiento del neutrón en 1932.

A.26 ¿Tendrá lugar la reacción $^{13}\text{C}(p,n)^{13}\text{N}$ cuando la energía de los protones incidentes sea 2,0 MeV?

De hecho, incluso aunque la partícula incidente tenga energía suficiente, hay que tener en cuenta que para provocar dicha reacción, es preciso acelerar haces de protones en número muy superior a los que llegan a colisionar, con lo que en realidad se consume más energía que se libera en una transmutación nuclear. Para que la energía liberada en una reacción nuclear pueda aprovecharse es necesario que una vez iniciada pueda automantenerse, como ocurre p.ej. en una reacción química exotérmica.

Fisión y fusión

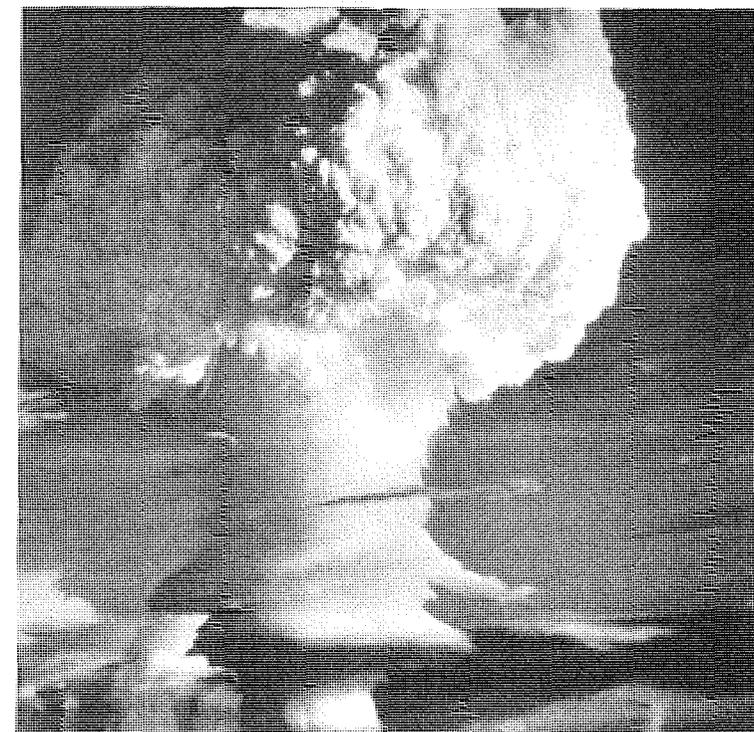
La curva de energía de enlace por nucleón E_b/A permite comprender las reacciones que producen más energía que consumen.

La primera de ellas es la fisión, descubierta por Hans y Strassman en 1938. Se sabe que los isótopos más estables son los de masas atómicas próximas al nucleido Fe-56. Por ello, los elementos pesados como el U-235, el Pu-239, etc., sometidos a bombardeo de neutrones, que no son repelidos por el núcleo al carecer de carga, se pueden romper en dos o más núcleos de masa intermedia. La E_b/A de estos es de unos 8,5 MeV/nucleón y la del U-235, menos estable, es de 7,6 MeV/nucleón. Se libera una energía de 0,9 MeV/nucleón y como en el U hay 235 nucleones tendremos unos 200 MeV por fisión. En la fisión se emiten dos o tres nuevos neutrones, los cuales pueden colisionar con otros átomos de uranio. Así se origina la reacción en cadena.

Para que se produzca ésta es necesario resolver el problema de la escasez (0,7%) del isótopo U-235 en el uranio natural. Por eso hay que enriquecerlo mediante complejos procesos de difusión o ultracentrifugación. Además, la probabilidad de que el núcleo de U-235 absorba un neutrón es elevada para neutrones lentos. Los que se producen en la fisión son rápidos y hay que utilizar una sustancia, denominada moderador (agua pesada, grafito, etc.) para que los frena. Por último, si la masa de uranio es pequeña, la mayoría de los neutrones escapan antes de que puedan originar otra fisión. Se necesita una cantidad de materia superior a una masa denominada "crítica" para que la reacción se automantenga. Para la producción de bombas atómicas en 1945 fue necesario emplear dos masas subcríticas durante el transporte, que se unían dando una masa superior a la crítica en el momento de la detonación.

El primer reactor nuclear se contruyó en 1942 bajo la dirección de Fermi. Para producir energía en dichos reactores es necesario controlar la reacción. Para ello se utilizan barras de control que absorben neutrones y mantienen su producción muy próxima a un neutrón por fisión.

Un inconveniente importante lo constituye el hecho de que la fisión produce gran cantidad de residuos radiactivos, algunos de ellos con un período extraordinariamente largo.



Otra forma de liberar energía en gran escala mediante procesos nucleares está basada en el crecimiento de la estabilidad de los isótopos ligeros al aumentar el número másico A. Consiste en aproximar dos núcleos ligeros (hidrógeno, deuterio, tritio) lo suficientemente cerca para que la fuerza nuclear supere la electromagnética y se forme un núcleo más pesado. Este proceso se conoce como fusión nuclear y proporciona cantidades de energía muy superiores a las de fisión, aunque encierra mayores dificultades técnicas que ésta, puesto que hay que comunicar a los núcleos iniciales suficiente energía cinética (suficiente temperatura) para que se aproximen venciendo las elevadas fuerzas repulsivas. Como la temperatura que produce una bomba atómica es de 10^8 K se pensó en utilizarla como detonante de las bombas H o termo-nucleares, ensayadas por primera vez en 1951-52. En la Tierra sólo se ha conseguido la liberación de energía de forma incontrolada. Existen dificultades para la producción controlada de energía, entre ellas la de contener el plasma (conjunto de átomos ionizados y electrones) a la alta temperatura que se necesita. El método más empleado es el confinamiento magnético: la utilización de campos magnéticos para contener el plasma. La fusión nuclear produce más energía por nucleón que la fisión y no crea cenizas radiactivas. El deuterio, que se utiliza como materia prima, se encuentran de forma abundante en el agua del mar.

A.27 ¿Cuál es la energía liberada en las siguientes reacciones?:

- $n + ^{235}\text{U} \rightarrow ^{88}\text{Sr} + ^{136}\text{Xe} + 12n$
- $^3\text{H} + ^2\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + n$

A.28 ¿Qué proceso puede explicar la enorme cantidad de energía radiada por las estrellas?

Cuadro 2

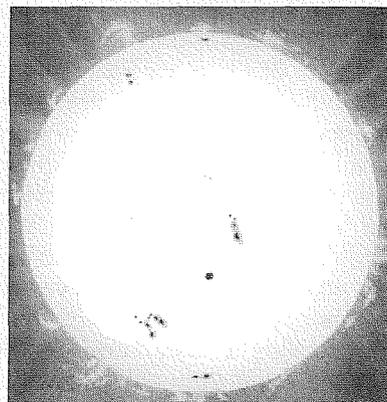
Evolución de las estrellas

El origen de las estrellas se encuentra en la agregación, producida por la fuerza de gravitación, de núcleos de hidrógeno y helio que forman el gas estelar. A medida que dicha fuerza atrae a los núcleos, se juntan y se produce un calentamiento del gas. Cuando la temperatura es del orden de 10 a 20 millones de grados, los núcleos de hidrógeno sufren un proceso de fusión nuclear y se origina helio. Mientras la estrella se encuentra en esta fase se dice que evoluciona siguiendo la secuencia principal. En el caso de una estrella del tamaño del Sol dicho período tiene una duración aproximada de diez mil millones de años.

La fusión del hidrógeno tiene como consecuencia un aumento de la concentración de helio en el núcleo de la estrella y una disminución de los núcleos de hidrógeno. Al incrementarse la proporción de átomos más pesados, el núcleo de la estrella se hace más denso, se contrae y se calienta más. El aumento de temperatura permite el desarrollo de reacciones nucleares del helio que tienen como resultado la formación de elementos más pesados (carbono y oxígeno). El calor producido en estas nuevas reacciones de fusión hace que la estrella aumente su tamaño y se enfríe. Se ha convertido en una gigante roja.

Las fases siguientes de la evolución estelar vienen determinadas por la masa de la estrella. Los cuerpos de masa inferior a 1,5 veces la del Sol se convierten en enanas blancas. Después de agotado el helio, se realizan reacciones de fusión dando como resultado núcleos cada vez más pesados. Cuando se obtiene hierro, las fusiones nucleares terminan porque las reacciones necesitarían energía para producirse. Como consecuencia la estrella se colapsa por las fuerzas gravitatorias dando lugar a un cuerpo de una densidad muy grande. La energía emitida disminuye con el tiempo y la estrella se transforma en un cuerpo oscuro y frío llamado enana negra.

Si la masa de la estrella está comprendida entre 1,5 y 3 veces la masa del Sol, el colapso gravitatorio hace que los electrones caigan al núcleo y reaccionen con los protones que se encuentran en él. De esta manera se forman neutrones y neutrinos. La estrella se transforma en una estrella de neutrones. Una variedad de estas estrellas la constituyen los pulsares que emiten ondas de radio de forma periódica como consecuencia de su movimiento de rotación. La materia exterior de la estrella de neutrones es expulsada violentamente por la onda expansiva creada en el núcleo. En este caso se dice que ha tenido lugar la explosión de una supernova. En Europa se han observado explosiones de ese tipo en 1572, 1604 y 1987. La variedad descrita pertenece a la clase denominada supernova tipo II.

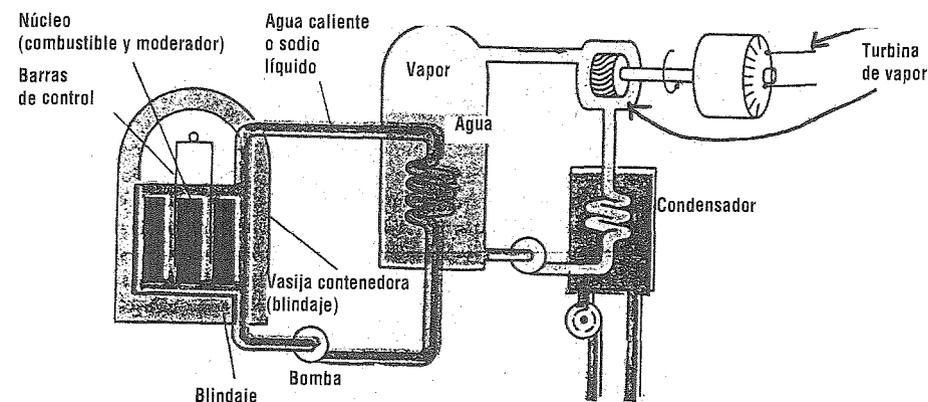


El sistema formado por dos estrellas se llama estrella binaria. Si una de ellas es una enana blanca, puede pasar materia de la mayor a la enana produciendo una violenta explosión de esta última. En este caso se dice que se trata de una supernova tipo I. Las dos variedades de supernovas presentan características diferentes: en las longitudes de onda comprendidas entre 6.000 y 7.000 amstrongs del espectro de las supernovas tipo II aparece un pico, llamado H-alfa.

Cuando la masa de la estrella es superior a 3 veces la masa del Sol, la contracción gravitatoria del núcleo resulta tan grande que ni los neutrones pueden soportar el colapso. Este hecho da lugar a un cuerpo llamado agujero negro. Debido al elevado valor del campo gravitatorio, dentro del radio de Schwarzschild, nada puede escapar a su acción ni siquiera un rayo de luz.

A.29 Indicar cuáles son los efectos de las explosiones nucleares. Compararlos con los que se produjeron en los tristemente famosos accidentes de Three Mille Island (1979) y de Chernobil (1986).

A.30 Estudiar el esquema de funcionamiento de una central nuclear. Visitar la central nuclear más próxima al centro de estudios.



A.31 ¿Qué razones han motivado la creciente oposición a la construcción de nuevas centrales nucleares, obligando a países como Suecia, Suiza y Austria a llevar a cabo consultas populares sobre el tema? Realizar un estudio de las ventajas e inconvenientes de las centrales nucleares frente a otras fuentes de energía.

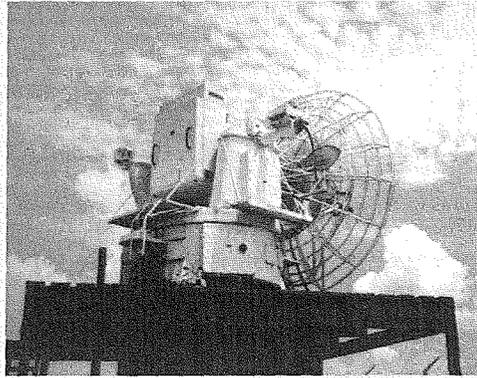
Cuadro 3

Los proyectos Manhattan y Radar, y la revolución científico-tecnológica

En la II Guerra Mundial era evidente para todos los estados implicados, que la ciencia iba a desempeñar un papel decisivo. Se plantearon grandes proyectos para crear la bomba atómica (el estadounidense, denominado proyecto Manhattan, y el alemán). Otros proyectos fueron el del radar, la producción de penicilina, el desarrollo de cohetes (las bombas volantes alemanas), los computadores electrónicos, etc.

El proyecto estadounidense Manhattan culminó con la construcción y el lanzamiento de las primeras bombas atómicas en Hiroshima y Nagasaki en 1945. En el proyecto Manhattan se invirtieron 2191 millones de dólares y participaron físicos de la talla de Bethe, Teller, Wigner, Peierls, Szilard, Weisskopf, Franck (alemanes); Fermi, Segré (italianos); Bohr (danés); Oppenheimer (director científico) Feynman, Lawrence, Compton, Seaborg, Urey, Álvarez y Wheeler (estadounidenses).

El proyecto radar tenía como objetivo la localización de aviones o blancos de bombardeo por medio de ondas de radio. En el marco de dicho proyecto se realizó la investigación en semiconductores que dio impulso a la microelectrónica de la posguerra. En el proyecto radar se gastaron alrededor de 2500 millones. Entre los físicos que trabajaron en el RadLab (algunos compartiendo su tiempo con el laboratorio de Los Álamos) figuran Condon, Rabi, Morse, Slater, Álvarez, Bethe, Schwinger, etc.



Estos proyectos supusieron la aplicación sistemática de la ciencia y la tecnología a la guerra, estableciendo contactos entre política, ejército, industria y ciencia en una medida desconocida hasta entonces y obligando a una gran organización de la investigación. Estos proyectos produjeron grandes incrementos en los presupuestos de I+D y fueron el fundamento de una serie de desarrollos científicos y tecnológicos que están en la base de la denominada revolución científico-tecnológica. Entre ellos cabe mencionar la microelectrónica y el láser (vistas en el tema anterior) y las tecnologías nuclear y aeroespacial, que veremos a continuación.

La tecnología nuclear se inicia con el desarrollo de la bomba atómica por EE.UU. en 1945. Cuando los soviéticos hicieron explotar su propia bomba en 1949 científicos como Teller y Lawrence influyen en el gobierno, apoyando la idea de producir una bomba más poderosa, la de hidrógeno. Truman autorizó en 1950 un nuevo programa de investigación para desarrollar la bomba H, conseguida en 1952. Se inicia una carrera de armamentos que lleva a los soviéticos a producir su bomba H en 1953 y a los ingleses la atómica en 1952 y la de hidrógeno en 1957.

En cuanto a los primeros reactores, su finalidad básica era la producción de material fisionable. Mencionaremos los estadounidenses de Oak Ridge (1943) y Hanford (1944) y el anglo-francés de Chalk River (Canadá) de 1947. En 1955 entró en servicio el primero de una serie de submarinos de propulsión nuclear, el Nautilus. Hasta 1956 no se pone en marcha la primera central nuclear productora de electricidad en Calder Hall (Gran Bretaña) y en 1957 la de Shippingport (EE.UU.). Además, las investigaciones en física de altas energías (física nuclear, partículas elementales) se vio favorecida por los programas encaminados a la construcción de la superbomba.

La tecnología aeroespacial estuvo muy vinculada con la nuclear porque permitió desarrollar los cohetes portadores de las bombas H. Tras los desarrollos pioneros, en la década de los 20, de Tsiolkovski (URSS), Goddard (EE.UU.) y Oberth (Alemania), el primer hito importante lo constituyen las instalaciones de Peenemunde, dirigidas desde 1937 por Von Braun. En dichas instalaciones se desarrolló en 1942 el cohete V-2, utilizado masivamente contra el sur de Inglaterra en 1944. Los soviéticos desarrollaron un misil balístico intercontinental (ICBM), el T-3, de 8000 km de alcance, probado con éxito en 1957, semanas antes del lanzamiento del satélite Sputnik. Esto produjo una conmoción en los EE.UU. la cual dio lugar al comienzo de la carrera espacial, una intensificación en la investigación (la miniaturización electrónica formó parte de estos esfuerzos) y en la enseñanza de las ciencias. En 1958 aparece el Thor estadounidense con un alcance de 1900 km, se lanza el satélite Explorer y en 1959 el Atlas D con unas características similares al T-3. Al poner los soviéticos en órbita alrededor de la Tierra a Gagarin, el presidente Kennedy aprueba el programa Apollo. En dicho programa desempeñó un papel fundamental Von Braun, y culminó en 1969 con el primer alunizaje.

Una serie de científicos importantes denuncian los peligros de la proliferación nuclear y señalan que esas armas amenazan la existencia de la humanidad. Este movimiento se inicia con la oposición de algunos científicos como Einstein, Bohr y Szilard a la utilización de la bomba atómica

y la de Oppenheimer (director del proyecto Manhattan) a la bomba H. Por ello la Atomic Energy Commission lo humilló públicamente, declarándole un riesgo para la seguridad nacional.

Prosigue con el manifiesto de A. Einstein y B. Russell de 1955, apoyado por L. Pauling, M. Born, P. Bridgman, etc.; el manifiesto del grupo de Göttinga de 1958 promovido por Born; las conferencias Pugwabs convocadas por iniciativa de Russell y Rotblat a partir de 1958; etc. Tras 37 años de existencia de las conferencias, Rotblat ha recibido el Premio Nobel de la Paz de 1995.

Pero muchos científicos no tuvieron demasiados prejuicios en investigar en armamentos u otros temas de defensa en los que las naciones pusieron dinero y prestigio.

- C.1 Valora la contribución de la revolución científico-tecnológica a la sociedad contemporánea.
- C.2 De las tecnologías nucleares (bombas, misiles, etc.) Born decía que eran "un triunfo de la inteligencia y un fracaso de la razón". ¿Consideras válida esta afirmación?

5. Partículas elementales

Hacia 1930 no se consideraba que los constituyentes básicos del Universo fueran los átomos sino el electrón, protón, fotón y neutrón. Pero el estudio durante los años 30 y 40 de los rayos cósmicos procedentes del espacio exterior (mediante detectores como emulsiones fotográficas, cámaras de niebla, etc.) puso de manifiesto la existencia de nuevas partículas: el positrón, el muón, los piones, etc.

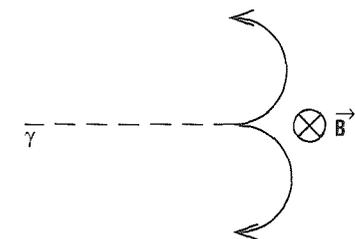
Para poder producir y estudiar dichas partículas son necesarias energías muy elevadas (como las de los rayos cósmicos).

- A.32 Determinar la energía que deben poseer los electrones para estudiar la estructura de los protones.

Para conseguir estas energías se inició el desarrollo de grandes aceleradores (lineales, ciclotrones, sincrotrones, etc.), de los que ya hemos hablado al estudiar el movimiento de cargas en campos eléctricos y magnéticos.

5.1. Partículas y antipartículas

- A.33 En 1932, Blackett y Ochialini descubrieron, en una placa fotográfica expuesta a los rayos cósmicos y sometida a un campo magnético, dos trazas que surgiendo de un punto común correspondían a un electrón y a una partícula hasta entonces desconocida. ¿Qué puede decirse de la naturaleza de dicha partícula?



- A.34 ¿Cuál es la energía mínima de un fotón (y su longitud de onda) para que pueda producir un par e^-e^+ ?

- A.35 ¿Qué ocurrirá cuando un e^- se encuentre con un e^+ ?

5.2. Las interacciones como intercambio de partículas

A.36 Enumerar las interacciones fundamentales que conozcas. Indicar sus intensidades relativas y sus alcances.

A.37 Teniendo en cuenta los trabajos de Einstein, Compton, etc., sobre la luz, imaginar cómo interactúan dos cuerpos cargados. Comparar dicha idea de interacción con la clásica.

A.38 Calcular el tiempo durante el cual la energía E de las partículas cargadas puede venir afectada por una imprecisión equivalente a la energía del fotón, es decir, calcular el tiempo que puede durar el intercambio de un fotón entre dos partículas cargadas y el alcance máximo de la interacción electromagnética.

Yukawa, apoyándose en la idea de la interacción electromagnética como intercambio de fotones, la extendió a la interacción nuclear considerándola como un intercambio de partículas con masa a las que denominó mesones.

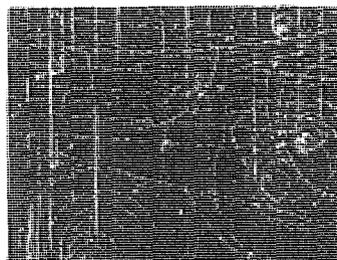
A.39 A partir de las relaciones de indeterminación, calcular la masa de las partículas de Yukawa, teniendo en cuenta que su alcance es del orden de 1 fm (tamaño del núcleo).

5.3. Partículas e interacciones

A.40 Leer el texto que sigue y realizar una recapitulación de las partículas e interacciones fundamentales. Recoger a lo largo del curso las noticias de la prensa sobre este tema y exponer algunas perspectivas abiertas.

En los años posteriores a la II Guerra Mundial, el estudio de las interacciones de los rayos cósmicos con la materia, o la construcción y utilización de aceleradores cada vez más potentes, hizo que se descubrieran nuevas partículas (y sus correspondientes antipartículas).

Se produjeron entonces los primeros intentos de clasificación, atendiendo a la masa y a las interacciones en que participan. Se dividieron las partículas en hadrones y leptones. Los hadrones interactúan nuclearmente. Entre ellos se incluyen los bariones neutrón, protón, etc. (de gran masa) y los mesones π^+ , π^0 , π^- , etc. (de masa intermedia). Los leptones (electrón, muón y sus correspondientes neutrinos) no participan en las interacciones nucleares. Ambas clases participan en la interacción débil y la electromagnética (salvo las neutras). Además, hay que incluir el fotón, cuanto de la interacción electromagnética.



Esta proliferación de partículas (más de un centenar de hadrones aunque sólo existían cuatro leptones) planteaban una situación similar a la de la Química con la proliferación de elementos. Esto condujo a la predicción de nuevas partículas constituyentes de los hadrones. El número reducido de leptones y su masa pequeña o nula hace pensar que son partículas elementales pues no parece que puedan descomponerse en entes menores (además no presentan estructura interna ni tamaño mensurable en las experiencias de colisión). Así, en 1964 Gell-Mann y Zweig consideraron que los hadrones tenían estructura interna: estaban formados por partículas elementales, como los leptones, denominadas quarks. Se puede confirmar esto en una experiencia análoga a la dispersión de partículas por átomos de oro, que permitió verificar la existencia de un centro difusor: el núcleo. En 1969 en el acelerador de electrones de SLAC al bombardear protones con ellos, se encontró que los nucleones estaban constituidos por una serie de centros difusores: los quarks.

Según esta hipótesis los bariones están constituidos por 3 quarks (p.ej. el protón por uud, el neutrón por udd; u se refiere al quark "up" y d al "down") y los mesones por un quark y un antiquark (p.ej. el π^+ por $u\bar{d}$). Por tanto la carga eléctrica de dichos quarks y sus correspondientes antiquarks es fraccionaria. Resolviendo un sencillo sistema de dos ecuaciones encontramos $Q_u = 2e/3$ y $Q_d = -1e/3$. Sus correspondientes antiquarks tendrán carga igual pero de signo contrario.

Ahora bien, hasta el momento no se han observado nunca estas cargas fraccionarias. Esto se puede explicar porque la energía de enlace entre los quarks es tan grande que, hasta ahora, no han podido ser observados de forma aislada. Para romper un hadrón hay que suministrar tanta energía que se crean otras partículas. Además, para energías tan grandes es tan importante lo que mantiene unido como los propios constituyentes.

Hoy se piensa que la interacción que mantiene unidos los quarks es la fuerte, debida al intercambio de unas partículas denominadas gluones. La fuerza nuclear entre protones y neutrones no es más que una manifestación de las interacciones entre los quarks que los constituyen, del mismo modo que la interacción de Van der Waals entre átomos o moléculas es un efecto residual de las fuerzas electromagnéticas entre electrones y núcleos.

En 1964 Gell-Mann y Zweig introdujeron un tercer quark, el s (strange, con la misma carga que el d, $-1/3$). Poco después se predijo la existencia de un cuarto quark, basándose en la simetría de la naturaleza (existían 4 leptones). En 1974 se descubrió un nuevo mesón, el psi, que sólo podía explicarse basándose en la existencia de dicho quark c (charm, con carga $2/3$). Sin embargo, el descubrimiento de partículas no termina ahí: existen evidencias de que hay otro leptón, el τ , con su correspondiente neutrino. Ello trastocaría el equilibrio entre leptones y quarks, lo que hizo postular la existencia de los quarks t y b (top y bottom). En 1977 se detectó un nuevo mesón que se considera una combinación bb. El quark t ha sido detectado en 1994.

Según esta forma provisional de ver las cosas, se puede explicar la constitución del Universo a partir de 12 partículas (y sus correspondientes antipartículas). Estas partículas pueden catalogarse en tres "generaciones". En la primera se encuentran el electrón, el neutrino electrónico y los quarks up y down, que son los constituyentes del Universo que vemos. La segunda y tercera tienen las mismas propiedades pero masas más altas. Estas partículas son:

	Partículas	Carga
Leptones	$e^- \mu^- \tau^-$	-1
	$\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$	0
Quarks	u c t	2/3
	d s b	-1/3

Además se incluyen las partículas intercambiadas en las interacciones:

Interacción	Partículas
Electromagnética	Fotón
Débil	W^+, W^-, Z
Fuerte	Ocho gluones
Gravitatoria	Gravitón (no detectado)

En cuanto a las interacciones existen cuatro: gravitatoria, electromagnética, débil y fuerte (entendida como un intercambio de gluones entre quarks). Aunque no hay similitud entre la interacción electromagnética y la débil, en la década de los 70, diversos estudios indicaban que eran manifestaciones de una interacción básica: la electrodébil (como la electricidad y el magnetismo eran manifestaciones de la interacción electromagnética). Esto ha llevado al estudio de unificaciones: así, la unificación de la electrodébil con la fuerte se denomina “gran unificación”, que permitiría que los leptones se transformasen en quarks y viceversa, una de cuyas predicciones sería la desintegración del protón (las experiencias realizadas dan una cota para su vida media de 10^{32} años). Se habla de “superunificación” cuando se incluye la interacción gravitatoria.

Actividades complementarias

- 1 Deducir la partícula emitida en las siguientes desintegraciones:
 - a) ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + \dots$
 - b) ${}^{13}_7\text{N} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + \dots$
- 2 Hallar el período de cierto núcleo radiactivo, cuya actividad disminuye en 1/8 al cabo de 24 horas. (Selectividad. 1989)
- 3 Enunciar las leyes de conservación en las reacciones nucleares. (Selectividad. 1994)
- 4 Completar las siguientes reacciones nucleares:
 - a) ${}^{24}_{12}\text{Mg} (d, \alpha) X$
 - b) ${}^7_3\text{Li} (p, X) {}^7_4\text{Be}$
 - c) ${}^{10}_5\text{B} (X, \alpha) {}^8_4\text{Be}$
 - d) ${}^{17}_{80} (d, n) X$
- 5 Identificar X en la reacción nuclear: ${}^6_3\text{Li} + X \rightarrow \alpha + \alpha$. (Selectividad. 1992)
- 6 Explicar brevemente qué se entiende por defecto de masa en una reacción nuclear. (Selectividad. 1991)
- 7 El Sol emite cada minuto una cantidad de energía igual a $2,34 \cdot 10^{26}$ J. Hallar cuánto tiempo tardará la masa del Sol en reducirse a la mitad, suponiendo que la radiación permanece constante. Masa del Sol = $1,97 \cdot 10^{30}$ kg. (Selectividad. 1995)
- 8 La masa del núcleo de deuterio ${}^2\text{H}$ es 2,01355 uma mientras que las del protón y neutrón son, respectivamente, 1,0073 uma y 1,0087 uma. Obtener el defecto de masa y la energía que se libera al formarse un átomo de deuterio. (1 uma = $1,66 \cdot 10^{-27}$ kg) (Selectividad. 1988)
- 9 Se bombardea un blanco de ${}^{24}\text{Mg}$ con partículas α y se observa después de la reacción la presencia de ${}^{27}\text{Al}$ más otra partícula ligera.
 - a) Identificar esta partícula ligera.
 - b) Si las partículas α tienen una energía cinética de 1 MeV, ¿podrá tener lugar esta reacción?
 - c) Supongamos que las partículas tengan una energía cinética de 4 MeV. Explicar por qué no se pueden conocer las características cinemáticas completas de los productos finales de la reacción. Calcular por debajo de qué energía estará la energía cinética de la partícula ligera.
 Datos: $M(\alpha) = 4,0039$ uma, $M(d) = 2,0125$ uma, $M(p) = 1,0076$ uma, $M(n) = 1,0087$ uma, $M({}^{24}\text{Mg}) = 23,9924$ uma, $M({}^{27}\text{Al}) = 26,9899$ uma, $Z(\text{Mg}) = 12$, $Z(\text{Al}) = 13$, $1 \text{ uma} = 931,5 \text{ Mev}$. (Selectividad. 1990)

Los núcleos radioactivos emiten tres clases de radiación que se denominan alfa, beta y gamma.

El núcleo atómico está formado por partículas cargadas positivamente llamadas protones y por partículas neutras que se denominan neutrones. Ambas reciben el nombre de nucleones. Se llama número atómico (Z) de un núcleo al número de protones que contiene y número másico (A) a la suma del número de protones y de neutrones. Los isótopos de un elemento son los núcleos que tienen igual número atómico pero diferente número másico. La interacción que mantiene unidos a los protones y neutrones de un núcleo se denomina interacción nuclear fuerte.

El defecto de masa de un núcleo viene dado por la diferencia entre la masa de los nucleones que lo forman y la masa de dicho núcleo. La energía de enlace se determina por el contenido en energía del defecto de masa. Si se divide la energía de enlace de un núcleo por el número de nucleones que contiene, se obtiene la energía de enlace por nucleón. Cuanto mayor es la energía de enlace por nucleón de un núcleo, mayor es su estabilidad.

La desintegración radiactiva es la transformación que sufren los núcleos inestables, convirtiéndose en otros diferentes y emitiendo partículas alfa, beta o gamma. En la desintegración alfa se emiten un núcleo de helio. La desintegración beta produce un electrón y un antineutrino. Está relacionada con la interacción nuclear débil. La desintegración gamma da lugar a fotones de una energía muy grande.

El tiempo (T) que tarda una muestra radioactiva en reducirse a la mitad se llama período de semidesintegración o vida media. El número de núcleos de una sustancia radioactiva que se desintegran por segundo es proporcional al número de núcleos que existen en un momento determinado. La constante de proporcionalidad se denomina constante radioactiva (λ). Indica la probabilidad de que un núcleo radioactivo se desintegre en la unidad de tiempo. El período de semidesintegración y la constante radioactiva están relacionados por la expresión $T = \ln 2/\lambda$.

Los isótopos radioactivos se utilizan como fuente de radiación, como trazadores y para investigar la estructura interna de materiales. Las radiaciones producidas por las sustancias radiactivas ionizan el medio que atraviesan.

En una reacción nuclear se produce el choque de dos núcleos o de un núcleo y una partícula más simple. Si la masa de los reactivos es mayor que la de los productos, se libera una cantidad de energía que equivale al defecto de masa. Las reacciones de fisión consisten en la transformación de un núcleo pesado en otros más ligeros, emitiéndose neutrones. En las reacciones de fusión varios núcleos ligeros se unen y se transforman en otro más pesado.

El estudio de las partículas exige energías muy elevadas que se consiguen por medio de los aceleradores (lineales, ciclotrones, sincrotrones, etc.). Para cada partícula existe su antipartícula. Ésta se diferencia de la primera en que su carga es de signo contrario. Cuando una partícula encuentra a su antipartícula se aniquilan y se producen fotones.

Las interacciones fundamentales de la naturaleza son cuatro: fuerte, electromagnética, débil y gravitatoria. La interacción entre dos partículas supone el intercambio de otra. En la in-

teracción fuerte se intercambian gluones; en la electromagnética, fotones; en la débil, bosones W y Z , y en la gravitatoria, gravitones.

Las partículas se clasifican en hadrones, leptones (electrón, muón, tauón y sus neutrinos) y fotones. El grupo de los hadrones se divide en dos: bariones (protón, neutrón, etc.) y mesones (pión, kaón). La teoría de los quarks supone que los bariones y los mesones están formados por partículas más sencillas llamadas quarks cuya carga es una fracción de la carga del electrón.

Se considera que las partículas fundamentales son doce: seis leptones (electrón, muón, tauón y sus neutrinos) y seis quarks.

También se consideran fundamentales las partículas intercambiadas en las cuatro interacciones básicas.

Soluciones a los ejercicios propuestos

- A.2. $2,7 \cdot 10^{-14}$ m; $5 \cdot 10^{-15}$ m; 8,2 MeV.
 A.4. 15 GeV.
 A.7. 40% de Sb-123.
 A.10. 0,0024 u.
 A.11. $931 \text{ MeV}/c^2$; 127,6 MeV.
 A.12. C-12: 7,94 MeV/nucleón; C-13: 7,70 MeV/nucleón; C-12 es más estable.
 A.16. 5,3 MeV.
 A.18. 0,16 MeV.
 A.20. 10^{40} núcleos.
 A.22. 27,6 años.
 A.23. 5100 años.
 A.32. 1 GeV.
 A.34. 1,02 MeV; $1,2 \cdot 10^{-10}$ m.
 A.39. $130 \text{ MeV}/c^2$.

Actividades complementarias

2. 124,67 horas.
 7. $3,79 \cdot 10^{18}$ min.
 8. 0,0025 u; $3,66 \cdot 10^{-13}$ J.
 9. a) protón; b) no; c) 2,8822 MeV.