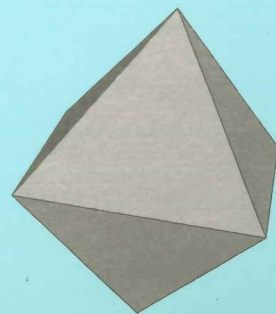


Manuales GALAXIA
BACHILLERATO • LOGSE

FÍSICA Y QUÍMICA. 1.º BACHILLERATO

♦
FÍSICA 2.º BACHILLERATO

♦
QUÍMICA 2.º BACHILLERATO



GUÍA DIDÁCTICA - FÍSICA

ENSEÑANZA SECUNDARIA POSTOBLIGATORIA

J. Solbes
F. Tarín

GUÍA DIDÁCTICA FÍSICA

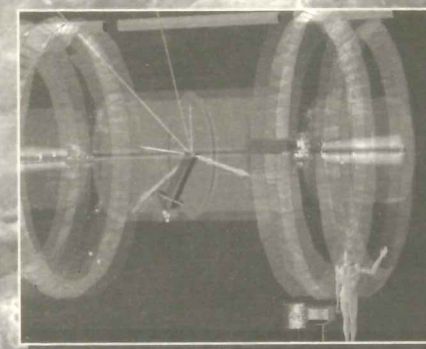
2.º BACHILLERATO

ENSEÑANZA SECUNDARIA POSTOBLIGATORIA

FÍSICA

2.º BACHILLERATO

J. SOLBES - F. TARÍN



Ediciones OCTAEDRO

JORDI SOLBES MATARREDONA
FRANCISCO TARÍN MARTÍNEZ

FÍSICA

GUÍA DIDÁCTICA

2.º BACHILLERATO
ENSEÑANZA SECUNDARIA POSTOBLIGATORIA

Ediciones OCTAEDRO

Introducción.....	5
Primera parte. El triunfo de la mecánica	9
1. Interacción gravitatoria	11
2. Vibraciones y ondas	23
Segunda parte. El poder unificador de la física: el electromagnetismo	33
3. Óptica	35
4. La interacción electromagnética	47
Tercera parte. La crisis de la física clásica y el surgimiento de la física moderna	61
5. Elementos de física relativista	66
6. Elementos de física cuántica	73
7. Física nuclear y de partículas	86

Primera edición: marzo de 1997

© Jordi Solbes Matarredona,
Francisco Tarín Martínez

© Derechos exclusivos de edición:
Ediciones OCTAEDRO, S.L.
Bailén, 5, 5ª planta - 08010 Barcelona
Tel.: 246 40 02 Fax: 231 18 68
Pol. Ind. San Cayetano, C/ Dalí, nave 13
18194 Churriana de la Vega (Granada)
Tel.: (958) 55 33 24 Fax: (958) 55 33 07

Depósito legal: B. 3.353-1997

Diseño y realización: Servicios Gráficos OCTAEDRO
Impresión: Press Line

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

INTRODUCCIÓN

Actualmente se están introduciendo cambios en todo el sistema educativo y, en particular, en los currículos de Física y Química. Pero estos cambios se justifican por múltiples razones de tipo científico, didáctico, etc., y por ello deberían producirse aunque no existiese un proceso de implantación de la LOGSE.

En cuanto a las razones científicas hay que señalar, por un lado, el gran desarrollo de la ciencia en estos últimos años y, por el otro, 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 de la investigación), en el desarrollo de las ideas, en el medio ambiente, etc. Y en un futuro próximo, las ciencias, usadas solidariamente, pueden contribuir a la solución de los graves problemas del mundo: el hambre, la enfermedad, la destrucción del medio ambiente, el agotamiento de materias primas y fuentes energéticas, etc. (Salam 1989). Por ello, la enseñanza de la Física presenta un interés primordial para todos los estudiantes. Sin ella su formación cultural como futuros ciudadanos quedaría disminuida, al no disponer de los elementos que les permitan comprender desde gran parte de los dispositivos cotidianos hasta el cosmos en su globalidad. Además, es sencillamente imprescindible para aquellos que vayan a seguir más tarde estudios superiores de ciencias e ingeniería (Fdez-Rañada *et al* 1993).

Por ello es necesario actualizar los currículos de Física. A nivel de contenidos aún tiene vigencia el análisis de Feynman (1971) para describir la situación de la Física que realmente se enseña en BUP y COU: «Muchos habían oído hablar de lo interesante y estimulante que es la Física: la teoría de la Relatividad, la Mecánica cuántica y otras ideas modernas. Pero se les hacía estudiar planos inclinados, electrostática y cuestiones por el estilo». En lo que se refiere a las interacciones de la ciencia, la tecnología y la sociedad (CTS), también están ausentes en la enseñanza usual de la Física.

En cuanto a las razones didácticas, en el trabajo de Solbes, Calvo y Pomer (1994) se resumen una serie de problemas en la enseñanza de la Física, que son comunes a otros países de nuestro entorno:

- En los estudiantes no se produce un aprendizaje «significativo», sino memorístico. Por ello, los conceptos se olvidan fácilmente y no son aplicados a nuevas situaciones (Novack 1982). Este problema también es señalado por profesores como Feynman (1985), basándose en su experiencia docente: «los estudiantes se habían aprendido todo de memoria, pero no sabían el significado de nada». Y atribuye esta dificultad para un aprendizaje significativo de la Física, en gran parte, al método de enseñanza: «Más tarde asistí a una lección... Los estudiantes todos sentados escribiendo al dictado...». En esto coincide con las aportaciones de la investigación en didáctica de las ciencias.
- La escasez de **trabajos prácticos** que, cuando se realizan, juegan simplemente el papel de ilustración o comprobación de lo expuesto anteriormente por el profesor. Generalmente se convierten dichas prácticas en manipulaciones siguiendo guías pormenorizadas (Gil y Payá 1988). Las causas de ello hay que buscarlas en un enfoque empirista de la ciencia, basado en la idea de que la solución de los problemas se obtiene por razonamiento inductivo a partir de datos empíricos, lo que conduce a realizar activi-

dades experimentales, en las que se ignoran aspectos esenciales del trabajo científico, como la emisión de hipótesis o el diseño de experimentos.

- El fracaso generalizado de los estudiantes en la **resolución de problemas**, en particular si se separan ligeramente de los realizados en clase. En efecto, se ha señalado que los alumnos no aprenden a resolver problemas, sino únicamente a comprender y memorizar soluciones explicadas por el profesor, a la aplicación mecánica de las matemáticas, de las «fórmulas», lo cual conduce a que los alumnos se limiten a reconocer problemas que ya han sido resueltos o a abandonar (Gil, Martínez y Senent 1988).
- La ineficacia de la enseñanza usual allí donde sus resultados parecen más positivos: un gran porcentaje de estudiantes no logran comprender los conceptos físicos más básicos, a pesar de la insistencia y repetición con que han sido enseñados. Los **errores conceptuales** (respuestas incorrectas en las situaciones en que tienen que utilizar dichos conceptos) no son simples olvidos o equivocaciones momentáneas, sino que se muestran como ideas seguras y arraigadas. Dichos errores son similares para alumnos de distintos países y presentan una notable resistencia a ser sustituidos por los conocimientos científicos.
Las investigaciones sobre estos errores y su resistencia a ser desplazados condujo a muy diversos autores a la idea de la existencia de ideas previas o preconcepciones en los alumnos, designadas también como ideas alternativas o esquemas conceptuales alternativos. Por otra parte se puso en duda que la transmisión verbal de conocimientos haga posible un aprendizaje significativo de los mismos por los estudiantes.
- La desconexión, señalada por los propios estudiantes, entre la Física y su «vida cotidiana», «los problemas reales del mundo», «la actualidad», etc. Es decir, una imagen empobrecida y descontextualizada de la Física, en la que se ignoran las **interacciones CTS** y la **historia de la Física**, es decir, la evolución de los conceptos, la existencia de rupturas conceptuales con las ideas aceptadas, etc. Otros factores mencionados por los estudiantes españoles como causa de su desinterés hacia el aprendizaje de la Física son el método de enseñanza del profesor (caracterizado por ellos como aburrido, poco participativo, etc.), la escasez de prácticas y la falta de confianza en el éxito al ser evaluados (Solbes y Vilches 1989 y 1992).

Todos los problemas citados implican que pocos alumnos aprenden la asignatura y muchos tienen desinterés hacia el aprendizaje de la Física. Por todo esto, es necesario introducir en la enseñanza de la Física cambios que puedan contribuir a solucionar los problemas científicos y didácticos antes mencionados, es decir, puedan contribuir a dar una imagen más correcta de la Física y a producir mejoras en su aprendizaje. Estos cambios también deben contribuir a mejorar el interés de los estudiantes hacia la Física, mostrándola como un elemento fundamental de la cultura de nuestro tiempo, necesaria para la formación de los futuros ciudadanos. Una forma de hacerlo es que cada tema, desde la introducción de conceptos a la discusión de las implicaciones sociales, pasando por la resolución de problemas o el trabajo experimental se convierta en un **programa de actividades**, debidamente organizadas que los alumnos, estructurados en pequeños grupos, tienen que realizar bajo la dirección del profesor (Solbes 1993). En consecuencia, hemos incluido en estos materiales:

- el planteamiento de **actividades problemáticas**, que llevan a los estudiantes a emitir hipótesis basadas en sus ideas previas (equivocadas o no), elaborar y afianzar conocimientos, explorar alternativas, etc., superando la mera asimilación de conocimientos elaborados.
- **trabajos prácticos como pequeñas investigaciones**, como la determinación de la aceleración de la gravedad o de la constante elástica de un muelle, el estudio de la reflexión o del campo magnético producido por un conductor rectilíneo, etc., fácilmente realizables con material disponible en los Institutos. Así mismo, se pretende que los estudiantes manipulen lentes, espejos, motores eléctricos, células fotoeléctricas, etc.
- **problemas como pequeñas investigaciones**, no sólo porque constituyen una ocasión más de familiarizar al estudiante con la metodología científica, sino porque los estudiantes que resuelven problemas abiertos encuentran menos dificultades para resolver los problemas con datos, que son simples concreciones de los abiertos.
- 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 ciencia.
- las **relaciones CTS** y sus consecuencias en la vida humana y en el medio ambiente que permitan al estudiante valorar críticamente sus ventajas e inconvenientes en la vida de los hombre, formarse opiniones justificadas y, en consecuencia, poder tomar decisiones al respecto.
- **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.
- cuestiones y problemas de las **pruebas de selectividad** de la Física del Bachillerato de la Reforma y la LOGSE en las actividades complementarias, para que los estudiantes se familiaricen con ellas.
- **criterios y actividades de evaluación**, en la guía didáctica que muestran cómo evaluar no sólo los contenidos conceptuales, sino también los relativos a procedimientos, a conocimiento de las relaciones CTS, etc.

Por último señalar que se trata de un libro fruto de muchos años de trabajo y al que han contribuido con sus ideas muchas personas. En Física clásica, se han tenido presentes las discusiones con compañeros del Seminario Permanente de Física y Química, y las investigaciones emprendidas con D. Gil, F. Senent y J. Navarro sobre Física moderna, con J. Martín sobre el concepto de campo y con J. Zacarés sobre Óptica. También se agradece la lectura detenida de este manuscrito y las sugerencias realizadas a F. Pomer y a A. Vilches, profesores de Física de la Universitat de Valencia y de COU, y a J.C. Gozábez y D. Ponsoda, profesores de Física del Bachillerato.

Así mismo agradecemos a los profesores que han experimentado estas actividades las indicaciones para un uso adecuado del material, así como para su secuenciación que presentamos seguidamente. En principio, sólo se plantean problemas de tiempo para impartir

estos materiales si en 1º no se han impartido todos los temas de Física. Al constituir la Física y la Química de 1º de Bachillerato una única asignatura (siendo el único país de nuestro entorno en el que sucede esto), esa posibilidad es bastante frecuente, porque el profesorado suele comenzar por la Química, dedicándole más tiempo. Esto produce problemas en la Física de 2º, dado que los temas de 1º no se repiten en 2º, pero los conceptos allí introducidos se utilizan en otros contextos (movimientos en campos eléctrico y magnético, tratamiento energético en casi todos los temas, etc.). Para evitar estos problemas conviene que en la Física y Química de 1º se dedique el 50 % del tiempo a cada una de las partes. Entonces en 2º se podría realizar la siguiente **distribución temporal**:

- Tema 1. Interacción gravitatoria. 22 horas.
- Tema 2. Vibraciones y ondas. 18 horas.
- Tema 3. Óptica. 17 horas.
- Tema 4. Interacción electromagnética. 28 horas.
- Tema 5. Elementos de Física Relativista. 9 horas.
- Tema 6. Elementos de Física Cuántica. 13 horas.
- Tema 7. Física nuclear y de partículas. 13 horas.

BIBLIOGRAFÍA

- FEYNMAN, R.P.; LEIGHTON, R.B. y SANDS, M., 1971, *Física*, Fondo Educativo Interamericano, Panamá.
- FEYNMAN, R.P., 1985, *¿Está Ud. de broma, Sr. Feynman?*, Alianza, Madrid.
- FERNÁNDEZ-RAÑADA, A. et al, 1993, *Física básica 1*, Alianza, Madrid.
- GIL, D.; MARTÍNEZ, J. y SENENT, F., 1988, El fracaso en resolución de problemas de Física: una investigación orientada por nuevos supuestos, *Enseñanza de las Ciencias*, 6(2), 131-147.
- GIL, D. y PAYÁ, J., 1988, Los trabajos prácticos de física y Química y la metodología científica, *Revista de Enseñanza de la Física*, 2 (2), 73-79.
- NOVACK, J.D., 1982, *Teoría y práctica de la Educación*, Alianza, Madrid.
- SALAM, A., 1986, Defensa nuclear, desarme y desarrollo, *Revista de Enseñanza de la Física*, 2, 25-34.
- SOLBES, J., 1993, *Física*, Ministerio de Educación y Ciencia, Madrid.
- SOLBES, J., CALVO, A. y POMER, F., 1994, El futuro de la enseñanza de la física, *Revista Española de Física*, 8 (4), 45-50.
- SOLBES, J. y VILCHES, A., 1989, Interacciones ciencia/ técnica/sociedad: un instrumento de cambio actitudinal, *Enseñanza de las Ciencias*, 7 (1), 14-21.
- SOLBES, J. y VILCHES, A., 1992, El modelo constructivista y las relaciones Ciencia, Técnica y Sociedad, *Enseñanza de las Ciencias*, 10 (2), 181-186.

PRIMERA PARTE

EL TRIUNFO DE LA MECÁNICA

1. INTERACCIÓN GRAVITATORIA

Es un tema muy interesante, en particular si no se limita a un tratamiento meramente formal, basado en la explotación de las analogías matemáticas entre los campos eléctrico y gravitatorio. En efecto, un tratamiento más centrado en los aspectos físicos, pondrá de manifiesto el papel de la gravitación en nuestra vida cotidiana, en la astronomía y astrofísica (que tanto interés despiertan en particular, a los alumnos), en un tema de notable actualidad como es el movimiento de los satélites artificiales, etc.

Además permite poner fácilmente de manifiesto que las ciencias no sólo se limitan a explicar los fenómenos naturales y a favorecer el desarrollo técnico. Tienen también un valor crítico de las concepciones vigentes y contribuyen a una mayor comprensión de la realidad.

Por otra parte, empezar una asignatura de Física por este tema, permite (al igual que cuando se comienza por Cinemática) realizar un tratamiento histórico, desde las concepciones aristotélicas-escolásticas hasta nuestros días.

Sin embargo es un tema en el que aparecen dificultades para el alumno debido, en primer lugar, a la persistencia de las preconcepciones sobre fuerza/movimiento y de las formas de razonamiento espontáneas. Podemos encontrarlas, por ejemplo, en la representación de las fuerzas que actúan sobre un satélite. Además los alumnos mantienen diferencias entre el comportamiento mecánico de los cuerpos terrestres y celestes (Doménech *et al* 1989), considerando en algunas situaciones que sobre estos últimos no actúan fuerzas (los astronautas flotan). Sobre las preconcepciones mecánicas existe una abundante bibliografía y en ella podremos encontrar algunas ideas sobre gravitación (Driver *et al* 1989, Hierrezuelo y Montero 1989, Carrascosa y Gil 1992).

Otra dificultad se centra en torno al concepto de campo. Los conceptos de energía y campo son los más potentes, fructíferos y unificadores de la Física clásica. Como dice Holton (1976) «el concepto de energía proporcionó un vínculo unificador de los fenómenos mecánicos y térmicos, el concepto de campo suministró a la electricidad, el magnetismo, la gravedad y la luz un marco común de teorías físicas». Además, los conceptos de campo y energía siguen conservando su validez en la Física moderna. Por ello, es necesario introducirlo, procurando superar las dificultades que conlleva.

Estas dificultades están basadas en que las interacciones entre partículas pueden ser descritas físicamente con muchos conceptos: fuerzas, campos, energías potenciales, etc. Ello, unido al hecho de que la enseñanza habitual se limita a realizar definiciones operativas (en la mejor tradición empirista) y manipulaciones cuantitativas (problemas de cálculo, etc.) sin profundizar en el significado de los conceptos, sin relacionarlos y compararlos con otros, etc.) produce desorientación en el alumno.

Así, recientes investigaciones (ver Solbes y Martín 1991) muestran que los diferentes modelos que describen la interacción entre partículas (fuerzas, campos, etc.) se yuxtaponen en la enseñanza habitual, recurriendo a uno u otro sin diferenciación. En particular, no se muestran los límites del modelo de fuerzas (interacción a distancia e instantánea) ni las ventajas del modelo de campos, que permite explicar mayor número de fenómenos. En consecuencia, los alumnos no son capaces de distinguir entre las fuerzas y los campos; este último aparece como un mero artificio matemático y no adquiere significado físico. Algunos identifican el campo con sus efectos (el campo gravitatorio es donde hay gravitación). Así mismo parece que la atracción gravitatoria sea privativa de grandes masas, de cuerpos celestes. Localizan la energía potencial en la propia partícula que se encuentra dentro del campo.

Sería posible un enfoque de la Física que comenzase por interacciones (gravitatoria y electromagnética) y prosiguiese con ondas (incluyendo vibraciones y ondas, y Óptica), siguiendo la línea de Alonso y Finn (1971). Sin embargo, una propuesta de este tipo carece de perspectiva histórica, no permite mostrar las grandes síntesis teóricas, etc.

Al empezar con la Gravitación universal, conviene destacar cómo ésta relacionó la nueva astronomía de Copérnico, Kepler, etc., con la nueva dinámica de Galileo y Newton, introducida en el curso anterior. Así mismo, el estudiante debe comprender que la gravitación derriba la supuesta barrera entre el mundo terrestre y celeste, realizando la primera unificación o síntesis de la Física clásica.

El estudio de las vibraciones y las ondas en muelles, cuerdas, superficies de líquidos, acústicas, etc., permite mostrar la potencia de la Mecánica para explicar el comportamiento de la materia. En efecto, esta imagen mecánica explica fenómenos tan dispares como la caída de los cuerpos, la propagación de ondas sonoras, el movimiento de los astros, los fenómenos caloríficos, etc., constituyéndose en uno de los pilares de la Física clásica.

Sin embargo, el estudiante debe saber que el éxito de estas leyes durante más de dos siglos (desde mediados del 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.

El mecanicismo que en su momento supuso un gran avance, se convirtió en una rémora, como se puede comprobar con los modelos mecanicistas decimonónicos del campo. El determinismo ha sido puesto en cuestión por la propia Física con la Teoría Cinética y la Mecánica estadística, con la Física cuántica y, más recientemente, con el comportamiento caótico.

1. LOS ORÍGENES DE LA TEORÍA DE LA GRAVITACIÓN

En la actividad A.1 los alumnos responderán que en el texto aparecen dos papeles a nivel práctico: la orientación (en la navegación y también en las grandes caravanas) y la medida del tiempo («se pone muy tarde»). Por ello, no debe sorprender el temprano desarrollo de la astronomía (en las civilizaciones egipcia, babilonia, etc.). La regularidad de los movimientos celestes no podía pasar inadvertida y permite medir el tiempo, elaborar calendarios y predecir acontecimientos celestes. Algunos de ellos coincidían con la siembra, la cosecha, el desbordamiento del Nilo, etc., de tanta importancia para la agricultura y, en consecuencia, para la vida de los hombres. Era, por lo tanto, natural creer que los cuerpos celestes influían en los asuntos de este mundo. Esto permitía a los sacerdotes, que realizaban las observaciones y los registros de los datos astronómicos, aumentar su poder e influencia. Se puede aprovechar este hecho para criticar la astrología y también para mostrar el papel ideológico que jugaba la astronomía, de justificación de clases sociales, pues sólo las castas sacerdotales tenían acceso y se servían de dicho saber.

El lenguaje ordinario está lleno de expresiones basadas en el modelo geocéntrico: el Sol sale por el este y se pone por el oeste, la Luna se levanta, las estrellas giran (como se ha podido leer en el texto de Homero). Esto hará pensar a los alumnos, en la actividad A.2, que las concepciones del Universo de aquella época no eran tan descabelladas, pues se apoyaban en observaciones de la vida cotidiana, es decir, en evidencias del sentido común.

En primer lugar, vemos en la actividad A.3 que el Universo para los antiguos griegos se limitaba a los planetas más interiores del Sistema Solar y a las estrellas fijas, es decir, el Universo visible con los ojos. Esta idea limitada del Universo prevaleció hasta que los telescopios, a partir del siglo XVII, permitieron ampliar la imagen y tamaño del Universo. Otro aspecto destacable es la clara separación entre el mundo terrestre y el celeste. Las diferencias se manifiestan tanto en la composición como en el comportamiento (tipos de movimiento, permanencia en el «lugar natural», etc.).

La pervivencia de este modelo durante la Edad Media es una prueba más de las implicaciones de la ciencia en la ideología, la cultura, etc. En efecto, el modelo geocéntrico era coherente con las concepciones medievales dominantes, tanto religiosas como sociales (feudalismo): papel del hombre en el mundo, necesidad de un primer motor, la jerarquización natural, etc. Además, como hemos visto en la actividad A.2, las observaciones efectuadas a simple vista estaban en perfecta concordancia con el modelo geocéntrico y no existía explicación más natural de las mismas.

En la actividad A.4 es muy interesante comprobar que la k es distinta en el caso del sistema formado por los planetas que giran alrededor del Sol que en el caso de los satélites que giran alrededor de un planeta. En la actividad A.14 se aclarará este hecho.

En cuanto a la actividad A.5, muestra que los cuerpos celestes no aparecían como perfectos e inmutables, que no todos giraban en torno a la Tierra y que las estrellas se encuentran muy alejadas. Por otra parte, el telescopio es una prueba de que la técnica no es sólo una aplicación de la ciencia pura. El avance técnico (el telescopio, el microscopio, etc.) determina con frecuencia los progresos científicos (astronómicos, biológicos, etc.).

El Cuadro 1 permite mostrar cómo los argumentos físicos son falsos. Para ello fue necesario recorrer el largo proceso en el que fueron construidos conocimientos sobre gravitación (Newton), cinemática (Galileo) y astronomía. Estos nos permiten comprender que los objetos son atraídos por la Tierra y, por tanto, no son despedidos; que los cuerpos que caen verticalmente llevan la velocidad de la Tierra y, en consecuencia, no se alejan de la vertical; y que las estrellas se encuentran a una distancia prácticamente infinita lo cual justifica su

pequeño tamaño. Pero, de hecho, en aquella época, no existía ninguna observación o experimento «crucial», que pudiera explicarse sólo por una teoría. Hubo que esperar al descubrimiento de las aberraciones estelares o al experimento del péndulo de Foucault.

Los argumentos de tipo teológico se basaban en una interpretación literal de la Biblia, que no distinguía el mensaje de la forma literaria en que estaba escrito, fruto de la antigua cultura judaica.

En el fondo todas las objeciones y persecuciones contra el sistema copernicano derivan, como ya se ha visto en la actividad A.3, de su oposición a las concepciones e intereses de la nobleza y el clero.

En cuanto a las persecuciones, en el cuadro se mencionan las que sufrieron los biólogos por su defensa de la evolución (que llegan a fechas tan recientes como 1925 con el «juicio del mono» en Tennessee, EE.UU., en el que se prohibió la enseñanza de las teorías de Darwin). También los partidarios de la genética fueron perseguidos por el stalinismo. Más adelante se verán otros casos, como el de Einstein y otros científicos alemanes perseguidos por el nazismo; Cabrera, Duperier y otros expulsados de España por el franquismo; o el caso de Oppenheimer, juzgado públicamente por no apoyar el desarrollo de las bombas de fusión.

2. LA CONSERVACIÓN DEL MOMENTO ANGULAR

En la actividad A.6 se debe llegar a la expresión del módulo del momento angular $L = rmv$ correspondiente a un cuerpo de masa m que gira con una velocidad v a una distancia r de un eje. Se debe considerar que no se produce ningún cambio en la rotación del objeto cuando r y v tienen la misma dirección. De la misma forma se puede concluir que el cambio máximo en la rotación se producirá cuando r y v sean perpendiculares. A partir de los dos casos extremos anteriores se puede llegar a la expresión vectorial $\mathbf{L} = r \times m\mathbf{v}$.

Con la actividad A.7 se pretende que los alumnos indiquen que la velocidad de rotación aumentará cuanto mayor sea la fuerza aplicada. La velocidad también aumentará cuando la distancia del punto de aplicación de la fuerza al eje de rotación sea mayor. Por tanto existe una magnitud vectorial denominada momento de una fuerza (\mathbf{M}) cuyo módulo será igual al producto de la fuerza aplicada por la distancia al eje de giro, es decir $M = Fr$.

Si la fuerza se aplica en la dirección de r , es fácil deducir que no se producirá variación en la velocidad angular. Por esa razón, el momento se expresará vectorialmente como $\mathbf{M} = r \times \mathbf{F}$.

En las actividades anteriores se ha establecido el paralelismo entre momento lineal y momento angular. Del mismo modo se ha determinado la semejanza entre una fuerza y su momento. Conocida la segunda ley de Newton en la forma $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$, se puede deducir en la actividad A.8 que $\mathbf{M} = d\mathbf{L}/dt$.

Según la expresión $\mathbf{M} = d\mathbf{L}/dt$, el momento angular \mathbf{L} será constante (actividad A.9.) cuando el momento de la fuerza (\mathbf{M}) sea cero. Dado el carácter vectorial de \mathbf{M} y su relación con la fuerza \mathbf{F} y la distancia al eje de giro ($\mathbf{M} = r \times \mathbf{F}$), el momento de la fuerza valdrá cero cuando la fuerza sea cero (cuerpo aislado) o el ángulo formado por r y \mathbf{F} sea cero (fuerza central).

Para resolver la actividad A.10 se debe considerar que si el planeta realiza sobre su órbita un desplazamiento $d\mathbf{r}$, el valor del área barrida por el vector \mathbf{r} será $dS = |r \times d\mathbf{r}|/2$. De acuerdo con la segunda ley de Kepler, las áreas barridas en tiempos iguales son también iguales, es decir, dS/dt tiene un valor constante. Pero dS/dt es igual a $|r \times v|/2 = |L|/2m$ porque $|L| = |r \times mv|$. Es decir, la constancia de la velocidad areolar es una consecuencia de la conservación del momento angular.

La actividad A.11 es una aplicación numérica de la definición de momento angular vista en la actividad A.6. La segunda cuestión propuesta se puede resolver aplicando la conservación del momento angular en los dos puntos indicados, dado que la fuerza es central. De esa forma se tendría que $mr_1v_1 = mr_2v_2$, de donde $v_2/v_1 = r_1/r_2$.

3. LEY DE NEWTON DE LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL

El cuadro 2 puede ser un tema interesante para realizar un trabajo interdisciplinar con profesores de Historia, Filosofía, etc., en particular sobre las razones que dejaron a España al margen de la Revolución científica. Sin profundizar en las múltiples razones, dada su gran complejidad, se pueden mencionar algunas. En primer lugar las económicas, dado que los nuevos descubrimientos geográficos favorecen, tanto a nivel comercial como manufacturero, a las regiones próximas al Atlántico. Por otra parte el protestantismo, dominante en esas regiones, no obstaculiza e incluso favorece el desarrollo de la ciencia. Por contra en los países del sur (España, Italia, etc.) hay grandes obstáculos como el feudalismo, las persecuciones de la Inquisición, etc.

La actividad A.12 pretende facilitar en los alumnos la analogía entre el movimiento de un proyectil (terrestre) y el de la Luna (celeste), identificando la atracción gravitatoria con el peso. Éste es el paso que, hasta Newton, nadie había dado. El texto de Newton, que adjuntamos, ayuda a comprender que la diferencia viene determinada únicamente por la velocidad horizontal del movimiento. En cuestionarios algunos alumnos dicen que la Luna no cae debido a la fuerza centrífuga, sin señalar que ésta sólo aparece en el sistema de referencia no inercial (o acelerado) ligado a la Luna.

Vista la actividad anterior los alumnos avanzan fácilmente, en la actividad A.13., la dependencia de las masas de los cuerpos y de la distancia entre ellos. El profesor introducirá la expresión vectorial

$$F = -GMm \mathbf{u}/r^2$$

subrayando que el vector r va del centro de masas de M al de m (son fuerzas centrales) y que G es una constante de gravitación universal, independiente de la composición, forma, etc., de los cuerpos, cuyo valor Newton no pudo determinar.

La igualdad $mv^2/r = GMm/r^2$ lleva a los alumnos fácilmente en la actividad A.14. a la tercera ley de Kepler $T^2/r^3 = k = 4\pi^2/GM$. Se puede observar que la constante k tiene el mismo valor para todos los planetas, ya que depende únicamente de la masa M del Sol.

El resultado anterior facilita considerablemente la realización de la actividad A.15. En efecto, la igualdad de la aceleración de la gravedad en la superficie de la Tierra con la ley de Newton $g = GM/R_T^2$, permite determinar el producto GM y, por tanto, el periodo de la Luna $T^2 = 4\pi^2 216000 R_T / g = 5,43 \cdot 10^{12} \text{ s}^2$.

En la actividad A.16 la debilidad de las fuerzas gravitatorias entre dos masas que puedan utilizarse en un experimento de laboratorio, invalida propuestas de los alumnos como la utilización de dinamómetros. Ello muestra la necesidad de instrumentos muy delicados como la balanza de torsión utilizada por Cavendish, que le permitió determinar $G = Fr^2/mm'$. El mejor valor actual de G es aproximadamente $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

Una vez conocido G podemos determinar fácilmente en la actividad A.17 la masa de la Tierra $M_T = gR_T^2/G = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$. Con la tercera ley de Kepler podemos determinar la masa del Sol (a partir del periodo T de la Tierra y de la distancia Tierra-Sol r) o de cualquier

planeta con satélites (cuya T y r respecto al planeta conozcamos). En efecto, la masa del Sol será $M = 4\pi^2 r^3/GT^2 = 2,0 \cdot 10^{30} \text{ kg} \approx 333.000 M_T$.

4. CAMPO GRAVITATORIO

Los alumnos pueden mencionar en la actividad A.18 los dos problemas del modelo newtoniano de fuerza: las interacciones son a distancia e instantáneas. Del primero de ellos ya era consciente el propio Newton, como pueden leer los alumnos en el texto. Esto explica la teoría de los torbellinos de Descartes y que Newton defendiese en su *Optica* la idea de un agente material (éter) que explicase la aparente acción a distancia. El segundo problema está implícito en el primero, pero en aquella época no se planteó porque no se conocía la existencia de una velocidad límite.

La actividad A.19 conduce a la introducción del campo gravitatorio como una realidad física, como una forma de existencia de la materia a través de la cual se propagan las interacciones. En otras palabras, clásicamente la materia se presenta en dos formas: partículas y campos, como iremos viendo en temas posteriores.

La actividad A.20 parte de la consideración de campo como región del espacio en la que actúan fuerzas sobre las masas, lo que permite definir la intensidad del campo gravitatorio g como la fuerza F por unidad de masa, $g = F/m$.

En la actividad A.21 los alumnos encuentran fácilmente que $g = GMu/r^2$. El profesor debe hacer notar que esta expresión junto con la anterior descomponen en dos pasos el problema de la interacción entre dos masas M y m . La expresión $g = GMu/r^2$ establece que la masa M crea alrededor de sí misma un campo $g(r)$.

Aunque los problemas propuestos en las actividades A.23, A.26 y A.27 sean sencillos, es conveniente comenzar analizando cualitativamente la situación y emitiendo hipótesis; a continuación, elaborar estrategias de resolución a partir de expresiones conocidas; después analizar los resultados y, por último, sustituir las variables por sus valores numéricos para ver los órdenes de magnitud involucrados. Es decir, conviene que el alumno razone que la intensidad de g coincide con la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre y que disminuye con la altura (¿qué sucederá para una altura $h = 2R_T$?). En la actividad A.26 el alumno debe pensar que g en Júpiter es menor que en la Tierra lo que explica la «ligereza» del astronauta Armstrong. Por último, la actividad A.27 debe facilitar la comprensión por los alumnos del principio de superposición. Estos sugerirán que el punto se encuentra más próximo a la Luna que a la Tierra.

En cuanto a la actividad A.24 los alumnos pueden mencionar la realización de medidas directas dejando caer un cuerpo libremente o por un plano inclinado y, conociendo el espacio recorrido y el tiempo utilizado para ello, determinar el valor de g en la superficie terrestre. Sin embargo esto no es fácil y, por ello, se utilizan métodos indirectos. Uno de los más sencillo se basa en la utilización del péndulo simple.

5. ESTUDIO ENERGÉTICO DE LA INTERACCIÓN GRAVITATORIA

En la actividad A.28 y en las siguientes se realiza una revisión de lo visto el curso anterior, profundizando en el aparato matemático, en las representaciones gráficas, etc. Así, se puede calcular el trabajo integrando las fuerzas gravitatorias:

$$W = \int_{r_1}^{r_2} -\frac{GMm}{r^2} dr = -\frac{GMm}{r_1} - \left(-\frac{GMm}{r_2}\right) = -\Delta E_p$$

Es decir, cuando el trabajo realizado depende únicamente de la posición de las partículas y no de la trayectoria, las fuerzas son conservativas. En estos casos podemos introducir una energía potencial asociada a la posición de las partículas que cumple $W_{\text{cons}} = -\Delta E_p$. Esta expresión nos dice que en una evolución espontánea del sistema, en la que sólo actúan las fuerzas conservativas del campo gravitatorio, se produce una disminución de la energía potencial.

Evidentemente si la trayectoria es cerrada, $W_{\text{cons}} = 0$.

Si en la actividad A.29 se toma $E_p(r \rightarrow \infty) = 0$, se puede definir la energía potencial del sistema formado por las masas M y m como $E_p = -GMm/r$.

La interpretación de la representación gráfica de $E_p(r)$ (una hipérbola negativa), propuesta en la actividad A.30, tiene interés para evitar que el análisis de gráficas se reduzca a la cinemática. La energía total E es constante y se representa mediante una línea horizontal. La energía cinética será $E_c = E - E_p$. Evidentemente, cuando la energía potencial E_p aumenta, la energía cinética E_c disminuye. Por otra parte, si $E < E_p$, entonces $E_c < 0$, lo cual es imposible; por ello, la región a la derecha de la hipérbola $E_p(r)$ se denomina clásicamente prohibida. Si $E_c < |E_p|$, entonces $E < 0$ y tenemos un sistema ligado, ya que la masa m sólo puede moverse desde la superficie de M hasta r . Se trata en este caso de trayectorias cerradas: elipses, circunferencias. Si $E_c \geq |E_p|$, entonces $E \geq 0$ y el sistema es libre, ya que m puede moverse desde la superficie ∞ . Se trata de trayectorias abiertas: parábolas ($E=0$) e hipérbolas ($E>0$). También se puede representar gráficamente $E_p(r)$ de la actividad A.27, encontrándose que existe una barrera de potencial entre la Tierra y la Luna.

La actividad A.32 debe conducir a un razonamiento del siguiente tipo: si el campo g es igual a la fuerza por unidad de masa $g = F/m$, podemos introducir la diferencia de potencial (ddp) ΔV como ΔE_p (o trabajo) por unidad de m , es decir, $\Delta V = \Delta E_p/m = -W/m$. Esta última expresión permite mostrar que existe la misma relación entre g e ΔV que entre F e ΔE_p :

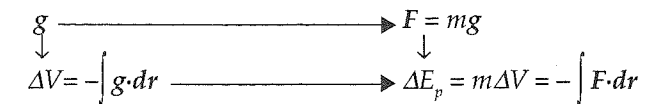
$$\Delta V = -\frac{W}{m} = \int g \cdot dr$$

Sin embargo, el interés del concepto de potencial gravitatorio reside en su paralelismo formal con el eléctrico. Pero físicamente no tiene la importancia de éste, como veremos en el tema correspondiente, dado que no se puede medir directamente como el eléctrico (sus unidades son el J/kg) y no se puede aplicar a múltiples situaciones. De hecho, el concepto de energía potencial fue el único que introdujo Lagrange en 1772, denominándolo función de fuerza.

La actividad A.33 permite establecer que, si se define un origen de potenciales (ver A.29), se tiene $V = -GM/r$.

En la actividad A.35 vemos que las superficies equipotenciales son esferas concéntricas y, por tanto, perpendiculares a las líneas de campo. Podemos demostrarlo matemáticamente: si una masa m se desliza por una superficie equipotencial un desplazamiento dr , se tiene que $dV = 0$ y, por tanto, $g \cdot dr = 0$, es decir, la superficie equipotencial y la línea de fuerza son perpendiculares. Por otra parte, el sentido del campo es el de los potenciales decrecientes.

Un posible mapa conceptual (actividad A.36) podría ser el siguiente:



Este esquema se puede particularizar para el caso de una masa esférica M .

6. MOVIMIENTO DE PLANETAS Y SATÉLITES

Los alumnos pueden mencionar en la actividad A.37 múltiples factores: desarrollo de las telecomunicaciones vía satélite, exigencias militares, información meteorológica, adquisición de nuevos conocimientos científicos, sobre la Tierra (recogen datos sobre las temperaturas superficiales, la capa de ozono, la vegetación, los procesos de desertización, etc.) y sobre el espacio exterior (telescopios sin perturbaciones atmosféricas, etc.).

En la actividad A.38, dado que la órbita de un satélite se encuentra en un plano que pasa por el centro de la Tierra, el satélite sólo puede estar fijo con respecto a la Tierra cuando su órbita es ecuatorial.

Los problemas planteados en las actividades A.39, A.40 y A.41 se pueden abordar como pequeñas investigaciones (Gil *et al* 1988). La supresión de los datos obliga a comenzar por el análisis cualitativo de la situación, a modelizarla, etc. Esto obliga a los alumnos a emitir hipótesis, pensar en los parámetros pertinentes y la forma en que intervienen. A continuación se pueden elaborar las estrategias de resolución. Por ejemplo, en el problema A.38 necesitamos conocer la energía en la órbita y en la superficie terrestre. Para calcular la primera necesitamos conocer la velocidad, que se puede determinar, en el caso de órbita circular, a partir de la relación entre la aceleración centrípeta y la fuerza gravitatoria. Se puede proseguir con el análisis de resultados, es decir, ver si es razonable, si se ajusta a lo que se podría esperar en situaciones sencillas y especiales -los casos límite, etc.-. Por último, conviene dar datos reales para que los alumnos puedan estimar órdenes de magnitud, etc. Así, por ejemplo, en el problema A.38, $h = 2000$ km; en el A.39, determinar el valor de la velocidad de escape en las superficies de la Tierra y de la Luna.

La actividad A.42 permite hacer notar que la velocidad de rotación de la Tierra sobre sí misma que, evidentemente, es mayor en el Ecuador que en los polos, se suma a la del cohete (siempre que el sentido de rotación del satélite sea el mismo que el de la Tierra). Por tanto la energía cinética que se ha de comunicar al cohete es menor para una órbita ecuatorial que para una polar.

Muchos alumnos han visto en la televisión, cine, etc., que los astronautas «flotan» (como también se suele decir). Por ello, piensan que la ingravidez, como se propone en la actividad A.43, se debe a que los objetos «celestes» no se comportan igual que los terrestres, porque se liberan de la atracción terrestre, etc. Esto es falso porque se encuentran en órbita debido la fuerza de atracción gravitatoria.

La actividad A.44 puede ayudar a clarificar esta aparente paradoja. Los cuerpos en el interior de un ascensor en caída libre parecen carecer de peso. Si la persona que va en el ascensor soltara un lápiz, éste no caería al suelo. Para un observador inercial exterior (un SRI), el lápiz cae con aceleración g . Pero también lo hace el suelo del ascensor y la persona.

A este hecho se le da el nombre de ingravidez aparente porque, en realidad, la gravedad sigue actuando sobre el cuerpo.

La ingravidez que experimentan los tripulantes de un satélite que gira alrededor de la Tierra en sus proximidades, si no actúan los cohetes, es la misma ingravidez aparente que se experimenta en un ascensor en caída libre. Tanto los cuerpos interiores del satélite como éste, tienen la misma aceleración, la de la gravedad.

Para un observador ligado al ascensor (por tanto, un sistema de referencia no inercial), la aceleración del lápiz es igual a la aceleración de la gravedad menos la aceleración del ascensor respecto al SRI o, también, la fuerza sobre el lápiz es la fuerza de la gravedad menos la fuerza de inercia. Esto puede clarificar que éstas se introducen como fuerzas ficticias en los SR acelerados, para poder aplicarles las leyes de Newton. (Se puede pedir a los alumnos que analicen las fuerzas que actúan sobre un objeto dentro del ascensor cuando arranca, cuando se mueve con M.R.U. y cuando se detiene, para ambos observadores). En caída libre la aceleración del ascensor es igual a la de la gravedad y, por tanto, la aceleración del lápiz respecto al ascensor es nula.

Un caso similar es el de un satélite en órbita. Su aceleración centrípeta es igual a la aceleración de la gravedad en cada punto y por tanto la aceleración del astronauta con respecto al satélite es nula.

Se presenta un caso totalmente diferente cuando una astronave está muy alejada de la Tierra y de otros cuerpos celestes. Entonces la fuerza gravitatoria debida a éstos será muy pequeña por ser las distancias muy grandes y los ocupantes de la astronave percibirán una ingravidez real.

7. LA SÍNTESIS NEWTONIANA Y SU EXTENSIÓN AL UNIVERSO

Los descubrimientos indicados en la actividad A.45 han expandido considerablemente los límites del Universo. En efecto, durante muchos siglos se consideró que su tamaño era el del Sistema Solar. Con Herschel y otros se amplía al de una galaxia: la Vía Láctea (se puede plantear a los alumnos cómo llegó a esa conclusión), cuyo diámetro actualmente se estima en 10^5 años-luz (a.l.) y su espesor máximo en 10^4 a.l. Y, por último, en la actualidad, al de una inmensidad de galaxias (la más próxima, Andrómeda, se encuentra a $2,5 \cdot 10^6$ a.l. y las más alejadas a 10^{10} a.l.). Con ello, se ha ampliado la validez de la gravitación universal, que actúa no sólo en el Sistema Solar y las galaxias, sino a escalas cósmicas, agrupando las galaxias en cúmulos y supercúmulos.

Si los alumnos no han realizado anteriormente la actividad A.46 se referirán a una gran variedad de interacciones. En caso contrario, saben que pueden reducirse a cuatro fundamentales: fuerte, electromagnética, débil y gravitatoria. Las nucleares (fuerte y débil) no cuentan a escala macroscópica, por su reducido alcance (aproximadamente el tamaño del núcleo, $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$). Por otra parte, de las dos que tienen alcance infinito, la interacción gravitatoria es la dominante. Aunque las electromagnéticas son unas 10^{38} veces más intensas, la gravitación es siempre aditiva y, en cambio, hay dos clases de carga eléctrica en la naturaleza que se neutralizan.

No se pretende que el alumno aprenda todos los fenómenos enumerados en el cuadro 3, de los que se ha dado una descripción muy simplificada. Su objetivo es mostrar el orden de magnitud del Universo y el hecho de que la interacción gravitatoria es la dominante en el Universo.

Con respecto a la actividad A.47, es muy fácil recopilar noticias referentes a los temas (la más reciente la colisión de los fragmentos del cometa Shoemaker-Levy con Júpiter), porque el interés que despiertan (pese a su alejamiento de la vida cotidiana) los convierte en noticia. En el tema de Relatividad se puede retomar la gravitación y la cosmología. En lo que concierne a los restantes temas también aparecen muchas noticias en los de Física moderna. P.ej., el reciente descubrimiento de la partícula t ; la participación de España en el CERN (típico problema de interacción CTS, donde la ausencia de retornos, debido a nuestro bajo nivel de I+D, provocaba que España contribuyese a financiar la investigación europea). En los restantes temas de Física clásica también aparecen noticias p. ej., sobre la contaminación acústica, las nuevas tecnologías ópticas (las fibras ópticas y la televisión por cable, los CD ROM, etc.), los efectos en la salud de las radiaciones electromagnéticas de baja frecuencia (ondas hertzianas, microondas), etc. Otro tema de interés de las noticias de prensa es la gran diferencia de criterios con que se juzga en la incultura científica respecto a otros ámbitos. Hay una gran preocupación por no incurrir en errores ortográficos, de vocabulario, etc., con la que, evidentemente, estamos de acuerdo. Cuando aparecen, provocan merecidas reacciones airadas en los lectores. Sin embargo, no existe el mismo cuidado (y, por supuesto, las mismas reacciones) cuando los errores corresponden a los conceptos científicos. Esto permite que se escriban disparates como «elementos químicos como los óxidos de nitrógeno» y un largo etc.

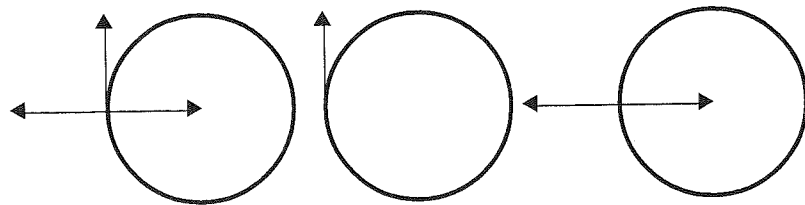
CRITERIOS DE EVALUACIÓN

1. Comprender que los conceptos, modelos o teorías de las ciencias físicas evolucionan y cambian con el tiempo.
2. Indicar los obstáculos que se opusieron al modelo heliocéntrico o las razones de aceptación del geocéntrico.
3. Aplicar el teorema de conservación del momento angular a un planeta del Sistema Solar.
4. Comprender la ley de Gravitación Universal y su importancia en la unificación de las mecánicas terrestre y celeste.
5. Utilizar la ley de Gravitación para determinar la masa de algunos cuerpos celestes (estrellas con planetas, planetas con satélites, etc.).
6. Utilizar el concepto de campo para superar las dificultades que plantea la interacción a distancia.
7. Analizar la gráfica de la energía potencial terrestre, indicando los tipos de movimiento posibles de un satélite según su energía total.
8. Aplicar el principio de conservación de la energía a un satélite.
9. Determinar la energía de un satélite en una órbita geostacionaria.

- Valorar el informe del trabajo práctico realizado, por ejemplo, la determinación de g mediante un péndulo simple.
- Analizar un resultado, por ejemplo, la velocidad de escape de un satélite.

ACTIVIDADES DE EVALUACIÓN

- Señalar los científicos que desarrollaron el modelo heliocéntrico y sus principales contribuciones. ¿Contra qué obstáculos tuvieron que combatir?
- A unos estudiantes se les ha pedido que representen las fuerzas que actúan sobre la Luna en su movimiento alrededor de la Tierra y han realizado los siguientes dibujos. Analizar los resultados y si no se está de acuerdo con ninguno, proponer otro dibujo.

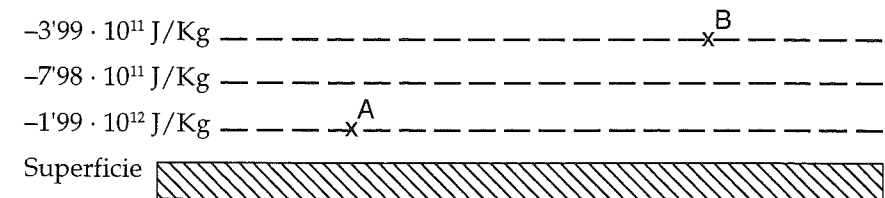


- La velocidad orbital de la Tierra cuando se encuentra cerca del Sol es mayor que cuando se encuentra más alejada. Relacionar este hecho con el principio de conservación de la energía.
- La fuerza que la Tierra ejerce sobre un cuerpo de masa m resulta proporcional a dicha masa pero la intensidad del campo gravitatorio es independiente del valor de la masa. Justificar este hecho.
- ¿Por qué se dice que la ley de la Gravitación unificó las mecánicas terrestre y celeste?
- Hallar en qué punto, entre la Luna y la Tierra, la intensidad del campo gravitatorio es nula, y calcular la energía cinética que debe tener una nave, que se lanza desde la superficie de la Tierra para llegar a dicho punto.
(Datos: $M_T = 81 M_L = 5,98 \cdot 10^{24}$ kg; $R_T = 3,66 R_L = 6370$ km; $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ N.m²/kg²; $d_{TL} = 60 R_T$).
(Selectividad. 1988)
- Al realizar la experiencia del péndulo simple se han obtenido los siguientes valores de la longitud y del periodo de oscilación:

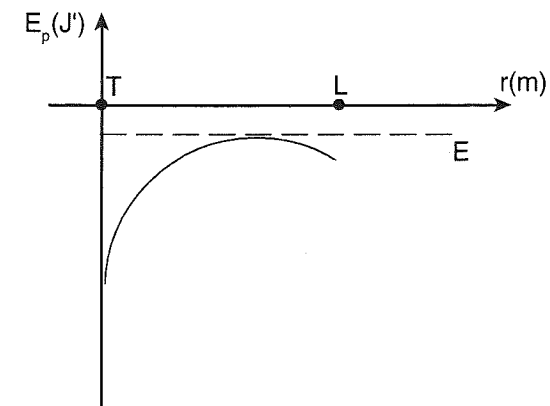
l (m)	T(s)
1,27	2,30
1,47	2,44
1,67	2,68
1,87	2,76

A partir de los valores anteriores, determinar el valor de la aceleración de la gravedad.

- Se lanza verticalmente un satélite desde la superficie de la Tierra. A una determinada distancia se apagan sus motores y es atraído por la Tierra. Dibujar la gráfica de la variación de la velocidad del cohete en función de la posición desde el momento en que es lanzado.
- En la figura aparecen varias superficies equipotenciales del campo gravitatorio terrestre, cerca de la superficie.
Calcular:
a) la energía potencial de un cuerpo de 8 kg en los punto A y B.
b) el trabajo necesario para llevar un cuerpo de 8 kg desde el punto A al punto B.
c) la velocidad de un cuerpo en el punto A si en el punto B es 0 m/s.



- Calcular la velocidad de un meteorito cuando llega a la superficie terrestre si proviene de un lugar muy lejano a la Tierra.
- Justificar que la energía total de un satélite en una órbita circular permanece constante.
- Un satélite se mueve en una órbita circular alrededor de la Tierra. El periodo es de 30 horas y el radio de la órbita $4,90 \cdot 10^7$ m. Si el satélite pone en marcha sus motores y pasa a otra órbita circular de forma que su velocidad en ella es 4.000 m/s, calcular el periodo y el radio de la nueva órbita. ($G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ S.I.; $M_T = 5,98 \cdot 10^{24}$ kg; $R_T = 6,37 \cdot 10^6$ m).
- La energía total de un satélite artificial lanzado desde la Tierra hacia la Luna está representada en la siguiente gráfica:



Analizar la gráfica e indicar el movimiento que realiza el satélite. ¿Qué sucederá si la energía total E está por debajo del máximo de la energía potencial?

14. Se lanza un satélite de 5.000 kg desde la superficie de la Tierra para colocarlo en una órbita situada a 4.000 km de altura. Calcular:
- la velocidad que tendrá el satélite en su órbita.
 - el periodo.
 - la energía potencial del satélite.
 - la energía cinética del satélite.
 - la energía total del satélite.
 - la energía necesaria para poner al satélite en órbita.
 - la velocidad mínima necesaria para poner al satélite en órbita.
($G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ S.I.; $M_{\text{Tierra}} = 5,98 \cdot 10^{24}$ kg; $R_{\text{Tierra}} = 6.370$ km).
15. Señalar aplicaciones de los satélites artificiales.

BIBLIOGRAFÍA

- CARRASCOSA, J. y GIL, D., 1992, Concepciones alternativas en mecánica, *Enseñanza de las Ciencias*, 10 (3), 314-328.
- DOMENECH, J. L.; GIL, D. y MARTINEZ, J., 1989, La reconstrucción de la síntesis newtoniana como requisito para un cambio conceptual efectivo en mecánica, *Enseñanza de las Ciencias*, nº extra, tomo 1.
- SOLBES, J. y MARTIN, J., 1991, Análisis de la introducción del concepto de campo, *Revista Española de Física*, 5, 34-40.

2. VIBRACIONES Y ONDAS

En la actividad A.1 se pueden mencionar los fenómenos en los que un cuerpo oscila en torno a una posición de equilibrio, como es el caso de un péndulo, una masa unida a un muelle, una regla de plástico sujeta por un extremo, una cuerda vibrante de una guitarra etc. Para mostrar la generalidad del movimiento vibratorio, se pueden añadir las vibraciones de los coches cuando pasan por un bache, o la de los edificios y puentes cuando pasan camiones pesados. En efecto, como la mayoría de los sólidos son elásticos, vibrarán cuando reciban un impulso. Además, en los circuitos de radio y televisión se producen oscilaciones eléctricas. A nivel microscópico, los átomos vibran en las moléculas o en los sólidos en torno a sus posiciones de equilibrio. En ocasiones los alumnos olvidan alguno de estos casos sencillos y mencionan estos últimos, por influencia de otras asignaturas.

En cuanto a las ondas, los alumnos pueden señalar las que se producen en cuerdas o muelles, en la superficie de los líquidos, el sonido, las ondas sísmicas, etc.

En una primera aproximación pueden decir que son fenómenos íntimamente ligados, pues las ondas tienen por origen una vibración. De hecho, los trabajos de Mersenne y Sauveur se basaron en el estudio sistemático de cuerdas vibrantes para determinar la frecuencia del sonido.

La bibliografía sobre ideas previas de este tema resulta muy escasa. En las recopilaciones sobre Mecánica aparecen preconcepciones sobre muelles (Driver *et al* 1989, Hierrezuelo y Montero 1989, Carrascosa y Gil 1992). Un trabajo reciente de Maurines (1992) hace referencia a dos dificultades que aparecen en el estudio de la propagación de señales mecánicas: las asociadas al manejo de más de dos variables y la idea de que las fuentes parecen comunicar «algo» (una fuerza, etc.) a la cuerda.

1. EL MOVIMIENTO VIBRATORIO

Como se trata de un movimiento periódico, en la actividad A.2 será necesario considerar el tiempo que tarda en producirse una oscilación completa, el periodo, o bien su inversa, el número de oscilaciones que se producen en un segundo, es decir, la frecuencia. Además, necesitaremos la distancia con respecto al punto de equilibrio, denominada elongación. La elongación máxima es la amplitud.

Con respecto a la actividad A.3, los alumnos pueden decir que la fuerza es proporcional a elongación y de sentido contrario, $F = -kx$. Esta expresión es otra forma de enunciar la ley de Hooke, vista el curso anterior. La ecuación que se obtiene es

$$ma = -kx,$$

es decir,

$$d^2x/dt^2 = -(k/m)x$$

ecuación diferencial lineal con coeficientes constantes que no podemos resolver integrando. Todos los fenómenos vibratorios antes mencionados tienen en común el poder ser descritos mediante ecuaciones de este tipo.

Con referencia a la actividad A.4, los alumnos ya saben que el movimiento de vaivén del pistón se transforma en el movimiento circular de las ruedas por medio de las bielas, por lo

que pueden relacionar el MAS con el MCU. El profesor resaltará que la proyección del MCU sobre uno de los diámetros puede ser un MAS si cumple que $a = -cte \cdot x$

A partir de la figura resulta fácil comprobar en la actividad A.5 que

$$x = A \sin \omega t$$

donde $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$, por lo que también se denomina frecuencia angular. Derivando sucesivamente obtenemos

$$v = A\omega \cos \omega t$$

$$a = -A\omega^2 \sin \omega t = -\omega^2 x$$

Se puede ver así que la hipótesis era cierta y que se trata efectivamente de un MAS. Sin necesidad de utilizar el MCU, se puede comprobar inmediatamente que sólo las funciones seno y coseno cumplen la condición de que sus derivadas segundas son proporcionales y de signo contrario a la propia función y son, pues, solución de aquella ecuación.

En las actividades A.6 y A.7 se plantea un trabajo práctico abordado como investigación. La actividad A.6 permite a los alumnos señalar, a título de hipótesis, que el periodo T puede depender de la masa m, de la constante k, etc. A continuación (A.7) se trata de diseñar una experiencia para comprobarlo. Puede consistir en un muelle del que se suspenden diversas masas y que se hace oscilar para cada una de ellas. Al realizarla y analizar sus resultados se obtiene que $T = 2\pi(m/k)^{1/2}$ o, también, $\omega = (k/m)^{1/2}$. Este resultado concuerda con el que se deduce a partir de la ecuación dinámica del sistema $-kx = ma = -m\omega^2 x$.

En la actividad A.8 la obtención analítica nos lleva a $ma = -mg \sin \Phi$, que es proporcional al $\sin \Phi$ y no al propio ángulo Φ , por lo que no será un MAS. Para ángulos Φ pequeños (menores que 15°), la diferencia entre Φ y $\sin \Phi$ es inferior al 1%. Podemos poner $a = -g\Phi = -(g/l)x$ y, por tanto, $T = 2\pi(l/g)^{1/2}$.

La actividad A.9 ofrece un notable interés porque permite aproximarnos a las vibraciones reales y, por tanto, no armónicas. La amplitud de oscilación del sistema disminuye con el tiempo hasta que se detiene. Este movimiento se denomina armónico amortiguado. El amortiguamiento suele deberse a la resistencia del aire y al rozamiento interno del sistema. Para mantener las oscilaciones se aplica una fuerza exterior periódica (vibración forzada). La amplitud de oscilación del sistema y, por tanto, la energía absorbida son máximas cuando la frecuencia ν de la fuerza aplicada coincide con la ν_0 del sistema. Este fenómeno se conoce con el nombre de resonancia.

2. GENERALIDADES SOBRE LAS ONDAS. ELABORACIÓN DE UN MODELO SOBRE SU NATURALEZA

En la actividad A.10 los alumnos indican que la perturbación se puede propagar gracias a la transmisión de las vibraciones del foco a las partículas adyacentes del medio que se ponen también a vibrar. El proceso continúa y permite que la perturbación originada en el foco se propague por el medio. Es conveniente subrayar la necesidad de éste en la transmisión de las ondas mecánicas.

La actividad A.11 permite la introducción de las ondas longitudinales y transversales. Se pueden poner de manifiesto mediante varios péndulos unidos en línea, cuerdas, muelles, etc.

La actividad A.12 introduce desde el principio las ondas sonoras, lo que permitirá seguir utilizándolas como ejemplo en cada uno de los apartados ulteriores. A su vez pone de manifiesto que las ondas transversales necesitarán un medio en que las partículas estén unidas, para que puedan transmitir la vibración. Por lo tanto, no se propagan en fluidos. Un ejemplo clásico lo constituyen las ondas sísmicas transversales (ondas S) y longitudinales (ondas P). Las S no se propagan en el núcleo de la Tierra, lo que permitió a los geofísicos descubrir que se encontraba en estado de fusión.

Como el sonido se propaga en gases, líquidos y sólidos (recordar el ejemplo de los indios escuchando en los raíles del tren), se tratará de una onda longitudinal, es decir, sucesivas compresiones y enrarecimientos del medio. Esto permite, además, preguntar a los alumnos en qué caso es mayor la velocidad del sonido e introducir así su dependencia de la densidad del medio (en el aire, el agua y el acero las velocidades son alrededor de 340, 1.500 y 5.000 m/s, respectivamente).

El ejemplo visual de la actividad A.13 facilita la introducción por los alumnos del concepto de frente de onda, así como las magnitudes de las ondas: amplitud A, longitud de onda λ , el periodo T y la frecuencia ν . La longitud de onda y el periodo caracterizan, respectivamente, la periodicidad espacial y temporal de la onda. Es ilustrativo relacionarlos entre sí. El periodo T es el tiempo que tarda el foco en emitir dos frentes de onda consecutivos, la frecuencia ν es el número de frentes emitidos por unidad de tiempo, la longitud de onda λ es la distancia entre dos frentes consecutivos y, también, la distancia que parece recorrer un frente de ondas en un tiempo igual al periodo $\lambda = \nu T$. Por tanto, la velocidad de propagación de la onda es $v = \lambda \nu$. Dicha velocidad no se debe confundir con la velocidad de vibración de las partículas del medio.

La respuesta a la actividad A.14 debe ser, lógicamente, que se propaga energía y cantidad de movimiento. Es conveniente poner ejemplos en los que se vea que ocurre esto: la onda expansiva de una explosión, las ondas sísmicas, etc. Esta característica, como veremos, es compartida por las ondas electromagnéticas, lo que refuerza el carácter material de éstas y, por tanto, de los campos que las constituyen que no se deben considerar como un mero artificio matemático.

3. ECUACIÓN DEL MOVIMIENTO ONDULATORIO

En la actividad A.15. se debe tener en cuenta que, al llegar la onda al punto considerado en el instante t, se cumple

$$y = A \sin \omega(t-t') = A \sin \omega(t-x/v) = A \sin 2\pi(t/T - x/\lambda)$$

Si la fase inicial no es cero, tendremos que añadir una constante δ , de modo que la ecuación, en su forma más general, será

$$y = A \sin (\omega t - kx + \delta)$$

donde $k = 2\pi/\lambda$ se denomina número de ondas.

La representación gráfica de la actividad A.16, permite a los alumnos visualizar la doble periodicidad temporal (la elongación de cada punto se repite a intervalos regulares de tiempo T) y espacial (en un determinado instante, las elongaciones de los puntos del medio se

repiten a distancias regulares λ). El apartado c, al presentar la imagen de la perturbación en sucesivos instantes de tiempo (por ejemplo, $0, T/4, T/2, 3T/4$ y T), da una visión más dinámica de ésta (fotografías sucesivas), facilitando la comprensión de la propagación de la perturbación. Por último, señalar que conviene evitar que los alumnos identifiquen las ondas con las ondas sinusoidales exclusivamente. Para ello se pueden mostrar otros tipos utilizando un osciloscopio.

Las actividades A.17 y A.18 permiten obtener respectivamente las magnitudes de la onda, conocida su ecuación y determinar la ecuación a partir de las magnitudes.

La actividad A.19 nos permite introducir la diferencia de fase entre dos puntos del medio

$$\Delta\phi = 2\pi(x_2 - x_1)/\lambda$$

que nos sirve para comparar los valores de la perturbación en dichos puntos. Así, dos puntos están en el mismo estado de vibración o en concordancia de fase si $\phi = 2n\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) y, por el contrario, están en oposición de fase si $\phi = (2n+1)\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$). Este hecho será de utilidad al comparar los valores de las perturbaciones que varias ondas pueden producir en un mismo medio, es decir, al estudiar las interferencias.

4. PROPIEDADES DE LAS ONDAS

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

No es difícil, en la actividad A.20, llegar a la conclusión de que la energía que transporta una onda es $1/2 kA^2$, es decir, directamente proporcional al cuadrado de la amplitud. El profesor debe insistir sobre la validez general de esta conclusión (pese a haber sido obtenida en un caso particular) y sobre su utilización posterior en Electromagnetismo y en la Física moderna.

La actividad A.21 permite la introducción de la intensidad de una onda. Se debe llegar a que dicha intensidad es proporcional a la energía de la onda e inversamente proporcional al tiempo y a la superficie (la energía se distribuye uniformemente en todo el frente de ondas, repartiéndose cada vez entre más puntos). Por tanto, la intensidad es el flujo de energía por unidad de superficie y tiempo, es decir, $I = E/St = P/S$. Su unidad en el S.I. es W/m^2 .

En la actividad A.22 se plantea el fenómeno de la atenuación. Ya se ha visto que, a medida que avanza la onda, la energía inicial se reparte entre un número mayor de partículas del medio. En el caso de una onda esférica se cumple que $I = P/4\pi r^2$. Este fenómeno recibe el nombre de atenuación de la onda. Por tanto, $I_1/I_2 = r_2^2/r_1^2$. Puesto que la intensidad depende del cuadrado de la amplitud A , ésta será inversamente proporcional a la distancia, cumpliéndose $A_1/A_2 = r_2/r_1$.

El alumnado puede señalar en la actividad A.23 que la absorción es el debilitamiento que se produce en la onda a medida que la energía va siendo absorbida por el medio. La aplicación del principio de conservación de la energía conduce fácilmente a sugerir que una parte de la energía incidente se refleja en la pared, otra es absorbida y la restante se transmite, es decir; $I_0 = I_r + I_a + I_t$.

La actividad A.24 introduce los factores de los que depende la absorción de una onda al atravesar un medio. La variación de la intensidad debida a la absorción, dI , es directamente

proporcional a la intensidad I , a la distancia dx y las características del medio, que se tienen en cuenta en el coeficiente de absorción α , es decir, $dI = -I\alpha dx$. Integrando esta expresión obtenemos que $I = I_0 e^{-\alpha x}$. De acuerdo con esta expresión, la intensidad decrece exponencialmente con la distancia recorrida. Es una actividad interesante porque dicha ecuación reaparece en muchos ámbitos de la Física: las desintegraciones nucleares, la variación de la velocidad de un móvil sometido a una fuerza de rozamiento proporcional a dicha velocidad, etc.

La actividad A.25 permite poner de manifiesto la idea errónea del alumnado de que la longitud de onda disminuye cuando se amortigua la onda.

4.2. Difracción

La actividad A.26 permite que los alumnos indiquen que la luz se propaga en línea recta, en tanto que el sonido parece doblarse, contornear los obstáculos. Si no se ha hecho hasta aquí, es conveniente introducir el concepto de rayo (perpendicular al frente de ondas) para visualizar la situación.

La actividad A.27 facilita la introducción del principio de Huygens: «Todo punto del medio alcanzado por una onda se convierte en foco (secundario) de emisión de ondas». La infinidad de ondas secundarias no se perciben normalmente, sino su envolvente, que constituye el frente de ondas. Es muy conveniente utilizar la cubeta de ondas para visualizar la difracción y, en las actividades sucesivas, la interferencia, la reflexión y refracción, etc.

La experiencia con la cubeta (A.28) confirmará que la difracción sólo es observable cuando el tamaño de la rendija es menor o del orden de la longitud de onda. Por el contrario, si la rendija es mayor que la longitud de onda, no hay difracción. También se puede producir difracción con objetos cuyo tamaño respecto a la longitud de onda cumpla las condiciones de la rendija. Esto permite completar la actividad A.25, subrayando que el tamaño de la puerta o ventana es grande comparado con la longitud de onda de la luz y que por ello no se difracta. Con el sonido sucede lo contrario y por eso lo percibimos.

4.3. Interferencias

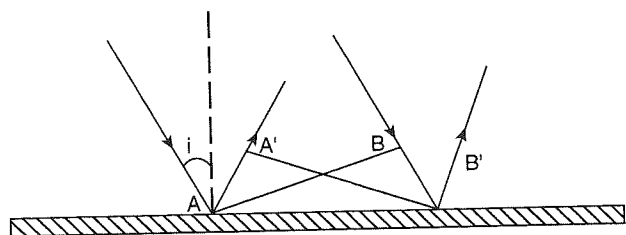
La actividad A.29 permite establecer ideas iniciales cualitativas sobre la interferencia. Así, cuando en un punto dado coincidan dos crestas o dos valles se producirá un reforzamiento, mientras que si coinciden una cresta con un valle se producirá un debilitamiento (un ejemplo más del principio de superposición, tan usado en la Física). El profesor debe hacer notar que la situación no es tan sencilla. Es necesario que las ondas sean coherentes y esto no es fácil que suceda con focos independientes. En la práctica, para conseguir dos focos coherentes se procede a dividir la onda procedente de un único foco, aprovechando el fenómeno de difracción a través de dos o más rendijas, tal como se puede comprobar en la actividad A.30. Es interesante que los alumnos dibujen esta experiencia de Young, indicando en qué puntos se producen interferencias constructivas y destructivas.

En la actividad A.31 los alumnos pueden plantear, a partir de la ecuación obtenida en la A.19 $\Delta\phi = 2\pi(x_2 - x_1)/\lambda$, que las ondas están en concordancia de fase (interferencia constructiva) si $\Delta x = n\lambda$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) y en oposición (interferencia destructiva) si $\Delta x = (2n+1)\lambda/2$ ($n = 0, 1, 2, \dots$).

La actividad A.32 es una simple aplicación numérica de la anterior.

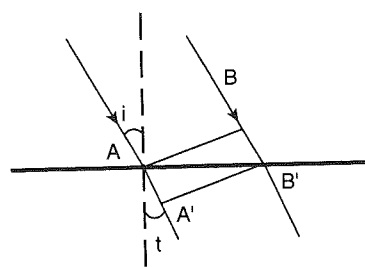
4.4. Reflexión y refracción

La actividad A.33 introduce la reflexión del movimiento ondulatorio. Cuando el primer punto A del frente de ondas AB llega a la superficie de separación de los dos medios, se transforma en centro secundario de ondas, que se propagan con velocidad v hacia el mismo medio. Los restantes puntos del frente de ondas van llegando a la superficie y con ellos ocurre lo mismo que con el punto A. El frente de ondas reflejado A'B' será la envolvente de las ondas secundarias producidas en la superficie. Los triángulos ABB' y AA'B' son iguales por ser rectángulos, tener AB' común y ser AA' = BB' (por desplazarse a la misma velocidad). De ello se deduce que $i = r$. El profesor debe señalar que un obstáculo intercepta y refleja apreciablemente la onda si λ es algunas veces menor que el tamaño del objeto. Si es comparable se produce, como ya sabemos, difracción.



La actividad A.34 permite hacer notar que cuando la distancia entre el observador, la fuente y el obstáculo son pequeñas, se superponen en el oído las sensaciones sonoras produciendo el efecto llamado reverberación. Se podría plantear al alumno qué cabría hacer para mejorar la acústica de una sala donde suceda esto.

En la actividad A.35 se debe llegar a la construcción de la onda refractada. De la figura se deduce que $\sin i = BB'/AB'$ y $\sin t = AA'/AB'$ de donde resulta que $\sin i / \sin t = BB'/AA'$. Como BB' y AA' son las distancias recorridas por la onda en ambos medios, resultará, por tanto $\sin i / \sin t = v_1/v_2$.



4.5. Ondas estacionarias

La actividad A.36 permite establecer que no pueden producirse ondas cualesquiera en un medio confinado, sino únicamente aquéllas que en los extremos del medio (en este caso la cuerda) tengan un valor nulo (nodos). Además de estos dos nodos de los extremos, la onda puede tener otros que no se desplazan. De ahí que la onda se denomine estacionaria. Entre los nodos podemos distinguir otros puntos en los que la perturbación alcanza valores máximos y reciben el nombre de vientres.

De la actividad A.37 resulta fácil concluir que, para que la perturbación sea nula en los extremos, L ha de contener un número entero de semilongitudes de onda, es decir, $L = n\lambda/2$ ($n = 1, 2, \dots$). Conviene resaltar que λ no puede tomar valores cualesquiera. Es decir, es la primera vez en la Física clásica que aparece una magnitud cuantizada, que sólo puede tomar valores discontinuos dados por el número n ($\lambda = 2L/n$). La importancia de este hecho aparecerá claramente al introducir la Física cuántica.

4.6. Efecto Doppler

De acuerdo con la figura de la actividad A.38, el observador O' (al que se le acerca) recibirá un número mayor de frentes de onda por segundo, por lo que la frecuencia que percibe será mayor. Es decir, el tono del sonido será más agudo o alto. Por el contrario, el observador situado detrás recibirá un número menor de frentes por segundo y percibirá un tono más grave o bajo. Se puede justificar la introducción del efecto Doppler porque en Óptica también se utilizará para explicar el desplazamiento al rojo del espectro de las galaxias, de tanta importancia para la comprensión de la estructura del Universo.

Para resolver la actividad A.39 se debe considerar que, al moverse el foco con velocidad superior a la de las ondas en el medio, la distancia entre los frentes de onda disminuye a lo largo de los lados y al superponerse forman un frente de ondas cónico que es la onda de choque. Un avión con velocidad supersónica produce dos estampidos (la onda de choque frontal y la de la cola), que pueden producir roturas de cristales, etc. Aunque el despegue de dicho tipo de aviones se realice a velocidades subsónicas, se necesita mayor velocidad (lo que significa más ruido) que los aviones normales, porque sus alas tienen un perfil más simétrico para sus grandes velocidades y, en consecuencia, proporcionan menor fuerza de elevación. Otro grave inconveniente que presentan los vuelos supersónicos es que la energía consumida por pasajero y kilómetro resulta algo mayor que para los vuelos convencionales y mucho mayor que para el viaje en tren.

5. LA ACÚSTICA Y SUS IMPLICACIONES

En la actividad A.40 se indicarán las múltiples fuentes de contaminación urbana: el tráfico, los medios de transporte (los aviones, el ferrocarril, etc.), las obras públicas o la construcción, las industrias pesadas en el casco urbano, los locales con música estridente, los vecinos, etc. En la industria son las propias máquinas o defectos, no subsanados en ellas por negligencia.

La actividad A.41 permite señalar que la falta de sensibilidad en nuestro país, si se compara con los países más avanzados, quizá sea debida al desconocimiento de los efectos del ruido en la salud y en la calidad de vida. También a una falta de conciencia cívica que debería desarrollarse en un colectivo, el alumnado, bastante aficionado al ruido: motocicletas, música estridente, etc. Entre los efectos perniciosos cabe mencionar: la sordera de las personas, en especial, los trabajadores sometidos a niveles elevados de ruido durante años, y las interferencias en el sueño (p. ej., el 30% de las personas de Valencia ve perturbado su sueño por niveles de ruido elevados). Otros efectos menos conocidos son el aumento del ritmo cardíaco y de la actividad eléctrica muscular, la hipertensión, las alteraciones del sistema nervioso (en uno de cada tres pacientes), etc.

La forma de combatirlos es la adopción de medidas para proteger a la población de este tipo de contaminación: barreras en las autopistas, control de tubos de escape, insonorización de locales, limitación del volumen de la música, etc. Es decir, no se trata sólo de una legislación adecuada, sino de vigilar su cumplimiento. Lo mismo sucede en la industria, donde los medios pasan por la utilización de paneles acústicamente aislantes, instalación de amortiguadores y soportes antivibratorios, el recubrimiento de paredes o techos con paneles absorbentes, los equipos protectores personales, etc. (García 1988).

A partir de las consideraciones anteriores se pueden determinar las intensidades en la actividad A.42. Pero el principal objetivo de esta actividad y de la A.43 reside en la sensibilización sobre la contaminación acústica, al mostrar que la mayor parte del día estamos expuestos a niveles sonoros superiores a los recomendados por los expertos. Los sonómetros no profesionales tienen precios competitivos que permiten su adquisición por el Centro. Su utilización permite familiarizar al alumno con la escala de decibelios y le da un carácter más experimental a esta parte de la acústica. También se puede utilizar un osciloscopio y un micrófono, pero estos dispositivos resultan más caros que el sonómetro.

CRITERIOS DE EVALUACIÓN

1. Comprender el movimiento vibratorio, y el movimiento ondulatorio como la propagación del primero en un medio.
2. Resolver problemas de determinación de las magnitudes características de una onda a partir de su ecuación y viceversa.
3. Comprender las principales propiedades de las ondas: amortiguamiento, interferencia, difracción, reflexión y refracción.
4. Representar gráficamente (mediante frentes de onda, rayos, etc.) diversos fenómenos ondulatorios (reflexión, refracción, interferencias, difracción).
5. Asociar las magnitudes características de una onda a su percepción sensorial (frecuencias bajas y altas a sonidos graves o agudos, la amplitud con la intensidad, etc.).
6. Recapitular las propiedades características de las ondas que las diferencian de los haces de partículas.
7. Valorar la memoria del trabajo práctico realizado como una pequeña investigación, por ejemplo, el estudio del periodo de oscilación de un muelle.
8. Señalar, a título de hipótesis, de que dependerá la variación de la intensidad de una onda al atravesar un medio.
9. Valorar la potencia del modelo de onda para explicar diversos fenómenos cotidianos, desde el eco a la contaminación acústica.
10. Indicar posibles soluciones a la contaminación acústica.

ACTIVIDADES DE EVALUACIÓN

1. Al hacer oscilar un muelle se han obtenido las elongaciones que aparecen en la tabla siguiente:

Tiempo (s)	Elongación (cm)
0,00	7,00
0,10	6,47
0,20	4,95
0,30	2,67
0,40	0,00

- ¿Se trata de un MAS? En caso afirmativo, determinar las magnitudes que lo caracterizan. Escribir la ecuación de la elongación, velocidad y aceleración del movimiento.
2. Representar las variaciones, en función de la posición, de la energía cinética y potencial que tienen lugar en un muelle que oscila.
3. En una cubeta de ondas se producen ondas esféricas desfasadas π radianes. La amplitud de las ondas producidas por el primer generador es el triple de las producidas por el segundo. Dibujar el desplazamiento en función del tiempo que se produce en un punto equidistante de los dos generadores.
4. Dentro de una habitación se encuentran varias personas hablando. Si se escuchan los sonidos a través de una puerta, ¿cuáles se percibirán mejor: los agudos o los graves? Justificar la respuesta.
5. Explicar por qué podemos asegurar que el sonido es una onda y no un haz de partículas pequeñísimas que van desde el foco del emisor hasta el oído.
6. Una persona situada a 5 m de un altavoz escucha los sonidos producidos por el mismo. Si la potencia del altavoz se reduce a la tercera parte y la persona quiere percibir la misma intensidad, calcular la distancia a la que se debe colocar.
7. Una persona sopla por el extremo de un tubo manteniendo el otro cerrado. De esta forma produce un sonido de una determinada frecuencia. Si se abre el extremo del tubo, ¿qué relación existe entre la frecuencia obtenida y la anterior?
8. Justificar la distancia que existe entre:
 - a) dos nodos sucesivos.
 - b) dos vientres sucesivos.
 - c) un nodo y un vientre sucesivo de una onda estacionaria.
9. Valorar críticamente el papel jugado por el ruido en la vida de los hombres.
10. Sugerir medidas para disminuir el nivel de ruido del centro de estudios.

11. La relación señal/ruido de las pletinas de gran calidad es a 90 dB. Calcular la relación entre las intensidades de la señal y del ruido de fondo.

BIBLIOGRAFÍA

CARRASCOSA, J. y GIL, D., 1992, Concepciones alternativas en mecánica, *Enseñanza de las Ciencias*, 10 (3), 314-328.

GARCÍA, A., 1988, *La contaminación acústica*, Servei de Publicacions Universitat de València.

MAURINES, L., 1992, Los estudiantes y la propagación de las señales mecánicas: dificultades de una situación de varias variables y procedimientos de simplificación, *Enseñanza de las Ciencias*, 10 (1), 49-59.

SEGUNDA PARTE

EL PODER UNIFICADOR DE LA FÍSICA: EL ELECTROMAGNETISMO

3. ÓPTICA

En la introducción de la primera parte hemos visto algunos inconvenientes de un posible enfoque de la Física de Bachillerato que comenzase por interacciones (gravitatoria y electromagnética) y prosiguiese con ondas (incluyendo vibraciones y ondas y óptica). Aquí mostraremos otros.

En primer lugar, sería necesario considerar la luz como una onda, lo que nos impediría mostrar el costoso esfuerzo de la Óptica desde la antigüedad 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. Este proceso, a su vez, permite mostrar muchas características del trabajo de los científicos y de la propia naturaleza de la ciencia.

A continuación se aborda la Electricidad y el Magnetismo, estudios que, aparentemente, no tienen nada que ver con la luz. Es muy conveniente realizar un tratamiento cualitativo de la síntesis electromagnética, que permitirá que los estudiantes vean cómo se integran en un mismo cuerpo de conocimientos la Óptica, la Electricidad y el Magnetismo, que se constituyen así en el otro gran pilar de ese imponente edificio que es la Física clásica.

Sin embargo, esto no deja cerrado el tema de la luz. La experiencia de Hertz, que permitió la confirmación de la síntesis de Maxwell, paradójicamente, puso de manifiesto por primera vez el efecto fotoeléctrico.

Dado que la Óptica es un dominio en el que los alumnos tienen múltiples experiencias previas, sus preconcepciones al respecto son abundantes. Por ello en los países de nuestro entorno la investigación sobre dichas ideas previas es muy abundante. Se ha realizado con alumnos de 10 a 15 años, en temas muy básicos como la naturaleza y propagación de la luz, la formación de sombras, la reflexión, el papel de la lupa, etc. (dichas ideas aparecen en Driver et al 1989 y Hierrezuelo y Montero 1989). Para una bibliografía más extensa remitimos a la reseña de Perales (1987). En nuestro país la investigación es muy escasa.

En un trabajo reciente, Solbes y Zacarés (1993) realizan un análisis sobre la enseñanza habitual de la Óptica (aparece Óptica geométrica en séptimo curso de EGB y segundo de BUP; en tercer curso de BUP y en COU se encuentran temas de movimiento ondulatorio y en COU un tema titulado «Naturaleza de la luz. Dualidad onda-corpúsculo») que se caracteriza por no tener en cuenta las preconcepciones de los alumnos e introducir, además, errores conceptuales; dar más importancia a ciertas expresiones matemáticas (p.ej., onda armónica plana) que a la comprensión de los conceptos sobre la luz, sus interacciones con la materia y, en particular, a la visión de los objetos; no clarificar las relaciones entre los diversos modelos sobre la luz, sus límites, diferencias, etc.; no tener en cuenta las múltiples aplicaciones de la Óptica y sus implicaciones sociales.

Así mismo en dicho trabajo se constata la persistencia de ideas previas en alumnos de 15 a 18 años. Entre ellas señalaremos la confusión entre fuentes y luz, la limitación del alcance de la luz a sus efectos visibles, consideran que la luz se ve, limitan el mecanismo de la visión a la iluminación del objeto por la luz (ignorando que ésta se refleja luego hasta los ojos), no distinguen entre reflexión dirigida y difusa, consideran que las imágenes se «proyectan» y que el color es una propiedad de los objetos independiente de la luz, etc.

Todo lo anterior es un ejemplo más de la enseñanza de las ciencias fisicoquímicas a la que nos hemos referido en la introducción de este libro, que no tiene en cuenta las ideas previas de los alumnos; es operativa; ofrece una visión lineal y acumulativa y no muestra las interacciones CTS. Y esto es particularmente grave en un dominio como la Óptica, que:

- está impregnado de preconcepciones por responder a experiencias previas.
- permite usar dispositivos sencillos de manejo fácil y cotidiano (espejos, lentes, cámaras fotográficas, etc.) que apenas se utilizan en una enseñanza centrada en los contenidos y las «fórmulas».
- ha sido objeto de estudio desde la antigüedad por lo que existen múltiples modelos explicativos. Entre ellos se pueden mencionar los siguientes: los griegos (luz como partículas que los cuerpos proyectan sobre el ojo o algo que emite el ojo); Huygens y Hooke (luz como vibraciones en un medio); Descartes y Newton (luz como corpúsculos); Young y Fresnel (luz como ondas periódicas y transversales); Maxwell y Hertz (luz como ondas electromagnéticas); Einstein, Compton y Bohr (luz como fotones).
- tiene múltiples aplicaciones técnicas e implicaciones sociales en la astronomía (telescopios), en la medicina (lentes correctoras, microscopios, cirugía láser, sondeos con fibras ópticas), en la transmisión de información con fibras ópticas, en las múltiples aplicaciones del láser (bélicas, industriales, artísticas, holografía, etc.).

- tiene gran impacto en la vida cotidiana: objetos de uso corriente como cámaras fotográficas o de vídeo, discos compactos, etc.; explicación de fenómenos naturales; la visión; etc.

Por ello, las actividades que a continuación se presentan procuran, en la medida de lo posible, tener en cuenta estos aspectos.

En la actividad A.1 los alumnos relacionan el término Óptica con gafas, prismáticos, cámaras fotográficas, etc., es decir, con los instrumentos ópticos. El profesor deberá ampliar esta visión presentándola como el estudio de la luz y sus propiedades. Es posible sensibilizar a los alumnos de la importancia de la Óptica a partir del hecho de que más del 70% de toda la información que recibimos del exterior proviene de la vista. Por tanto, a lo largo de la historia se ha prestado una particular atención a la creación y perfeccionamiento de instrumentos para hacer posible que esa información nos llegue en las mejores condiciones. Así mismo, dichos instrumentos han contribuido a producir cambios importantes en la ciencia (microscopio y telescopio), en la cultura (fotografía, cine, ...) y en la técnica (láser, fibra óptica, ...).

1. PRIMERAS IDEAS ACERCA DE LA LUZ

La actividad A.2 pretende poner de manifiesto si la educación primaria ha permitido superar las ideas infantiles sobre la percepción visual y alcanzar el esquema físico, es decir, la luz emitida por la fuente, es reemitida por el objeto hacia nuestro ojo. Las ideas previas de los alumnos han sido puestas de manifiesto en diversos trabajos (Driver *et al* 1989) y las podemos resumir en:

- la luz ambiente no establece relaciones entre la fuente, el objeto y el ojo.
- la luz relaciona el objeto y la fuente, pero no el ojo.
- la luz ilumina el objeto, pero el ojo emite algo que permite ver el objeto.

Existe un cierto paralelismo entre estas ideas y las de los antiguos, pero su alcance es limitado: no hay una correspondencia exacta (Saltiel y Viennot 1985). Otras ideas sobre la luz son su identificación con las fuentes, no reconocer su carácter material, etc. (Hierrezuelo y Montero 1989). Así mismo, Kaminski (1989) ha constatado que muchos alumnos piensan que la luz se ve, apoyándose en la experiencia de los rayos de luz en una habitación oscura, focos de vehículos, faros, etc. Pero, de hecho, esto es debido a la existencia de partículas difusoras (polvo, vapor de agua, etc.). Sólo se ven las fuentes y los objetos difusores, pero la luz misma es invisible.

Al aparecer un tema de movimiento ondulatorio previo a éste, los alumnos no tendrán dificultad en mencionar, en la actividad A.3, la interferencia y la difracción como propiedades características de las ondas y no de las partículas.

Es posible que algún alumno se refiera erróneamente en la actividad A.4 a que la propagación en línea recta apoya el modelo corpuscular. Si es así, será necesario recordar lo visto sobre rayos y frentes de onda y sobre la difracción (debe quedar claro que, si ésta no se pone de manifiesto en condiciones normales, ello nos indica que la luz tiene una longitud de onda pequeñísima en relación con los objetos corrientes). Es necesario que los alumnos tengan claro que los fenómenos de reflexión y refracción pueden explicarse con ambos

modelos y que existió una controversia y un cambio de modelos, lo que puede contribuir a clarificar cómo se desarrollan las ciencias. Las actividades de los apartados siguientes se basan en la Óptica geométrica y, por tanto, en el concepto de rayo.

2. PROPAGACIÓN DE LA LUZ

La experiencia cotidiana suministra muchas ocasiones de constatar la propagación rectilínea: los haces de luz, las sombras y penumbras, etc. Los alumnos sugieren en la actividad A.5 sencillos diseños como la cámara oscura, dos agujeros en pantallas separadas, etc. Es conveniente representar los diseños y dibujar en ellos rayos en todas direcciones, para que no se limiten a dibujar los que se dirigen hasta el agujero o el ojo, olvidando que cada punto de la fuente (o el objeto iluminado) emite igualmente en todas direcciones.

Algunos alumnos piensan en la actividad A.6 que la luz transporta imágenes (Kaminski 1989) y que por ello se verá la vela. Precisamente no se forma la imagen de un objeto en una lámina que se coloca frente a él, porque a cada punto de la lámina está llegando simultáneamente luz proveniente de muchos puntos del objeto (además de la luz proveniente de otros objetos) (ver fig. 1). Para que se forme la imagen, a cada punto de la lámina sólo debe llegar luz proveniente de un punto del objeto. Esto se logra con una lente convergente o una cámara oscura. Si ésta no se introdujo como prueba de la propagación rectilínea, es conveniente hacerlo aquí, procediendo a su construcción (fig. 2), pidiéndoles a los alumnos que predigan lo que observarán si miran con ella un objeto luminoso (la vela o una ventana) y que lo expliquen mediante un esquema de rayos que muestre como la cámara oscura hace que sólo lleguen a la lámina los rayos que pasan por el agujero, dando lugar a una imagen invertida de poca intensidad (ver fig. 3).

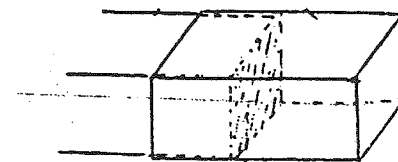


Fig. 1

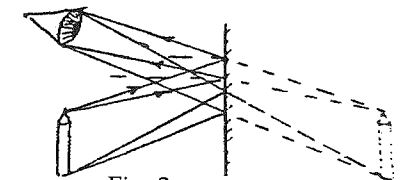


Fig. 2

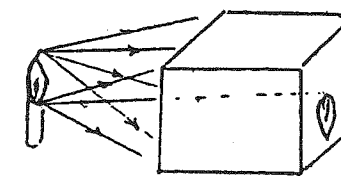


Fig. 3

En la actividad A.8 se puede citar a los alumnos la idea de Galileo sobre la velocidad de la luz: «La experiencia de cada día nos enseña que la propagación de la luz es instantánea, porque cuando vemos disparar de muy lejos una pieza de artillería, el chispazo nos llega a los ojos sin que transcurra tiempo y, en cambio, el sonido no llega a nuestros oídos sino tras un intervalo perceptible».

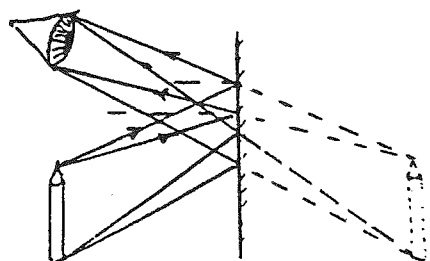
3. REFLEXIÓN DE LA LUZ

Los alumnos señalarán en la actividad A.10 que la luz «rebota», se refleja, etc. Una experiencia bastante cotidiana de ello es la producción de reflejos de un espejo («ratas») sobre la pared.

El diseño más simple que se propone en la actividad A.11 debe incluir un transportador, para determinar cuantitativamente los ángulos. Para poder hacerlo a la luz del día, es necesario interponer una lente convergente entre el foco y el espejo, pero si se hace en la penumbra, bastará con interponer una rendija.

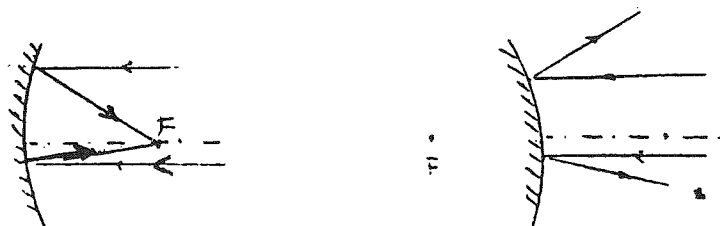
En la actividad A.12 la construcción de la onda reflejada, mediante el principio de Huygens, es un trabajo que ya se ha visto en el tema anterior.

No ofrece excesiva dificultad a los alumnos en la actividad A.13 dibujar los rayos que salen del foco y rebotan en el espejo, de manera que el ángulo de incidencia y el de reflexión sean iguales. Sin embargo la formación de la imagen exige, como ya hemos visto, la correspondencia punto a punto entre el objeto y la imagen, es decir, los rayos procedentes de un punto del objeto deben converger en su correspondiente punto de la imagen. Sin embargo, como se puede apreciar en la figura adjunta, que también debe mostrarse a los alumnos, los rayos procedentes de un punto divergen después de reflejarse, por lo que hay que resaltar el papel del ojo como parte integrante del sistema óptico (especialmente cuando éste produce imágenes virtuales), que hace que estos rayos divergentes se junten idealmente en un solo punto en la retina.

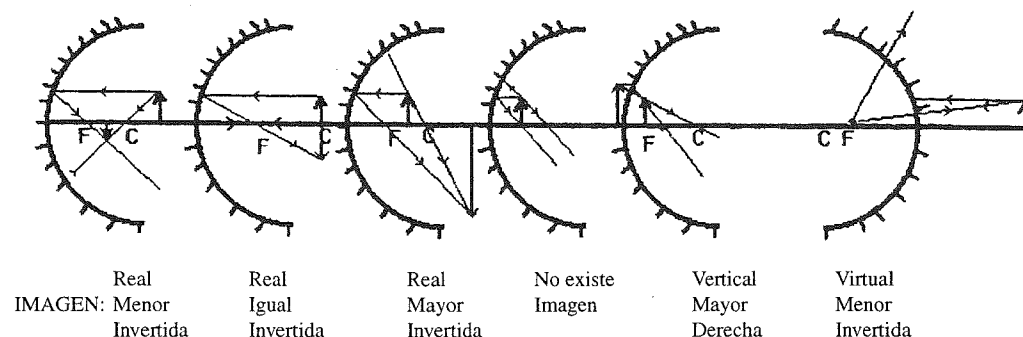


La actividad A.14 plantea dificultades, porque los alumnos piensan que la luz sólo se refleja en los espejos (Driver *et al* 1989), y desconocen la reflexión difusa (en todas direcciones que se produce en la superficie de cualquier objeto no pulido). Para clarificar esto se puede plantear que alumnos envíen el reflejo de un espejo («rata») hacia otro espejo, hacia la pared o una mitad sobre el espejo y la otra sobre la pared.

La aplicación de la ley de reflexión en la actividad A.15 conduce a la convergencia en un foco y a la divergencia de rayos, respectivamente, en ambas superficies. Se comprueba con facilidad haciendo incidir luz sobre ambas caras de la cuchara. Es un efecto muy utilizado en lámparas, focos, etc. Si se coloca una fuente en el foco, sus rayos son paralelos.



En la actividad A.16 si los alumnos se limitan a mirar sus rostros en ambas caras de la cuchara, en la cóncava se comprueba que la imagen está invertida, y en la convexa tenemos siempre una imagen derecha. Sin embargo, si en el cóncavo tomamos un objeto más pequeño (p.ej. un lápiz), la imagen invertida desaparece cuando aproximamos el objeto al foco, reapareciendo derecha poco después. La explicación mediante esquemas de rayos es sencilla (ver figuras adjuntas). Si el profesor piensa realizar ambas partes de la A.16, la observación y su explicación, puede tener interés empezar por la segunda, planteándola como una predicción que luego podemos comprobar. Como mínimo creemos que se debe garantizar la realización de las manipulaciones.



4. REFRACCIÓN DE LA LUZ

La actividad A.17 permite que los alumnos sugieran y luego comprueben (con un foco, un vidrio y un transportador) que la luz se desvía hacia dentro al pasar a un medio más denso (y hacia fuera al pasar a uno menos denso). A nivel experimental pensamos que esto es suficiente, dada la complejidad de la ley de refracción, aunque se podría realizar la experiencia, si se dispusiera de tiempo. A nivel teórico el profesor dará una breve explicación del concepto de índice de refracción $n = c/v$, que permite reescribir la ley de la refracción vista el tema anterior en la forma $n \sin i = n' \sin r'$. Así mismo, es conveniente resaltar que una parte de la luz se desvía en la superficie de separación de los dos medios.

La actividad A.18 permite explicar que el lápiz parezca doblarse o las piernas de una persona de pie en una piscina parezcan más cortas, así como otros fenómenos cotidianos (la formación de espejismos, el crepúsculo, la forma ovalada del Sol cuando está a punto de ponerse, etc.).

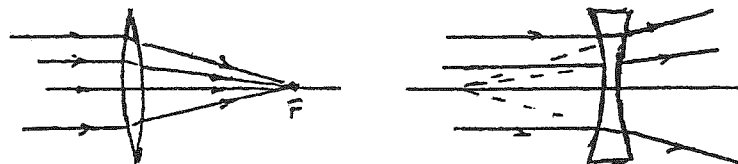
En la actividad A.19 la teoría corpuscular explicaría la desviación por la distinta velocidad de las partículas en los dos medios. Como ya señaló Descartes, cuando una pelota pasa del aire al agua, se aleja de la normal. Por tanto, la hipótesis corpuscular predice que la luz se mueve más rápidamente en el agua que en el aire. La hipótesis ondulatoria confirma la ley de refracción pero, al contrario que la hipótesis corpuscular, predice que la velocidad en el agua ha de ser más pequeña. Se disponía así de una posibilidad de contrastar la validez de uno u otro modelo midiendo la velocidad de la luz en el agua. Esta medida no fue posible hasta 1850, con resultados que confirmaban la teoría ondulatoria.

Es conveniente cuando se introduce una ley, p.ej. la de la refracción, aplicarla en diversas situaciones. En la actividad A.20 se puede determinar fácilmente que $n \sin i = 1 \sin 90$, lo

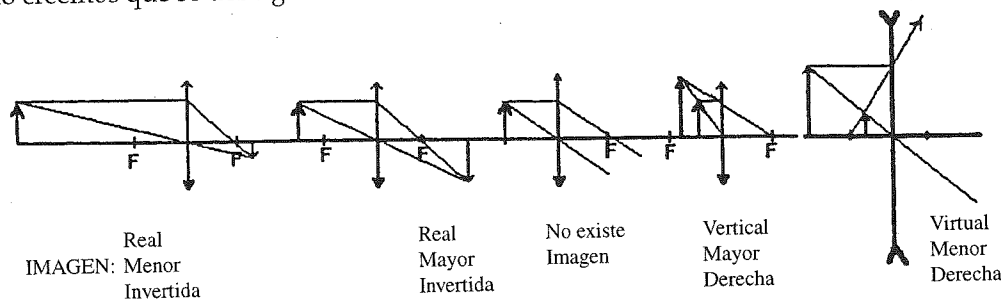
que implica que $\text{sen } i = 1/n$, siendo i el ángulo límite. Para ángulos mayores o iguales que i no podrá haber rayo refractado, es decir, toda la luz se refleja, de ahí el nombre de reflexión total que recibe este fenómeno.

En la actividad A.22 se puede citar su aplicación en muchos instrumentos ópticos, p.ej. los gemelos binoculares y, sobre todo, en la óptica de fibras, de tanta importancia para la transmisión de información (llamadas telefónicas, señales de televisión y de ordenadores) y para la medicina (examen de lugares difícilmente accesibles como el interior del cuerpo humano).

En la actividad A.23 se puede predecir, mediante las ideas sobre la refracción de los rayos, que la lente biconvexa hace que los rayos paralelos converjan en un foco y la bicóncava que diverjan, de ahí sus nombres de lente convergente y divergente que se les asigna. Para comprobarlo es necesario que los rayos sean paralelos, lo cual se consigue con un foco muy alejado de la lente (ver fig.).

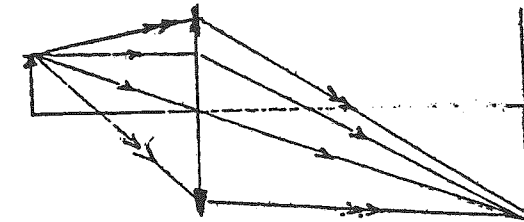


En la actividad A.24 se trata de comprobar que la lente divergente proporciona siempre una imagen derecha y menor. En cambio en la convergente (al igual que en el espejo cóncavo), la imagen depende de la distancia del objeto al foco (cuya distancia a la lente hemos determinado en la actividad anterior). Cuando el objeto está entre el foco y la lente, la imagen es mayor y derecha (actúa como lupa); si alejamos la lente del papel, la imagen desaparece (justo cuando el papel coincide con el foco), para volver a reaparecer invertida, primero mayor y luego menor. La explicación mediante esquemas de rayos es sencilla (ver figuras adjuntas). Al igual que en los espejos curvos, si el profesor piensa realizar ambas partes de la actividad A.24, la observación y su explicación, puede tener interés empezar por la segunda, planteándola como una predicción que luego podemos comprobar. Como mínimo creemos que se debe garantizar la realización de las manipulaciones.



Las actividades de la A.25 han sido sugeridas por Kaminski (1989) y permiten comprobar si se ha comprendido el mecanismo de visión, de formación de imágenes. Para que aparezca la imagen es necesario que la bombilla o la vela esté a una distancia un poco

superior a la focal (si es mayor, la imagen es un punto: el foco). Si los alumnos no han comprendido la producción de imágenes, pensarán que la imagen no desaparece, sólo se endereza, porque para ellos la lente no hace más que invertir o deformar la imagen. Igualmente los alumnos creen que desaparece media imagen, cuando en realidad sólo disminuye la intensidad de ésta. Es conveniente realizar la construcción de esta imagen, incluyendo más rayos de los estrictamente necesarios.



En cuanto a los defectos indicados en la actividad A.26 conviene señalar el ojo miope, que enfoca los objetos lejanos delante de la retina y el hipermetrópe, que enfoca los próximos detrás de la retina. Pueden corregirse, respectivamente, con lentes divergentes y convergentes. Las actividades A.26 y A.27 sirven para profundizar en algunas de las aplicaciones de la actividad A.1.

5. NATURALEZA ONDULATORIA DE LA LUZ

5.1. Difracción e interferencia

En la actividad A.28 los alumnos saben que la observación de la difracción exige la utilización de orificios u objetos muy pequeños. La actividad A.29 facilita la comprensión de la difracción y compara las predicciones de ambos modelos con la experiencia. Las partículas producirían un pequeño círculo frente al orificio; las ondas, por el contrario, una serie de anillos concéntricos. Ya Grimaldi, a mediados del siglo XVIII, observó que al penetrar la luz en un cuarto oscuro a través de un pequeño orificio de una cortina, la mancha luminosa que aparecía en la pared opuesta era mayor que el orificio y estaba irisada por franjas de colores. Fresnel y Fraunhofer realizaron en el siglo XIX un estudio más sistemático de la difracción, que confirmaba su naturaleza ondulatoria.

En la actividad A.30 se contrastan nuevamente la predicción del modelo de corpuscular (dos franjas próximas) con la experiencia (una serie de franjas). En la actualidad se pueden resolver las dificultades experimentales mediante fuentes de luz coherente, es decir, utilizando el láser, con el que se observa fácil y claramente fenómenos de difracción e interferencia. El diodo láser tiene un precio tan asequible que puede ser comprado por los Centros de Enseñanza Secundaria. Los círculos brillantes y oscuros de la difracción de la actividad A.29 se deben a la interferencia constructiva y destructiva de los rayos para diferentes ángulos de difracción.

El texto de Röntgen permite criticar la mitificación del azar que se realiza en muchos textos de Física (desde la manzana de Newton hasta el descubrimiento de la radiactividad).

Para que se produzca es necesario que el científico esté «trabajando» y que cuando aparezca la anomalía, la investigue.

En la actividad A.31 los alumnos señalan que es conveniente recurrir a fenómenos como la interferencia o la difracción para poner de manifiesto el comportamiento ondulatorio de los rayos X.

5.2. La dispersión y el espectro visible. Espectroscopía

La dispersión de la luz por un prisma, tal como se propone en la actividad A.32, se puede comprobar fácilmente con luz solar directa o bien con una bombilla y una lente convergente. Puede bastar la explicación más simple posible, es decir, que la luz blanca es una mezcla de todos los colores visibles relacionados, como demostró Young, con la longitud de onda λ o la frecuencia ν de la luz. La luz visible se encuentra en el intervalo comprendido entre los 750 nm (rojo) y los 400 nm (violeta). Cuando incide sobre un prisma, los distintos colores se desvían ángulos diferentes porque los diferentes colores se propagan con velocidades distintas, con lo cual el índice de refracción depende de la longitud de onda λ . Es mayor para las longitudes de ondas más cortas, por lo que la luz violeta es la que más se desvía. Un ejemplo espectacular es el arco iris (actividad A.33) que vemos cuando se mira la lluvia con el Sol a nuestra espalda. Este es un buen momento para hablar del espectro de la luz solar en el que aparecen una serie de rayas negras (espectro de absorción que se explicará en el tema 6), indicando que, además de la luz visible, está formado por otras radiaciones que no se ven pero que podemos detectar por otros medios (las infrarrojas IR, que calientan la piel, las ultravioletas UV, que broncea la piel al actuar sobre la melanina, etc.). También se puede mencionar, en conexión con la radiación UV, el problema de la capa de ozono.

La actividad A.34 tiene gran interés por sus implicaciones en el tema de Física moderna, en la Química, etc. Si no se dispone de un equipo con las fuentes habituales (mercurio, neón, etc.) se pueden utilizar fuentes como el filamento de una bombilla, el sodio, un tubo fluorescente (que proporciona el espectro continuo de la sustancia fósforescente y el discontinuo del vapor de mercurio), o por lo menos, manejar fotografías de espectros obtenidas con espectroscopios de calidad.

La actividad A.35 es una aplicación del efecto Doppler a la luz, visto el tema anterior. El desplazamiento al rojo de las galaxias prueba que éstas se alejan de nosotros, siendo la velocidad de alejamiento tanto mayor cuanto mayor es la distancia. Esto apoya la teoría de un Universo en expansión. El desplazamiento al rojo no quiere decir que se vea rojiza la luz de galaxia, sino que algunas líneas espectrales características (p.ej., la H y K del calcio) aumentan su longitud de onda (se desplazan hacia el rojo).

5.3. Color y visión

La actividad A.36 permite comprobar cómo para los objetos que emiten luz, basta con tres colores (denominados fundamentales: rojo, verde y azul) para obtener toda la gama cromática. Esto es lo que se denomina mezcla aditiva. La adición de rojo (R) y verde (V) da amarillo (A). R y azul (Az) dan magenta (M). Az y V dan cian (C). R, V y Az dan blanco (B). Los colores opuestos en el diagrama se denominan complementarios y su adición da blanco (p.ej., R y C da B). Y viceversa (p.ej., si al B le quitamos R da C).

La mayoría de los colores de nuestro entorno se forma sustractivamente, es decir, porque las sustancias absorben determinadas bandas espectrales y reflejan difusamente los colores complementarios. Por ello no hay contradicción entre las reglas de adición vistas en la actividad anterior y las experimentadas en la clase de dibujo al mezclar pinturas. Así, p.ej., el pigmento azul, absorbe el intervalo rojo-amarillo, reflejando el verde-violeta. El pigmento amarillo absorbe el azul-violeta y refleja el rojo-verde. Por tanto, la mezcla de azul y amarillo sólo refleja verde. Es decir, se trata de una mezcla sustractiva. Así, un objeto es negro (actividad A.37) porque absorbe todos los colores sin reflejar ninguno. El blanco los refleja todos. El cinabrio es rojo porque absorbe prácticamente todos menos el rojo, pero la hemoglobina es roja, porque absorbe en la banda complementaria del rojo (en verde-azul). Es conveniente realizar esta distinción porque está muy extendido el error de considerar que, cuando vemos un color puro, es debido a que la sustancia absorbe todos los colores menos el suyo. La clorofila es verde porque absorbe en el azul-violeta y en el rojo. La causa de la absorción se estudiará en cursos posteriores.

La actividad A.38 pretende hacer reflexionar sobre el hecho de que los colores son debidos a dos causas: el espectro de absorción de las sustancias y la luz incidente.

5.4. Polarización

La comprensión de la polarización óptica se facilita notablemente produciendo en cuerdas y muelles ondas transversales verticales, horizontales, etc. En este caso el papel de polarizador lo puede realizar un par de tablas horizontales o verticales. En la actividad A.39 se puede comprobar fácilmente que $A = A_0 \cos \Theta$, es decir, la amplitud es reducida en un factor $\cos \Theta$. Como la intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud tendremos que $I = I_0 \cos^2 \Theta$. Si el eje del polarizador es perpendicular, $\cos 90 = 0$. Por tanto no deja pasar luz, como se puede comprobar fácilmente con dos gafas o láminas polarizadas cuyos ejes sean perpendiculares (actividad A.40). Estas actividades se pueden utilizar posteriormente para facilitar la comprensión de la interpretación probabilística en Física cuántica.

La actividad A.41 permite realizar una nueva aplicación de la ley de la refracción, dado que es muy aconsejable didácticamente utilizar una ley o concepto en el mayor número de contextos posibles:

$$n_1 \sin b = n_2 \sin r = n_2 \sin (90-b) = n_2 \cos b$$

por tanto,

$$\operatorname{tg} b = n_2/n_1$$

denominada ley de Brewster.

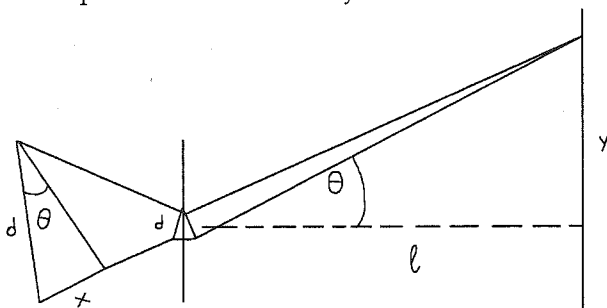
En el caso del lago $n_1 = 1$ (aire). Por tanto $\operatorname{tg} b = 1,33$ y $b = 53^\circ$.

En la actividad A.42 entre las aplicaciones se pueden citar:

- como filtro, p.ej., en las gafas polaroid o en fotografía (se construyen con sus ejes verticales a fin de eliminar la componente más intensa y reducir el deslumbramiento; absorben aún más por estar coloreadas).
- para el análisis de tensiones en modelos de plástico de edificios, máquinas, etc., o de la estructura interna de cristales birrefringentes.
- en el funcionamiento de las pantallas de cristal líquido.
- en los polarímetros, que miden la concentración de disoluciones con actividad óptica.

ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS

En la actividad complementaria 9 se aplica la condición de interferencia constructiva $x = n\lambda$ y destructiva $x = (2n+1)\lambda/2$, vista el tema anterior, a las condiciones de interferencia de Young ($d \ll \lambda$). Sin embargo, como los Decretos sólo prescriben el tratamiento experimental y cualitativo de los fenómenos de difracción e interferencias, se proponen como actividades opcionales. Los rayos provenientes de las rendijas pueden considerarse paralelos, siendo θ el ángulo que forman con la horizontal, que es el mismo que forman la perpendicular de un rayo al otro y d . Por tanto, $\sin \theta = x/d$ y sustituyendo x en la expresión $x = n\lambda$ tenemos $d \sin \theta = n\lambda$, condición que tiene que cumplirse para que se produzca interferencia constructiva. En la actividad complementaria 11 se aplica la ley introducida en la actividad anterior a problemas concretos, teniendo en cuenta que $\sin \theta = y/l$, donde y es la posición de los máximos o mínimos en las pantalla. Así mismo, conocidas λ y d se puede predecir la posición de los mínimos, como en la siguiente actividad opcional: Una pantalla que contiene dos rejillas separadas 0,1 mm se encuentran a 1,20 m de la pantalla de observación. Entre las rendijas incide una luz de $\lambda = 500$ nm procedente de un manantial luminoso lejano. ¿Cuál será la separación aproximada entre las rayas?



La actividad complementaria 11 se considera optativa dado que los Decretos prescriben un tratamiento experimental y cualitativo de esta parte. Los haces dispersados por los átomos de dos planos diferentes del cristal, estarán en fase y, por consiguiente, darán interferencia constructiva, cuando la diferencia de recorridos entre ellos sea un número entero de longitudes de onda. Dicha diferencia vale $2d \sin \phi$. Por tanto, tenemos interferencia constructiva si se cumple la ecuación de Bragg

$$2d \sin \phi = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

Dicha ecuación se puede usar para medir la separación d de los planos si se conoce la longitud de onda λ y viceversa. Las figuras de difracción de rayos X son complejas, dado que un cristal es un objeto tridimensional y los rayos X se pueden difractar según diversos ángulos. Cada punto del diagrama de Von Laue corresponde a una dirección relacionada con las diferentes familias de planos. Además para distintos valores de n se obtienen distintos diagramas, siendo el de primer orden ($n = 1$) el más intenso. Si la sustancia no es un monocristal, sino una mezcla de muchos cristallitos, como un metal, en vez de una serie de manchitas se obtiene una serie de círculos (diagramas de Debye-Scherrer). Cada círculo corresponde a una difracción producida por un conjunto de planos paralelos.

CRITERIOS DE EVALUACIÓN

1. Identificar la existencia de diversos modelos para explicar la naturaleza de la luz, especificando las razones que llevaron a su aceptación.
2. Explicar las propiedades de la luz, utilizando los diversos modelos.
3. Indicar las razones a favor y en contra del modelo corpuscular.
4. Explicar la formación de imágenes en dispositivos ópticos sencillos: espejos planos y curvos, lentes delgadas, cámara fotográfica, microscopio, etc.
5. Comprender el mecanismo de la visión, tanto de imágenes como de colores.
6. Valorar las múltiples aplicaciones de la Óptica.
7. Identificar las leyes ópticas subyacentes a fenómenos cotidianos como la formación de sombras, eclipses, espejismos, arco iris, etc.
8. Justificar la visión de colores cotidianos, es decir, por qué el carbón es negro; la sangre, roja; la hierba, verde, etc.
9. Valorar los informes de las pequeñas investigaciones realizadas sobre reflexión y refracción.

ACTIVIDADES DE EVALUACIÓN

1. Enumerar las aplicaciones de la Óptica que se conozcan.
2. El agua es incolora y transparente. Explicar por qué se pueden ver las gotas de agua.
3. ¿Es posible que el índice de refracción de una sustancia sea menor que 1?
4. Explicar cómo se forma la imagen real e invertida en el negativo dentro de la cámara fotográfica (o en una cámara oscura). (Selectividad. 1988)
5. Un rayo de luz, que forma un ángulo de 50° con la normal, se mueve hacia el aire desde el agua. Explicar qué ocurrirá cuando llegue a la superficie de separación del agua y del aire. ($n_{\text{agua}} = 1,3$).
6. Explicar qué ocurriría en el experimento de Young si se tapara una de las rendijas.
7. Si hubiera que decidir si una radiación desconocida está formada por partículas o por ondas, ¿qué tipo de pruebas realizarías? (Selectividad. 1988).

8. Citar y comentar alguna evidencia experimental que indique:
 a) la naturaleza corpuscular de la luz.
 b) la naturaleza ondulatoria.
9. Explicar el funcionamiento del ojo en la formación de imágenes. ¿En qué consiste la miopía y la hipermetropía? ¿Cómo se corrigen?
10. ¿Cómo se tendrían que construir los cristales de unas gafas de sol para que dejaran pasar la mínima intensidad de la luz reflejada por una superficie plana de nieve? Justificar la respuesta.

BIBLIOGRAFÍA

- KAMINSKI, N., 1989, Conceptions des enfants (et des autres) sur la lumière, *Butlletin de l'union de physiciens*, 716, 973-996.
- PERALES, F. J. y NIEVAS, F., 1988, Nociones de los alumnos sobre conceptos de óptica geométrica, *Enseñanza de las Ciencias*, 6, 86-88.
- SALTIEL, E. y VIENNOT, L., 1985, ¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes?, *Enseñanza de las Ciencias*, 3 (2), 137-145.
- SOLBES, J. y ZACARES, J., 1993, ¿Qué sucede con la enseñanza de la óptica? *Revista Española de Física*, 7 (4), 38-43.
- STEWART, K.; BOTHWELL, I.; HANNAN, D.; STEVEN, A.; WILSON, J.; DAWSON, R.; JARDINE, J.; GIBBONS, A. y SHARKEY, J., 1992, *La Física en sus aplicaciones*, (Akal : Madrid).

4. LA INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

COMENTARIOS GENERALES

La importancia de este tema es evidente. El descubrimiento de las relaciones entre los campos eléctrico y magnético llevó a la fabricación de motores, al diseño de generadores de corriente y a toda la revolución que ha supuesto en este siglo el uso de la electricidad.

Existe una abundante bibliografía de ideas previas y formas de razonamiento en algunos temas de Electricidad y Magnetismo como p. ej. el de la corriente eléctrica (Driver *et al* 1989 y Hierrezuelo y Montero 1989). En otros aspectos es escasa.

En este tema, como en los siguientes, los alumnos apenas tienen experiencias previas. Por ello, las ideas alternativas deben ser atribuidas a formas de razonamiento espontáneas (analogías, causalidad lineal, etc.) y a los errores introducidos por la propia enseñanza (textos, profesores, etc.). De ahí la importancia de las formas usuales de enseñanza de dichos temas.

En un trabajo reciente Solbes y Martín (1991) analizan el tratamiento didáctico habitual del campo: no se ponen de manifiesto los límites del concepto de fuerza para describir las interacciones entre cargas (son a distancia e instantáneas) y el concepto de campo aparece como un artificio matemático para resolver situaciones estáticas; no se muestran las ventajas del de campo (en los casos estáticos soluciona los problemas que plantea el concepto de fuerza y, además, explica los casos dependientes del tiempo, como la inducción y las ondas electromagnéticas, que no se pueden explicar con las fuerzas).

También se muestran algunos errores de los alumnos respecto al concepto de campo: no llegan a distinguirlo de la fuerza. Aparecen interpretaciones animistas (el magnetismo es una cualidad natural y propia del imán) o de identificación con los efectos (el campo magnético es el lugar en el que hay magnetismo). Con respecto al campo magnético, el porcentaje de respuestas en blanco e incorrectas a cuestiones muy sencillas, como la orientación de una brújula en un campo magnético, es tan elevado que pone de manifiesto que este tema apenas se trata en BUP y COU pese a las programaciones oficiales. Respecto a las ondas emitidas por una antena pocos alumnos señalan que son electromagnéticas (pese a preguntarles explícitamente si tienen alguna relación con los campos eléctrico y magnético), algunos dicen que se emiten ondas sonoras, otros que la antena atrae a las ondas, etc. En otro trabajo (Solbes, Bernabeu *et al* 1988) se detectó un error en el que incurren incluso alumnos de segundo curso de Físicas: afirmar que las partículas cargadas colocadas en campos magnéticos se ven sometidas a fuerzas, independientemente de su estado de movimiento.

Por último, señalar que usualmente se inicia la electricidad por el concepto de fuerza y el magnetismo por el de campo. En este nivel conviene empezar la Electricidad y el Magnetismo por el concepto de campo, tanto por razones de simetría como para poner de manifiesto que el campo es el modelo clásico más potente y correcto para describir la interacción.

1. ELECTRICIDAD

1.1. Campo eléctrico

La actividad A.1 y las que presentamos a continuación son análogas a las del campo gravitatorio y, por ello, no plantearán grandes dificultades a los alumnos. En la actividad

A.1 los alumnos pueden mencionar dos problemas del modelo newtoniano de fuerza: las interacciones son a distancia e instantáneas. Del primero de ellos ya era consciente, como hemos visto, el propio Newton. Conduce, así mismo, a la introducción del campo eléctrico como una realidad física, como una forma de existencia de la materia a través de la cual se propagan las interacciones. En otras palabras, clásicamente la materia se presenta en dos formas: partículas y campos.

La actividad A.2 parte de la consideración fenomenológica de campo como región del espacio en la que actúan fuerzas sobre las cargas (o masas), lo que permite definir la intensidad del campo eléctrico E como la fuerza F por unidad de carga q , $E = F/q$.

A partir de la ley de Coulomb se obtiene fácilmente en la actividad A.3 que

$$E = kQq_r/r^2$$

y aplicando el principio de superposición

$$E = k\Sigma Q_i q_r/r_i^2$$

El profesor debe recordar lo visto en el campo gravitatorio, es decir, que ambas expresiones descomponen el problema de la interacción entre cargas en dos. La expresión $E = kQq_r/r^2$ establece que la carga Q crea alrededor de sí misma un campo $E(r)$. 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 cargas esféricas. Sin embargo la expresión $F = qE$ es válida independientemente de cómo se haya creado el campo E . Aquí se refleja la realidad física del concepto de campo: cargas diferentes crean a su alrededor diferentes campos eléctricos. Sin embargo cada uno de estos campos actúa sobre la carga que en él se introduce de acuerdo con la misma ley.

La actividad A.5 muestra que los alumnos son incapaces de dar un significado físico al campo independientemente de la fuerza. De hecho, como ya hemos mostrado en Solbes y Martín (1991), la mayoría de los alumnos identifican la intensidad de campo con la fuerza existente entre ambas cargas y, por ello, la mayoría contesta que no existe campo en el caso c). En dicho trabajo se pueden encontrar otras cuestiones que pueden ayudar a corregir este error conceptual.

Aunque los problemas de distribuciones de cargas puntuales son académicos y poco reales, se puede realizar alguno como el propuesto en la actividad A.6. En él tiene interés la representación gráfica, para que el análisis de gráficas, de tanta importancia en la Física, no se limite a la Cinemática.

1.2. Fuerzas entre campos eléctricos y cargas

La idea de campo simplifica el problema de la interacción eléctrica al desdoblirlo en dos. En la actividad A.7 vemos que la fuerza que actúa sobre una carga q en el seno de un campo eléctrico E es $F = qE$. Aplicada a una distribución de cargas Q_i obtenemos una generalización de la ley de Coulomb

$$F = \Sigma Q_i q r_i^2 / 4\pi\epsilon$$

Las actividades siguientes se centran en el estudio de movimiento de carga en campos eléctricos uniformes. En la actividad A.8 vemos que si la carga q se mueve paralelamente al campo tenemos un MRUA. Si su velocidad es perpendicular al campo, se trata de un tiro horizontal.

Las actividades A.9 y A.10 plantean problemas más reales, cuyo interés hemos establecido en la A.8. Al mismo tiempo nos permiten revisar conceptos del curso anterior. Se pueden abordar como pequeñas investigaciones que conducen a las conocidas ecuaciones de la Cinemática, siendo la aceleración $a = qE/m$. Vectorialmente

$$\begin{aligned} v &= v_0 + qEt/m \\ r &= r_0 + v_0 t + qEt^2/2m \end{aligned}$$

siendo en el primer caso $r = (x,0)$, $r_0 = (0,0)$, $v_0 = (v_0,0)$ y $E = (E,0)$ y en el segundo $r = (x,y)$, $r_0 = (0,0)$, $v_0 = (v_0,0)$ y $E = (0,E)$. En la actividad A.11 vemos que el ángulo se puede obtener a partir de la expresión $\tan \alpha = v_y/v_x$. Es conveniente finalizar realizando cálculos numéricos. Así, partiendo de la carga y de la masa del electrón ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C y $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg respectivamente), se pueden estimar los valores de las restantes magnitudes para un televisor donde $x = 40$ cm e $y = 15$ cm y cuya tensión de aceleración es de 20 kV.

1.3. Estudio energético de la interacción eléctrica

Las actividades A.11, A.12 y A.13 se pueden considerar como una revisión de lo visto en el curso anterior, profundizando en el aparato matemático, representaciones gráficas, etc. Así, en la actividad A.11 se puede calcular el trabajo por medio de la integración de las fuerzas eléctricas:

$$W = \int_{r_1}^{r_2} \frac{kQq}{r^2} dr = \frac{kQq}{r_1} - \frac{kQq}{r_2} = -\Delta E_p$$

Por tanto, una evolución espontánea del sistema de cargas, en la que sólo actúan las fuerzas del campo, se traduce en una disminución de la energía potencial.

Si en la actividad A.12 se toma la $E_p(r \rightarrow \infty) = 0$, la energía potencial de un punto del espacio se puede definir como $E_p = kQq/r$. Es necesario realizar dos puntualizaciones: el origen de la energía potencial puede ser asignado al punto que se desee. Como ya hemos visto, en la expresión $E_p = mgh$, se toma como origen la superficie de la Tierra. La elección arbitraria del origen de la energía potencial no influye en los resultados físicos (p.ej. en el trabajo) porque se determinan incrementos de energía potencial. Por otra parte, la energía potencial no es de la carga, sino del conjunto de cargas que interactúan o, mejor, del campo. De hecho la energía potencial se asigna a los puntos del espacio que rodean a la carga Q , es decir, al campo creado por Q .

En la representación gráfica de la actividad A.13 si $Q > 0$, la energía potencial $E_p > 0$ y si $Q < 0$, la $E_p < 0$ y, sólo en este caso, si la $E_c < |E_p|$ tenemos un sistema ligado (Energía total < 0), ya que la carga q sólo puede moverse desde 0 hasta r . En los restantes casos el sistema será libre.

La actividad A.14 debe conducir a un razonamiento del siguiente tipo: si el campo E es igual a la fuerza por unidad de carga $E = F/q$, se puede introducir la diferencia de potencial

(ddp) ΔV como ΔE_p (o trabajo) por unidad de q , es decir, $\Delta V = \Delta E_p/q = -W/q$. Esta última expresión permite mostrar que la relación entre E y V es la misma que entre F y E_p :

$$\Delta V = -\frac{W}{q} = -\int E \cdot dr$$

Esta expresión permite introducir una nueva unidad de energía muy útil en este tema y en los sucesivos, el electron-voltio (eV): energía de un electrón sometido a la ddp de un voltio. En muchas ocasiones los alumnos no son capaces de relacionar esta ddp con la de Ohm (vista el curso anterior). Por ello es conveniente que el profesor plantee alguna cuestión o reflexión al respecto.

En la actividad A.15 se puede deducir fácilmente que

$$\Delta V = \frac{\Delta E_p}{q} = \frac{KQ}{r_2} - \frac{KQ}{r_1}$$

Entre dos placas, como

$$E = \text{cte}, \Delta V = -\int_0^d E dr = -Er$$

expresión muy útil para los campos uniformes, en la que se advierte que otra unidad de medida del campo eléctrico en el S.I. es el V/m.

En la actividad A.16 tenemos que $V = kQ/r$, si se define un origen de potenciales (como en A.12). Para un conjunto de cargas $V = k \sum Q_i/r_i$.

Los alumnos suelen explicar la actividad A.17 en términos de cargas. Así, p.ej., las cargas positivas ($q > 0$) tienden alejarse de las positivas ($Q > 0$). Este hecho se puede reinterpretar fácilmente en términos de potenciales dado que $Q > 0$ corresponde a $V > 0$ y, por ello, las cargas $q > 0$ se alejan de los potenciales crecientes y se mueven en el sentido de los decrecientes.

En la actividad A.18 vemos que las superficies equipotenciales son perpendiculares a las líneas de campo. En efecto, si una carga se desliza un desplazamiento infinitesimal dr por una superficie equipotencial, $dV = 0$ y, por tanto, $E \cdot dr = 0$, es decir, son perpendiculares. Por otra parte, por lo visto en la actividad anterior, el campo eléctrico tiene el sentido de los potenciales decrecientes. Esto permite completar las líneas de campo de la actividad A.6 con la representación de las superficies equipotenciales.

La representación de superficies equipotenciales y el cálculo de campos eléctricos se puede realizar de una forma experimental mediante un papel de filtro empapado con una disolución saturada de nitrato de potasio, situada sobre un panel, como señala J. A. Llorens (1994). Se trata de una variante más económica (y, por tanto, más accesible a los presupuestos de los Institutos) del método clásico consistente en dibujar con plata coloidal (muy conductora) en papel teledeltos, la representación bidimensional de los conductores que vamos a estudiar. En la propuesta de J. A. Llorens se sustituyen los caros papeles de teledeltos por papel de filtro, y la plata coloidal por clavos. Aunque en el artículo sólo se menciona una distribución de dos cargas, se pueden conseguir otras distribuciones, como líneas, utilizando clavos enlazados por un hilo conductor. Estas distribuciones se conectan, con pinzas de cocodrilo, a los bornes de una fuente de alimentación, con una ddp de 6 V. A continuación se conecta un terminal del voltímetro a la tierra de la fuente (que se toma como origen de potenciales) y se utiliza el otro terminal móvil para medir la ddp entre puntos del papel

empapado y el conductor que tomamos como origen de potenciales. Si unimos los puntos que se hallan a un mismo potencial (p.ej., 1, 2, 3, 4 V, etc.) tendremos las superficies equipotenciales. Como $E = dV/dr$ podemos calcular el módulo del campo a partir de la ddp entre las superficies y puntos muy próximos a ellas (a 1 mm). La dirección del campo eléctrico E es perpendicular a las superficies equipotenciales y su sentido el de potenciales decrecientes.

Este método justifica la importancia de la unidad V/m y evita la idea de muchos alumnos de creer que la definición operativa del campo E , a partir de la fuerza sobre una carga testigo, corresponde a la forma real de calcularlo. El método de la carga testigo se utilizó en los comienzos de la electrostática, con péndulos electrostáticos u otros dispositivos cargados (ver actividad complementaria). Pero sus dificultades prácticas, p.ej., la perturbación del campo de las fuentes con el de la carga testigo, aconsejan la utilización de métodos como el aquí propuesto de las diferencias de potencial.

Existen programas informáticos que simulan situaciones con cargas y corrientes pero antes de su utilización parece conveniente que los estudiantes se familiaricen con las dificultades que plantea la experiencia.

Un posible mapa conceptual para la actividad A.19 podría ser el siguiente:

$$\begin{array}{ccc} E \longrightarrow & & F = qE \\ \downarrow & & \downarrow \\ \Delta V = -\int E \cdot dr & \longrightarrow & \Delta E_p = q\Delta V = -\int F \cdot dr \end{array}$$

En la actividad A.20 los alumnos pueden mencionar que ambos campos son newtonianos, es decir, centrales e inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia, por lo que su alcance es infinito. También son conservativos, porque $dW = F \cdot dr = 0$ o, en otras palabras, existe una energía potencial. En cuanto a las diferencias se puede mencionar la intensidad muy débil del campo gravitatorio respecto al eléctrico (éste es 10^{38} veces mayor). Por otra parte, el campo gravitatorio siempre es aditivo, en tanto que en el eléctrico hay dos clases de carga en la naturaleza que se neutralizan. Por ello, a pesar de su menor intensidad, el campo gravitatorio es el dominante a escala astronómica. El eléctrico puede apantallarse y el gravitatorio no, etc.

2. MAGNETISMO

2.1. Relación entre fenómenos eléctricos y magnéticos

La actividad A.21 permite mostrar cómo las evidentes analogías (existencia de dos polos o dos cargas, fuerzas repulsivas entre polos o cargas idénticas, variación de la fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, etc.) llevó a la búsqueda de relaciones entre ellos. Al igual que para el campo eléctrico, se puede introducir una magnitud vectorial, la intensidad del campo magnético, representada por B y cuya unidad en el S.I. se denomina Tesla (T). Su definición operativa está basada, como veremos, en las fuerzas magnéticas. Otra magnitud muy intuitiva y útil, que puede introducir el profesor, es el número de líneas de campo que atraviesa una determinada superficie, denominada flujo magnético Φ . Se define como

$$\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = BS$$

(si \mathbf{B} es constante sobre la superficie). La unidad de flujo en el S.I. es Tesla.m² que recibe el nombre de Weber (Wb).

Si los alumnos no han realizado anteriormente la actividad A.22, propondrán aproximar cargas e imanes. De lo contrario, la experiencia sugerida será similar a la de Oersted.

En la actividad A.23 vemos que la diferencia fundamental estriba en que las cargas en movimiento crean campos magnéticos y ejercen, por tanto, fuerzas sobre los imanes.

La actividad A.24 resulta difícil y los alumnos hacen propuestas parciales que el profesor completará refiriéndose a las siguientes líneas de investigación:

1. La determinación cuantitativa del campo magnético producido por corrientes, ligado al problema de la obtención de campos magnéticos de intensidad controlable que sustituyan a los imanes.
2. El estudio de las fuerzas ejercidas entre corrientes e imanes, ligado a la posibilidad de utilizar dichas fuerzas, es decir, a la posibilidad de construir motores eléctricos, instrumentos de medida de la corriente, etc.
3. La explicación del magnetismo natural.
4. La posibilidad de que los campos magnéticos engendren corriente. Esto abriría el camino a nuevas formas de producción de corriente eléctrica.

2.2. Campo magnético

En la actividad A.25 los alumnos indican correctamente que las líneas de campo son circulares, con centro en el cable y que la intensidad del campo magnético dependerá directamente de la intensidad de corriente I e inversamente de la distancia r al cable.

La actividad A.26 permite verificar experimentalmente la actividad anterior espolvoreando limaduras de hierro o, mejor, colocando agujas imanadas en distintas posiciones.

El sentido de las líneas de campo (actividad A.27) viene dado por la regla de la mano derecha: extendiendo el pulgar en el sentido de la intensidad, los demás dedos nos indican el sentido de las líneas de campo.

La actividad A.28 es una aplicación numérica de las actividades anteriores.

Las actividades del tipo de la A.29 (¿qué hacer para conseguir...?) son de naturaleza distinta a las habituales en un curso de ciencias y supone una aproximación a la tecnología. En este caso los alumnos sugieren enrollar todo el cable alrededor del punto considerado, en forma de espira o, mejor aún, de solenoide. Conviene que los alumnos lleven estas propuestas a la práctica y constaten que el solenoide actúa como un imán, tal como se propone en la actividad A.30.

2.3. Fuerzas entre campos magnéticos y cargas móviles

2.3.a. Fuerza sobre una carga móvil

Dada la dificultad de la ley de Lorentz, comenzaremos por plantearnos en qué casos tiene lugar la interacción entre una carga móvil y un campo magnético. En la actividad A.32

vemos que sólo actúa una fuerza cuando la carga está en movimiento y la velocidad de la carga no es paralela a las líneas de fuerza. Como la trayectoria es circular, se trata de una fuerza centrípeta.

En la actividad A.33, puesto que la fuerza sólo se ejerce si la carga está en movimiento, cabe esperar que sea función de la velocidad v , además de la carga q y de la intensidad del campo magnético \mathbf{B} . Por otra parte, como la fuerza es cero cuando v y \mathbf{B} tienen la misma dirección, debe depender del seno del ángulo que forman:

$$F = qvB \sin \Phi$$

Si tenemos en cuenta que la fuerza F es perpendicular al plano formado por v y \mathbf{B} , la expresión vectorial será

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

En la actividad A.34 se trata de aplicar la regla de la mano derecha o la del avance de un tornillo que gire de v a \mathbf{B} por el camino más corto.

Los problemas que se proponen en las actividades A.35 a A.39 se pueden plantear como pequeñas investigaciones. En la actividad A.35 como la fuerza es perpendicular a la velocidad v , varía la aceleración normal produciendo un movimiento circular uniforme

$$qvB = mv^2/r$$

de donde

$$r = mv/qB$$

En la actividad A.36 la energía cinética que adquieren los electrones sometidos a una ddp V es

$$v^2/2 = qV$$

por tanto, si sustituimos la velocidad se obtiene

$$r^2 = 2mV/qB^2$$

Es conveniente finalizar esta actividad realizando cálculos numéricos. Así, partiendo de la carga y de la masa del electrón ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C y $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg respectivamente), se pueden estimar los valores de v , V y B para que el detector no deba ser excesivamente grande ($r \approx 1$ m). Se encontrarán así valores realistas de dichas magnitudes, p.ej., $v \approx 10^6$ m/s, $V \approx 10^6$ V (o lo que es lo mismo, $qV \approx 1$ MeV) y $B \approx 10^{-6}$ T. También se puede calcular la masa (como en la experiencia de Millikan) dado que $q/m = 2V/B^2r^2$, donde la carga q es conocida.

En la actividad A.37 podemos ver que ambas partículas describen trayectorias circulares de distinto radio. Este hecho permite utilizar el dispositivo como separador de partículas con distinta relación q/m . Dicho aparato recibe el nombre de espectrográfico de masas y tiene gran importancia en el estudio de los núcleos (actividad A.38). Se puede realizar un ejercicio numérico utilizando las masas de los isótopos de C-12 y C-13, 12,00000 u y 13,00335 u respectivamente.

2.3.b. Fuerza magnética sobre una corriente

La actividad A.39 es muy simple si se tiene en cuenta la ley de Lorentz. Podemos suponer que la fuerza F será tanto mayor cuanto mayor sean I , B , l —longitud del conductor incluida en el campo— y el seno del ángulo Φ formado por I y B , o sea:

$$F = IlB \sin \Phi$$

Para comprobar esta ecuación, basta utilizar la ley de Lorentz y sustituir $dq = Idt$. Como $dl = vdt$, se obtiene

$$dF = IdlB \sin \Phi$$

En forma vectorial y para una corriente rectilínea indefinida resulta

$$\mathbf{F} = I(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$$

En la actividad A.40 vemos que la intensidad del campo magnético B es la fuerza que, por unidad de intensidad y de longitud, aparece en un conductor por el que circula una corriente, situado en un B perpendicularmente a las líneas del mismo

$$B = F/I$$

Por ello, el Tesla (T) es la intensidad de un campo magnético que ejerce una fuerza de 1 N sobre un conductor de 1 m de longitud, colocado perpendicularmente a las líneas de campo y por el que circula la corriente de 1 A. Abreviadamente $1 \text{ T} = 1 \text{ N/m A}$.

El funcionamiento de un galvanómetro, tal como se propone en la actividad A.41, se puede explicar teniendo en cuenta que sobre el cuadro de espiras actúan un par de fuerzas que lo hace girar hasta un ángulo, para el cual dicho par se compensa con el par recuperador de los muelles. El ángulo girado es proporcional a la intensidad I . El motor funciona basándose en el mismo principio que el galvanómetro, con la diferencia de que la bobina es mayor y está montada sobre un cilindro llamado rotor o inducido. Otro dispositivo cuyo análisis se puede proponer es el altavoz. Al igual que el motor, su funcionamiento se basa en el hecho de que un imán ejerce una fuerza sobre un hilo que conduce corriente. La salida eléctrica de una radio o de un televisor está conectado interiormente a una bobina de hilo unida al cono del altavoz, cuyo movimiento origina compresiones y enrarecimientos alternos del aire adyacente y se producen ondas sonoras.

La actividad A.42 resulta de gran interés, por su carácter recapitulador. Ya vimos en la actividad A.21 que la existencia de semejanzas condujo a Oersted a buscar una relación entre ambos. Se pueden mencionar entre ellas la dependencia de la intensidad de campo del medio, de la distancia y de la carga (o de la intensidad de corriente). En cuanto a las diferencias cabe mencionar el carácter conservativo del campo eléctrico y el no conservativo del campo magnético. En efecto, la fuerza magnética depende de la velocidad y, por ello, no podemos hablar de energías potenciales magnéticas. Por otra parte las líneas del campo eléctrico tienen fuentes (las cargas positivas) y sumideros (las cargas negativas). En cambio, las líneas del campo magnético son cerradas y su flujo a través de una superficie cerrada es nulo.

2.4. Explicación cualitativa del magnetismo natural

Tras haber visto en el apartado 2.2. que las cargas en movimiento producen campos magnéticos, en la actividad A.43 los alumnos conciben que el magnetismo podría estar igualmente asociado al movimiento de cargas y, más concretamente, al giro de electrones, lo que convierte cada átomo en un pequeño imán. A partir de esta idea, el profesor puede profundizar señalando que toda la materia tiene propiedades magnéticas, aunque muy débiles, porque los campos magnéticos atómicos están orientados al azar, anulándose sus efectos. En el caso de las sustancias como la magnetita, los átomos están orientados de forma que los efectos magnéticos individuales se refuerzan. La imanación del hierro puede entenderse como el resultado de una reorientación de los campos magnéticos elementales.

3. ELECTROMAGNETISMO**3.1. Inducción electromagnética****3.1.a. Ley de Faraday y Henry. Ley de Lenz**

En la actividad A.44 las propuestas de los alumnos consisten en mover un imán en las proximidades de un circuito cerrado. Utilizando como circuito una bobina conectada a un galvanómetro, los alumnos pueden verificar fácilmente la hipótesis tal como se propone en la actividad A.45. Conviene que el profesor salga al paso de esta aparente simplicidad que podría restar importancia al éxito que supuso, tras largos años de intentos infructuosos, la obtención por Faraday de corriente eléctrica. Así, pueden referirse los intentos del propio Faraday, quien en 1824 colocó imanes en la proximidad o dentro de un circuito cerrado. Tras algunos intentos fracasados abandonó el trabajo, reemprendiéndolo en 1831, esta vez con éxito.

En la actividad A.46 se presentan algunas de las experiencias que Faraday realizó y que ponen de manifiesto la complejidad de la inducción. Vemos que puede engendrarse corriente (una fem) en un circuito cerrado si hay movimiento relativo del imán (o del electroimán) respecto a la espira, lo que puede conseguirse moviendo el imán (o electroimán) o la espira, o si se modifica la intensidad del campo magnético (sin realizar ningún movimiento). También se produce corriente, si se modifica la superficie del circuito. Por otra parte, la fem inducida es mayor cuando se mueven más rápidamente el imán o el conductor. En resumen, se produce corriente siempre que haya una variación, con respecto al tiempo, del flujo magnético que atraviesa el conductor cerrado.

La actividad A.47 pretende que los alumnos, a partir de la observación de alguna de las experiencias más sencillas de las actividades anteriores, señalen que la corriente inducida tiene un sentido tal que trata de oponerse a la causa (variación del flujo) que la produce. Este resultado se concreta en un signo menos en la ley de Faraday y se conoce como ley de Lenz.

En la actividad A.48 vemos, por ejemplo, que si acercamos un polo norte a la espira, la corriente inducida en ésta habrá de producir un campo magnético que se oponga a la aproximación del imán, es decir, habrá de ser una cara norte. Si ahora alejamos el imán, la corriente en la espira habrá de tener un sentido tal que el campo magnético corresponda a una cara sur que dificulte el alejamiento.

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

Si en la actividad A.49 se aplica la ley de Faraday al caso en que $B = f(t)$ y $S = \text{cte}$ tendremos que:

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d(BScos\Phi)}{dt} = - \frac{S \cos\Phi dB}{dt}$$

En las actividades A.50 y A.51 vemos que una forma simple de lograr una ininterrumpida variación del flujo por movimiento relativo de inductor e inducido es el giro de uno en las proximidades del otro. Si aplicamos la ley de Faraday a una espira ($S = \text{cte}$) que gira con rapidez angular ω en un campo magnético constante, tendremos que

$$\varepsilon = -d(BS \cos \omega t)/dt = BS\omega \sin \omega t$$

Dicha expresión será cero cuando S y B tengan la misma dirección ($\sin 0 = 0$), o dicho de otro modo, cuando el flujo sea máximo. La fuerza electromotriz inducida será máxima cuando S y B sean perpendiculares ($\sin 90 = 1$), es decir, cuando el flujo sea 0.

La actividad A.52 es un ejemplo de actividad de interacción ciencia-técnica. Los alumnos pueden comprobar que el generador, al igual que un motor, consta de un inducido, devanado sobre un núcleo de hierro que puede girar en un campo magnético. Según vimos, un motor gira sobre su eje cuando recibe una corriente eléctrica. En un generador se hace girar el eje por medios mecánicos y se induce una fem en el devanado giratorio.

La expresión de la actividad A.53 nos indica que la fem, y por tanto la ddp entre los bornes, varía sinusoidalmente con el tiempo. La corriente generada será alterna.

Las actividades A.54, A.55 y A.56 son actividades de interacción CTS. En la actividad A.54 se trata de que los alumnos enumeren los distintos tipos de centrales (o pequeñas unidades, para no excluir algunas energías alternativas) existentes, tanto las más usuales (térmica, hidroeléctrica, nuclear) como las alternativas (maremotrices, geotérmicas, eólicas, solares, etc.), haciendo referencia a los problemas, en particular, el impacto ambiental de las centrales nucleares y térmicas y los bajos rendimientos, así como las ventajas de las alternativas e hidroeléctricas. Otra ventaja de las pequeñas unidades (solares, eólicas, etc.) es su descentralización. La actividad A.55 pretende ver cómo funcionan dichas centrales y las transformaciones energéticas que tienen lugar en ellas. Por último, la actividad A.56 hace referencia a las ventajas del transporte con líneas de alta tensión, a la necesidad de transformadores, etc.

3.2. Teoría electromagnética de Maxwell

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

La actividad A.57 es una actividad de recapitulación y, por ello, de gran interés. En primer lugar estudiamos la interacción entre cargas en reposo, que interpretábamos como consecuencia de la existencia de un campo eléctrico. Las experiencias de Oersted, Ampère, etc., demostraron la existencia de una interacción entre cargas en movimiento, que se interpreta suponiendo la existencia de un campo magnético creado por una carga móvil. Dicho campo ejerce su acción sobre otras cargas móviles. La inducción electromagnética, por último, muestra que los campos magnéticos en movimiento relativo con respecto a un conductor y

los campos magnéticos variables con el tiempo, inducen corriente en el conductor, es decir, producen en éste un campo eléctrico.

La actividad A.58 permite mostrar cómo Maxwell supuso que, del mismo modo que en la inducción, un campo magnético variable produce un campo eléctrico, un campo magnético, podrá ser engendrado no sólo mediante el movimiento de las cargas, como ya se sabía desde Oersted, Ampère, etc., sino también mediante una variación con el tiempo de un campo eléctrico.

La actividad A.59 no ofrece dificultad. El cálculo de la velocidad de las oem en el vacío proporciona un valor de 3.10^8 m/s. Este era precisamente el valor experimental para la velocidad de la luz en el vacío (o en el aire), lo que parecía indicar el origen electromagnético de las ondas luminosas.

La actividad A.60 permite recordar que la intensidad I de una onda es proporcional al cuadrado de su amplitud. En el caso de las oem la intensidad es proporcional al cuadrado del campo eléctrico. Concretamente

$$I = c\varepsilon_0 E^2$$

o como $E = Bc$,

$$I = c^2\varepsilon_0 EB$$

En la actividad A.61. se debe igualar la intensidad de una onda $I = P/S$ (siendo S la superficie que atraviesa) con la expresión obtenida en la actividad A.60. Despejando E se tiene

$$E = \sqrt{\frac{P}{Ac\varepsilon_0}}$$

Sustituyendo los datos se obtiene 54,8 V/m en el caso de la bombilla y 204,9 V/m en el caso del Sol.

3.2.b. Experiencia de Hertz. Espectro electromagnético

Si en la actividad A.62 la fem varía sinusoidalmente, las intensidades del campo eléctrico y magnético lejos del generador también lo harán. Observemos que, como hemos dicho, el campo eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación, y están en fase. Pero las variaciones serán recibidas por la otra antena en el instante $t = t_0 + d/c$, siendo c la velocidad de la luz. En este punto se puede proceder a la lectura del cuadro «Breve historia del concepto de campo». Dicho cuadro pone de manifiesto la aparición del concepto de campo y lo difícil que fue su aceptación por la comunidad científica, que se aferraba al mecanicismo newtoniano.

La actividad A.63 es una sencilla aplicación de la expresión $c = \lambda\nu$.

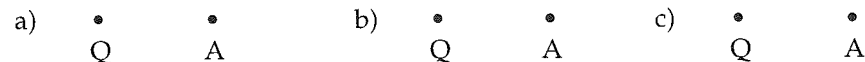
CRITERIOS DE EVALUACIÓN

1. Utilizar el concepto de campo para superar las dificultades que plantea la interacción a distancia e instantánea entre cargas.

- Determinar el campo eléctrico creado por una o dos cargas en reposo y el campo magnético creado por una corriente rectilínea indefinida o un solenoide.
- Identificar las fuerzas que actúan sobre una carga en movimiento en el seno de campos eléctricos o magnéticos uniformes (perpendiculares o tangentes a la trayectoria), así como el tipo de movimiento que realizará.
- Calcular el movimiento de un chorro de electrones en un tubo de rayos catódicos, es decir, sometido a campos eléctricos uniformes tangenciales o perpendiculares a su movimiento.
- Determinar el movimiento de un haz de partículas cargadas en un espectrógrafo, es decir, en un campo magnético uniforme perpendicular a la trayectoria.
- Explicar la producción de corriente eléctrica mediante variaciones del campo magnético.
- Diseñar una experiencia para producir corriente inducida.
- Determinar el sentido de la corriente inducida en diversos dispositivos.
- Realizar esquemas de centrales eléctricas, comprendiendo que la única diferencia entre ellas es la fuente de energía que se utiliza para mover el alternador.
- Valorar las ventajas e inconvenientes de distintas fuentes (renovables o no, descentralizadas o no) para obtener energía eléctrica.
- Enumerar aplicaciones de la electricidad, el magnetismo, las ondas electromagnéticas, etc.
- Comprender algunos aspectos de la síntesis de Maxwell: el campo electromagnético, la predicción de ondas electromagnéticas y la integración de la Óptica.
- Valorar los informes sobre las diversas experiencias realizadas en este tema (Oersted, Faraday, etc.).

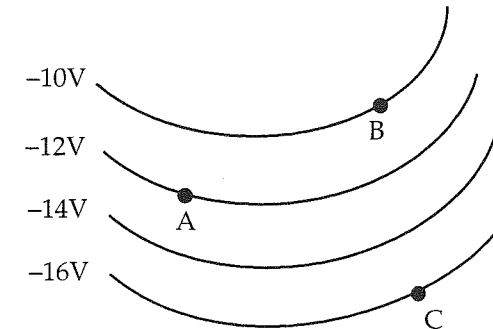
ACTIVIDADES DE EVALUACIÓN

- Dibujar el vector intensidad de 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.



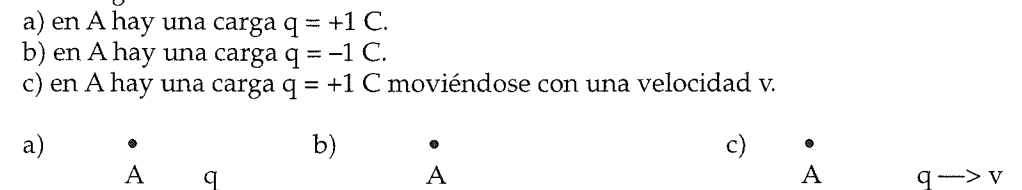
- Se tiene un condensador plano formado por dos placas cuadradas de 10 cm de lado, separadas 1 cm, entre las que se ha establecido una diferencia de potencial de 500 V. Se lanza un electrón rasante a la placa negativa con una velocidad de 10^8 m/s . Obtener la ecuación de la trayectoria del electrón.

- Calcular el trabajo necesario para colocar una carga positiva q en cada uno de los vértices de un cuadrado de lado l .
- En la figura aparecen las superficies equipotenciales de un campo eléctrico.



- Dibujar la dirección y el sentido del campo eléctrico en los puntos A y B.
- Calcular el trabajo realizado por las fuerzas exteriores cuando una carga de 5 C pasa del punto A al C.
- Calcular el trabajo realizado por las fuerzas del campo cuando una carga de 8 C pasa del punto B al C.

- Tenemos un conductor metálico por el que circula una corriente rectilínea cuyo sentido es saliendo del papel. Dibuja el vector intensidad de campo en el punto A en los tres casos siguientes:



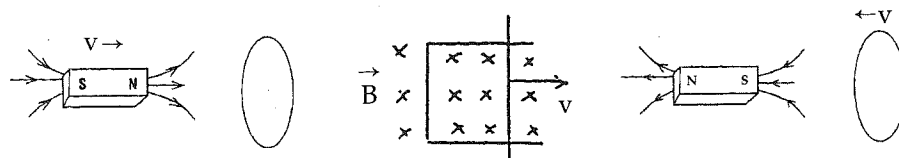
- Se han determinado los valores del campo magnético B creado por una corriente rectilínea de intensidad I en función de la distancia al conductor r (para la intensidad I constante) y en función de la intensidad I (para la distancia r constante):

I (A)	B (10^{-6} T)
0,5	0,65
0,8	1,04
1,2	1,56
1,8	2,34

r (cm)	B (10^{-6} T)
5	4,0
10	2,0
15	1,2
25	0,8

Analizar los resultados y deducir a partir de ellos la ley que relaciona dichas variables.

7. Señalar analogías y diferencias entre un campo electrostático y un campo magnetostático.
8. Indicar el sentido de la corriente inducida en cada uno de los casos siguientes:



9. Enumera los distintos tipos de centrales eléctricas que conozcas señalando en qué consiste el mecanismo de producción de energía eléctrica.
10. ¿Existen otras formas de producción de energía eléctrica diferentes a las centrales? Valorar el impacto ambiental, el carácter renovable, etc. de las distintas formas de producir energía eléctrica, incluyendo las centrales.
11. Cuando el político Gladstone le preguntó a Faraday sobre la utilidad de sus trabajos, éste le contestó: «Señor, algún día cobrará impuestos por ellos». Señalar las diversas aportaciones de la electricidad y del magnetismo a la vida de la humanidad.

BIBLIOGRAFÍA

- BERKSON, W., 1985, *Las teorías de los campos de fuerza* (Alianza : Madrid)
- LLORENS, J., 1994, Visualización de las líneas equipotenciales en un campo eléctrico, *Alambique*, 2, 127-128.
- SOLBES, J.; BERNABEU, J.; NAVARRO, J. y VENTO, V., 1988, Dificultades en la enseñanza/aprendizaje de la física cuántica, *Revista Española de Física*, 2, 22-27.
- SOLBES, J. y MARTÍN, J., 1991, Análisis de la introducción del concepto de campo, *Revista Española de Física*, 5, 34-40.

TERCERA PARTE

LA CRISIS DE LA FÍSICA CLÁSICA Y EL SURGIMIENTO DE LA FÍSICA MODERNA

Los estudiantes realizan, en la actividad A.1 enumeraciones poco sistemáticas. Es necesario que el profesor las estructure y se refiera a:

- la precisión alcanzada por la Mecánica en la descripción y predicción del movimiento, tanto de objetos terrestres como celestes.
- los grandes principios de conservación y transformación (de la masa, energía, cantidad de movimiento, carga) como expresión de la unidad de la materia. Esta contribución a una visión unitaria es uno de los rasgos más característicos del desarrollo de la ciencia y es evidente también en la síntesis electromagnética o en la ley de Gravitación Universal.
- las grandes revoluciones tecnológicas que supusieron las máquinas térmicas (factor esencial en la primera Revolución Industrial), la producción y transmisión de la corriente eléctrica (que hizo posible la concentración de las grandes cantidades de energía necesarias en la industria y ciudades modernas) o de las ondas electromagnéticas, que harían posible la rápida transmisión de información (telegrafía sin hilos, radio, televisión, etc.).

Finalmente, la mayor aportación de la ciencia clásica consistió en la nueva forma de abordar los problemas—con la sustitución de un pensamiento basado en «las evidencias del sentido común» por uno más riguroso y creativo, con las hipótesis como núcleo central—y el gran desarrollo a que dio origen.

En la actividad A.2 se puede insistir, entre otras, en las siguientes características del mecanicismo:

- concibe el espacio como un receptáculo, independiente de los objetos que contiene y que no ejerce ninguna acción sobre los mismos.
- los cuerpos se desplazan en este espacio absoluto, sufriendo una evolución medible en una escala temporal también absoluta.
- las interacciones de unos objetos con otros producen modificaciones en su estado de movimiento que son perfectamente determinables por las leyes de la Mecánica. El conocimiento de las ecuaciones del movimiento de un objeto permite predecir su posición, velocidad, etc. en cualquier instante. Hay, pues, que resaltar que se trata de una concepción claramente determinista.
- se distingue nítidamente entre materia (constituida por átomos) y radiación (concebida como energía sin sustrato material).

No conviene dar a esta síntesis un matiz peyorativo. Por el contrario, conviene resaltar el portentoso edificio teórico que supuso la Física clásica y sus implicaciones tecnológicas, a las que nos hemos referido en la actividad A.1.

La actividad A.3 se convierte en una ocasión para revisar algunas de las tesis principales de la Física del sentido común a las que ya nos hemos referido en cursos anteriores. En particular, recordar la visión jerárquica de la naturaleza, con una neta separación entre Fís-

Todos los libros de Física y Química de tercer curso de BUP y de COU incluyen ideas de Física moderna, aunque la situación es muy diferente en los diversos temas. Los libros de texto no introducen ningún capítulo sobre Relatividad, al no figurar este tema en los programas oficiales, aunque todos utilicen—sobre todo en Física nuclear—algunos resultados de la teoría, en particular, la equivalencia masa/energía. En todos los libros de textos aparecen ideas de Física cuántica y la mayoría del profesorado suele introducirlas en los temas de Química sobre «Estructura atómica». En la Física de COU aparece un tema sobre «Naturaleza de la luz. Dualidad onda corpúsculo». Así mismo, se introducen ideas de Física nuclear en la Química (protón, neutrón, números atómico y másico, isótopos, etc.) y en el tema de Física de COU «Física nuclear de baja y alta energía. Energía nuclear». Incluso en el tema «Electrónica. Ondas electromagnéticas» de Física de COU aparecen algunas ideas de la Física de sólidos (teoría de bandas, semiconductores, etc.) que no se introducen en los nuevos programas de Física del Bachillerato.

Por tanto, el problema no es la introducción de la Física moderna sino cómo se enseña. En efecto, en trabajos anteriores (Gil *et al* 1986 y 1989, Solbes *et al* 1989) hemos detectado mediante el análisis de textos (más de 50 textos de secundaria y unos 17 de Física y Química general) y cuestionarios de profesores, que dicha introducción se plantea, en la mayor parte de los casos, sin tomar como punto de partida las dificultades insuperables que originaron la crisis de la Física clásica y sin tener en cuenta los límites de validez de ésta y las diferencias entre la visión clásica y moderna del comportamiento de la materia. La enseñanza de la Física moderna vendría caracterizada, en general, por una introducción desestructurada que, simplemente, yuxtapone, o incluso mezcla, las concepciones clásicas y modernas. Además, dicha iniciación va acompañada de errores conceptuales junto con ideas correctas, que analizaremos en cada uno de los temas.

En consecuencia, esta enseñanza dificulta que los alumnos comprendan las ideas y conceptos básicos de la Física moderna y hace que incurran en errores conceptuales e interpretaciones incorrectas. En particular, encontramos (Gil *et al* 1986 y 1989, Solbes *et al* 1989) elevados porcentajes de alumnos de BUP y COU (entre el 80 y el 94 %, para una muestra de 536) que desconocen la existencia de crisis en el desarrollo de la Física, no citan ninguno de los problemas que provocaron dicha crisis y no mencionan ninguna de las diferencias entre Física clásica y moderna.

Para superar estas dificultades de los alumnos es necesario proporcionar una visión estructurada de la Física, que tenga en cuenta los grandes cambios de paradigma. Por ello, al finalizar la Física clásica es conveniente realizar una síntesis que muestre las principales teorías que la constituyen y cómo apareció, al no poder explicar la concepción anterior (la física preclásica), unos problemas muy determinados. Esto facilita que los alumnos comprendan cómo las nuevas dificultades surgidas en el marco clásico pueden, a su vez, originar la crisis del mismo.

ca terrestre y Física celeste; la tendencia de los cuerpos terrestres a ocupar su «lugar natural» y permanecer allí en reposo, que implica concebir las fuerzas como causa del movimiento y admitir que los cuerpos más pesados caen más deprisa; el carácter de movimiento «perfecto», sin principio ni fin y «no forzado» de los objetos celestes; el «horror al vacío» de la naturaleza, etc.

La actividad A.4 constituye una ocasión más para abordar las características del trabajo científico más allá de las visiones simplistas habituales, resaltando en particular la sustitución de un pensamiento basado en las evidencias del sentido común, en las autoridades, etc., por un pensamiento a la vez más creativo, con las hipótesis como núcleo central, y más riguroso, con realización de experiencias y utilización de las Matemáticas. Precisamente todo el desarrollo de la asignatura debe haber ayudado a producir el mismo cambio en los alumnos, cuya metodología espontánea tiene las mismas características de la metodología del sentido común.

La actividad A.5 es extraordinariamente abierta. Se pueden sistematizar las aportaciones de los alumnos señalando que inicialmente la ciencia y la técnica eran dos tradiciones básicamente independientes, cultivadas por colectivos diferentes: los teóricos (filósofos, sacerdotes, etc.) y los artesanos. Los campos científicos más desarrollados eran las Matemáticas, la Astronomía y la Medicina, con algunas aplicaciones como llevar cuentas, realizar medidas, construir calendarios, etc. En resumen, la ciencia era una fuerza social menor (Mason 1987).

En el Renacimiento, se inicia la convergencia de ambas tradiciones. Muchas investigaciones científicas han tenido su origen en problemas de orden técnico (la Cinemática de Galileo tiene relación con el lanzamiento de proyectiles, el Magnetismo de Gilbert con la brújula, etc.). Además, el avance técnico determina con frecuencia la misma posibilidad del trabajo científico (los progresos en Astronomía se vinculan a la construcción de telescopios).

Sin embargo, la mayor aportación de la ciencia clásica consistió en la nueva forma de abordar los problemas, que hemos caracterizado en la actividad A.4. El prodigioso desarrollo a que dio origen, suponía en ocasiones la ruptura radical con las concepciones vigentes. Un ejemplo típico es la teoría heliocéntrica de Copérnico, cuyos defensores, como Galileo, sufrieron persecuciones e incluso fueron condenados a muerte, como Giordano Bruno. Así mismo hay que destacar, el papel de la ciencia en la evolución de las ideas filosóficas, religiosas, artísticas, etc. (influencias del mecanicismo en la Ilustración, etc.).

Hasta el siglo XIX, en plena Revolución Industrial, los desarrollos técnicos siguen precediendo a los científicos. En efecto, la construcción y utilización de máquinas térmicas por Newcomen, Watt, etc. es previa a la Termodinámica. Pero, a partir de este momento, la relación parece cambiar de sentido y algunas ramas de la ciencia que se desarrollan en este siglo, como el Electromagnetismo y la Química, son el origen de la industria eléctrica, química, etc.

También a nivel ideológico se ha pasado de la persecución inicial a un cientifismo, supuestamente por encima de las ideologías que tratan de limitar la ciencia a una función meramente operativa, favorecedora del desarrollo técnico, pero negándole toda incidencia en la concepción del mundo o en cuestiones de organización social que afecten a los intereses de los grupos privilegiados. Una postura como la que acabamos de describir ha engendrado en la última década una nueva actitud de condena hacia la ciencia. Se la acusa de la destrucción sistemática del medio ambiente por las modernas industrias, de la invención de armas cada vez más mortíferas, de originar productos que pasan automáticamente de moda en aras de un consumismo deshumanizador, etc. (Seminari de Física i Química 1988).

En la actividad A.6 los estudiantes sólo pueden citar aquellos problemas sobre los que se ha llamado la atención en los temas precedentes o en otros cursos, en particular, los espec-

tros discontinuos y la inestabilidad del átomo de Rutherford (vistos en la Química), el efecto fotoeléctrico (introducido al describir las experiencias de Hertz para contrastar la emisión de radiaciones electromagnéticas) y el carácter de sistema en reposo absoluto del espacio (en Cinemática). Si no se han visto, es evidente que no podrán contestar nada. Pero el profesor no debe olvidar que existieron más y mencionará alguno de ellos, si lo considera oportuno. Hubo algunos muy vinculados a la Física del estado sólido: los espectros continuos de sólidos y líquidos incandescentes; el incumplimiento de la ley de Dulong y Petit en el calor específico de los sólidos; la resistividad de los metales, predicha mediante el modelo de Drude-Lorentz, era mayor que la experimental, etc.

BIBLIOGRAFÍA

- GIL, D.; SENENT, F. y SOLBES, J., 1986, Análisis crítico de la introducción de la Física moderna, *Revista de Enseñanza de la Física*, 2, 16-21.
- GIL, D.; SENENT, F. y SOLBES, J., 1989, Física moderna en la enseñanza secundaria: una propuesta fundamentada y unos resultados, *Revista Española de Física*, 3, 53-58.
- SOLBES, J. y NAVARRO, J., 1989, *Física moderna* (Conselleria de Cultura, Educació i Ciència: València).

5. ELEMENTOS DE FÍSICA RELATIVISTA

Como ya hemos indicado anteriormente, los libros de texto de BUP y COU de nuestro país no introducen ningún capítulo sobre Relatividad, al no figurar este tema en los programas oficiales. A pesar de lo anterior, todos los libros de texto utilizan en la Física nuclear algunos resultados de la teoría, especialmente, la equivalencia masa/energía.

En este tema aparecen ideas erróneas en los textos (Warren 1976, Solbes 1986 y Gil, Senent y Solbes 1988). Se considera que existen transformaciones (o conversiones de materia en energía, aplicadas casi exclusivamente a reacciones nucleares) lo que conduce a afirmar que no se cumple la ley de conservación de la masa, de la energía o ambas. Los alumnos, en consecuencia, también señalan que la materia se transforma en energía. Por otra parte, desconocen las implicaciones del carácter límite de la velocidad de la luz en Relatividad y algunos señalan que la velocidad de una partícula, sometida a una fuerza constante, aumenta linealmente con el tiempo (Solbes 1986, Gil, Senent y Solbes 1986). Esta idea persiste en alumnos de segundo curso de Físicas, un 20% de los cuales señala que la velocidad de los electrones no influye en la trayectoria (Solbes *et al* 1988). Por último, en Hewson (1982) se muestra que tanto alumnos como profesores de nivel universitario consideran la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud como distorsiones de la percepción y así pueden mantener las hipótesis subyacentes de las transformaciones de Galileo: la identidad de los intervalos temporales y espaciales (es decir, la existencia de un espacio y un tiempo absolutos). En otras palabras, se asimilan las ideas relativistas reconciliándolas con las clásicas.

La ausencia de textos y materiales que introduzcan en nuestro país la Física relativista a este nivel, puede impulsar al profesor a utilizar textos de Física General (como Tipler 1992, Gettys *et al* 1992), olvidando que éstos se dirigen a un nivel superior, el primer curso de universidad. Por ello también es conveniente analizar libros del nivel que nos ocupa, el último curso de secundaria (Hewitt 1992, Harvard Project Physics 1970) o libros de Física como Holton (1976) o Giancoli (1985).

Observamos en todos ellos un amplio consenso con respecto a los conceptos que hay que introducir, como los postulados de la Relatividad, la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud, la variación de la masa con la velocidad, la equivalencia masa-energía, etc. Sin embargo, se observan discrepancias en la forma de introducir dichos conceptos.

Para evitar los problemas mencionados en los dos primeros párrafos de estos comentarios, pensamos que un buen camino puede consistir en la introducción de los aspectos básicos de la teoría de la Relatividad, mostrando que ésta supuso una crítica de las hipótesis implícitas de la Física clásica (el espacio y el tiempo absolutos y la invarianza de la masa) dado que dichas ideas están profundamente arraigadas en la estructura conceptual del alumno.

En los textos de Física General se observa una fuerte tendencia a iniciar el tema con una descripción detallada del experimento de Michelson-Morley (p.ej., Tipler 1992, Gettys *et al* 1992, Holton 1976). Esto quizá guarde mayor fidelidad con la cronología de la Relatividad o con la idea empirista de que la ciencia se produce por inducción a partir de los hechos. Pero históricamente no sucedió así, dado que Einstein no conocía la experiencia de Michelson y Morley, como él mismo señala (ver Thuillier 1990) y como pone de manifiesto el debate entre Whittaker, Holton y Grunbaum sobre la génesis de la Relatividad (ver Einstein *et al* 1975). Y, además, no parece didácticamente conveniente, por la misma complejidad del experimento (recordemos que sólo se ha realizado un tratamiento cualitativo y experimental de las interferencias) y porque la cuestión del éter enmascara el problema fundamental: la visión del espacio y del tiempo.

Por ello, la alternativa que proponemos consiste en mostrar cómo las experiencias mecánicas no permiten distinguir entre un sistema en reposo y otro que se desplace con movimiento rectilíneo uniforme. Queda pendiente el problema de la diferenciación por medio de otro tipo de experiencias (ópticas, por ejemplo). Esto puede ser planteado de una forma sencilla, mediante el estudio del tiempo que tarda la luz en recorrer una cierta distancia sobre la Tierra. Si aceptamos que ésta se mueve con velocidad v con respecto al espacio, el tiempo dependerá de la dirección en que la luz recorra esa distancia, lo que contradice la experiencia y obliga a cuestionar las hipótesis subyacentes de las transformaciones de Galileo, es decir, la identidad de los intervalos espaciales y temporales (la existencia de un espacio y tiempo absolutos). La crítica de estas ideas es esencial porque, de lo contrario, permanecen en la estructura conceptual, reconciliadas con las ideas clásicas, considerando la dilatación del tiempo o la contracción de la longitud como distorsiones en la percepción.

Después de introducir los postulados, muchos libros de Física General deducen las transformaciones de Lorentz para, a partir de ellas, obtener la dilatación temporal y la contracción de la longitud. Esta es una forma de hacerlo, pero no parece la más adecuada para este nivel porque, como el propio Tipler (1992) señala «hay que ser cuidadoso con las deducciones». Por otra parte, estos desarrollos matemáticos pueden enmascarar a los estudiantes de enseñanza secundaria el profundo sentido físico de la dilatación.

Por ello pensamos que el método más conveniente para introducir la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud, sin usar las transformaciones de Lorentz, es el sencillo ejemplo del reloj de luz. De hecho, gran parte de los libros de Física General (Tipler 1992, Gettys *et al* 1992, etc.) presentan el reloj de luz como método alternativo porque «permite comprender la dilatación del tiempo directamente a partir de los postulados de Einstein sin utilizar la transformación de Lorentz» (Tipler 1992). En textos más ajustados a este nivel, como Giancoli (1985) o Hewitt (1992), se introduce sólo el reloj de luz (aunque Giancoli presenta las transformaciones al final del tema en una apartado optativo). Por último el Project Physics (1970) ni siquiera introduce la dilatación del tiempo, quizá por considerarla muy compleja para este nivel. Se pasa directamente de los postulados a la variación de la masa con la velocidad y la equivalencia masa-energía, que utilizan posteriormente en Física nuclear.

Por el contrario, pensamos que introducir la dilatación temporal y la contracción de la longitud es más conveniente porque la equivalencia masa-energía aparece, no como una aproximación para altas velocidades, sino como una modificación en las leyes fundamentales de la Mecánica clásica, debida a los profundos cambios en los conceptos cinemáticos.

Por último queremos subrayar la importancia de mostrar que los resultados de la Teoría de la Relatividad han sido confirmados experimentalmente con partículas aceleradas (aumento de la vida media, de la masa, etc.) y con la posibilidad de poder liberar grandes cantidades de energía en los procesos nucleares.

1. FRACASO EN LA DETECCIÓN DE UN SISTEMA DE REFERENCIA EN REPOSO ABSOLUTO

En la actividad A.1 algunos alumnos contestan que la pelota se retrasa, lo que permite realizar una crítica del preconcepto. Pero habitualmente contestan que ninguna, dado que la experiencia cotidiana muestra que no existen diferencias entre fenómenos que ocurren en sistemas de referencia en reposo o con MRU (es decir, no acelerados entre sí o inerciales)

uno respecto del otro. La razón de esto es muy simple, como ya lo puso en evidencia el propio Galileo; la pelota lanzada hacia arriba desde la barca lleva la velocidad de ésta.

La actividad A.2 permite obtener las ecuaciones: $x' = x - vt$, $y' = y$, $z' = z$, $t' = t$, que transforman las coordenadas de un sistema en reposo a otro en movimiento rectilíneo uniforme. Se conocen como transformaciones de Galileo.

En la actividad A.3 se deduce cuantitativamente el principio de relatividad de Galileo al mostrar que:

$$V_{x'} = V_x - v, V_{y'} = V_y, V_{z'} = V_z$$

y, por tanto,

$$a_{x'} = a_x, a_{y'} = a_y, a_{z'} = a_z$$

Para calcular el tiempo, tal como se propone en la actividad A.4, se debe considerar que, con respecto al éter (o como éste lo llena, con respecto al espacio absoluto), la velocidad de la luz sería c , pero en un sistema que se mueva con respecto del éter dicha velocidad sería, de acuerdo con las transformaciones de Galileo, $c + v$ en el caso en que la Tierra se mueva en sentido contrario a la propagación de la luz y $c - v$ en el caso en que se mueva en el mismo sentido. Es lo mismo que sucede cuando calculamos, desde nuestro coche en movimiento, la velocidad de un coche que se mueve en sentido contrario al nuestro, o de otro que se mueva en el mismo sentido. Es decir, las aceleraciones y, por tanto, las fuerzas y, en consecuencia, las leyes de la Mecánica son invariantes en distintos sistemas de referencia inerciales (SRI) entre sí.

2. LOS POSTULADOS BÁSICOS DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL

3. ALGUNAS APLICACIONES DE LA FÍSICA RELATIVISTA

3.1. Dilatación del tiempo. Contracción de la longitud

Las actividades A.5 y A.6 permiten introducir la dilatación temporal. En efecto, el camino recorrido por la luz para el observador O sería ct , mayor que ct' , correspondiente a un observador O' que se mueva solidario con el reloj. La distancia recorrida por el reloj será vt . Por tanto se cumplirá:

$$(ct)^2 = (ct')^2 + (vt)^2$$

de donde

$$t = t' / (1 - (v/c)^2)^{1/2}$$

Los estudiantes encuentran en la actividad A.7 que, tal como hemos visto, la vida media de una partícula inestable aumenta (en el caso anterior, del orden de 1,8 veces) cuando ésta posee una velocidad v grande con respecto al sistema de referencia al que está unido el observador. Un observador solidario a la partícula mediría un tiempo de vida media normal para ésta y, en cambio, vería alargarse la vida media de las partículas que están en reposo con respecto al primer experimentador.

La actividad A.8 permite señalar que sólo existe una diferencia sensible entre t y t' , cuando v tiene valores elevados, próximos a c , lo que justifica que en las experiencias cotidianas

se pueden seguir tomando como iguales, es decir, se pueda considerar una única escala absoluta de tiempos.

La actividad A.9 introduce la contracción relativista de longitudes. Para el observador O , la longitud es $L = x_2 - x_1$, es decir, la longitud propia (medida en un sistema de referencia en la que se encuentra en reposo). Así mismo es la distancia recorrida por el reloj en el tiempo t , $L = vt$. Por otra parte, desde el sistema O' , la varilla se mueve durante un tiempo t' con una velocidad v y, por tanto, la longitud será $L' = vt'$. Usando la relación de tiempos tenemos $L' = L (1 - (v/c)^2)^{1/2}$, es decir, $L' < L$, es decir cualquier longitud es menor que la propia.

3.2. Equivalencia masa/energía

Existe una cierta controversia sobre la conveniencia de introducir la masa relativista. La mayoría de los autores de textos de Física (Feynman 1971, Alonso-Finn 1970, Holton 1976, Giancoli 1985, etc.) optan por hacerlo, en tanto que los textos más avanzados no lo hacen. Algunos autores (Tipler 1980) señalan que no es conveniente hacerlo para evitar errores como la obtención de expresiones relativistas (p.ej., de la energía cinética) sustituyendo la masa en reposo por la relativista. Otros (Wangness 1991) señalan que se logra una mayor concordancia con el enfoque covariante de la relatividad si se adjudica una propiedad escalar invariante (bajo las transformaciones de Lorentz) a la partícula, su masa en reposo, y después se define el cuadrivector momento como el producto de ese invariante por el cuadrivector velocidad.

Consideramos (Gil *et al* 1988), con los autores mencionados en primer lugar, que es conveniente introducir la masa relativista m por razones didácticas. Puede favorecer una interpretación correcta de la relación $E = mc^2$, al mostrar la variación de la masa con la velocidad como una variación que tiene lugar al comunicar energía cinética al cuerpo, es decir, como una consecuencia de la equivalencia masa/energía. Permite, así mismo, comprender el comportamiento material de la luz (capacidad de transmitir cantidad de movimiento –efecto Compton, etc.– o de interaccionar gravitatoriamente). También se pueden aportar razones experimentales e históricas. En efecto, la variación de m con v aparece en muchas experiencias en las que tenemos partículas cargadas moviéndose a gran velocidad. Históricamente se abordó el tema de la variación de la masa con la velocidad antes de que Einstein formulase la teoría especial en 1905. La Relatividad acabó con la imagen clásica de una partícula como una pequeña esfera y con el origen puramente electromagnético de la masa. Quizá una parte sí lo sea; lo ponen de manifiesto las diferencias de masa entre una partícula neutra y cargada. Sin embargo, seguimos sin saber que es lo que hace que un electrón tenga masa (Pais 1984, Berkson 1985, Feynmann 1972).

Las actividades A.11, A.12 y A.13 son coherentes con esta propuesta y muestran cómo la masa del cuerpo va aumentando con la velocidad y tiende a infinito cuando la velocidad v tiende a c . Sólo para velocidades $v < 0,2c$ la masa es prácticamente constante. Esto es una nueva evidencia del carácter límite de la velocidad de la luz.

La masa y la energía son dos magnitudes equivalentes, siendo c^2 el factor que permite la conversión de una a la otra (de la misma forma que el equivalente mecánico permite la transformación de julios a calorías).

En la actividad A.15 vemos que para el cálculo se pueden utilizar los valores de m/m_0 determinados en la actividad A.13 (10; 1,4; 1,2; 1,12 y 1,05, respectivamente). La utilización

de las expresiones clásicas depende de la relación entre la energía cinética y la energía en reposo (511 keV). Como ésta es pequeña, bastan velocidades de 0,1c para encontrar condiciones relativistas.

Para resolver la actividad A.16 partimos de las relaciones

$$p = m_0 v / (1 - (v/c)^2)^{1/2} \text{ y } E = m_0 c^2 / (1 - (v/c)^2)^{1/2}$$

Un procedimiento simple es combinar ambas expresiones de forma que $1 - (v/c)^2$ aparezca en el numerador. Para ello multiplicamos p por c, elevamos ambas expresiones al cuadrado y las restamos. Obtendremos

$$E^2 - (pc)^2 = (m_0 c^2)^2$$

o bien

$$E^2 = (m_0 c^2)^2 + (pc)^2$$

Con referencia a la actividad A.17 es preciso salir al paso de una confusión muy extendida. Consiste en concebir la relación $E = mc^2$ como expresión de una posible conversión o transformación de masa en energía («desmaterialización») y viceversa. Como señala Warren (1976): «La falsedad más común en la relación de Einstein es inferir que la masa puede convertirse en energía y viceversa: 'En ciertos procesos la masa puede ser convertida en una cantidad equivalente de energía'. Se puede asumir que los autores quieren decir que inicialmente se tiene una cantidad de masa y no de energía. Entonces la reacción cede energía y pierde masa. Esta idea es absolutamente contraria al principio de Einstein. De acuerdo con Einstein, si comenzamos con una masa m, ésta tiene un contenido de energía $E = mc^2$. Si esta energía es cambiada a alguna otra forma, existe todavía la misma cantidad de energía E la cual tiene la misma masa m». En resumen, la masa final es idéntica a la de partida y lo mismo sucede con la energía, por lo que ambas leyes de conservación son equivalentes.

4. PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA

Para demostrar que la masa inercial coincide con la gravitatoria, tal como se indica en la actividad A.18, se debe considerar que, según la ley de movimiento, se cumple $F = m_i a$, donde la masa inercial m_i es una constante característica del cuerpo acelerado. Si la fuerza aceleradora es la de la gravedad tenemos $F = m_g g$, donde m_g es una característica del cuerpo acelerado y g es la intensidad del campo gravitatorio. A partir de ambas relaciones se sigue que:

$$a = m_g g / m_i$$

Si queremos que en un campo gravitatorio la aceleración sea siempre la misma, independientemente de la naturaleza y del estado del cuerpo, tal y como demuestra la experiencia, la relación m_g / m_i tiene que ser igual (constante) para todos los cuerpos. Con la adecuada elección de unidades esta constante es 1.

En el caso a) de la actividad A.19, el observador interior comprueba que los cuerpos libres se desplazan con MRU y no están acelerados. Si la nave se coloca en un campo gravitacional y se deja caer libremente (c), como la aceleración de la gravedad es la misma para todos los cuerpos, incluyendo las paredes de la nave, el observador interno no tiene

posibilidad de distinguir esta situación de la anterior. Si la nave se lleva de nuevo al espacio vacío y se acelera uniformemente por medio de un cohete con una aceleración $a = g$, todos los cuerpos de su interior aparecerán con una aceleración común g exactamente opuesta a la de la nave. Si ahora colocamos la nave en presencia de un campo gravitacional g, el observador encontrará que los movimientos no son distinguibles de los que observó en el anterior experimento. En resumen, un observador no tiene medios de distinguir si se encuentra en un campo gravitatorio uniforme o en un sistema de referencia acelerado. Esta proposición es conocida como principio de equivalencia.

CRITERIOS DE EVALUACIÓN

1. Comprender que la Física clásica no puede explicar una serie de fenómenos como el incumplimiento por la luz del principio de relatividad de Galileo, o la existencia de una velocidad límite.
2. Comprender los postulados de la Relatividad de Einstein y cómo resuelven los problemas anteriores.
3. Utilizar los principios de la Relatividad para explicar alguna de sus implicaciones: dilatación del tiempo, contracción de la longitud, variación de la masa con la velocidad y equivalencia masa/energía.
4. Calcular el periodo de semidesintegración o la masa de una partícula con velocidades próximas a las de la luz, comparándolas con los que tendría en reposo.
5. Utilizar la equivalencia masa/energía para determinar la energía que se libera en una reacción nuclear o química.
6. Señalar los límites de validez de la Física clásica que pone de manifiesto la Física relativista.
7. Indicar las diferencias más notables entre Mecánica clásica y Mecánica relativista.
8. Señalar implicaciones de la teoría de la Relatividad en la filosofía, en el arte, etc.

ACTIVIDADES DE EVALUACIÓN

1. Si una nave espacial se aleja de una estrella con una velocidad de 0,5c, ¿qué velocidad medirían los tripulantes de la nave para la luz de la estrella?
 2. La vida media en reposo de un neutrón libre es de 700 s:
 - a) ¿Cuál es la vida media si se le comunica una velocidad de 10^5 km/s?
 - b) Si la velocidad de la luz en el vacío fuera de $1,5 \cdot 10^5$ km/s, ¿cuál sería la vida media comunicándole una velocidad de 10^5 km/s? Comparar con el resultado anterior y extraer conclusiones.
- (Selectividad. 1989)

3. Una nave espacial tiene una velocidad de $0,5c$. La longitud medida por los tripulantes de la nave es de 150 m. Calcular la longitud medida por un observador exterior a la nave.
4. La estrella más próxima a la Tierra es α -Centauri, situada a 4 años-luz.
 - a) ¿A qué velocidad constante deberá viajar una nave espacial para llegar a la estrella en 3 años, medidos por los viajeros de la nave?
 - b) ¿Cuánto dura el viaje según un observador terrestre? (Selectividad. 1989)
5. Una barra de hierro al rojo vivo se enfría hasta la temperatura ambiente. Justificar si varía su masa.
6. Demostrar que las partículas con masa en reposo nula, se mueven con la velocidad de la luz.
7. Un mesón pi ($m_0 = 2,5 \cdot 10^{-28}$ kg) se mueve con una velocidad de $0,8c$. Calcular su energía cinética.
8. La teoría de la Relatividad de Einstein, ¿justifica la afirmación filosófica de que todo es relativo?
9. Señalar influencias de la teoría de la Relatividad en el pensamiento contemporáneo.

BIBLIOGRAFÍA

- EINSTEIN *et al*, 1975, *La teoría de la relatividad*, (Alianza : Madrid).
- GALINDO, A., 1994, Los XXVI años del GIFT, *Revista Española de Física*, 8 (4), 12-17.
- GIL, D.; SENENT, F. y SOLBES, J., 1986, Análisis crítico de la introducción de la Física moderna, *Revista de Enseñanza de la Física*, 2, 16-21.
- GIL, D.; SENENT, F. y SOLBES, J., 1988, $E = mc^2$, la ecuación más famosa de la física: una incomprendida, *Revista Española de Física*, 2 (2), 53-55.
- GLICK, T. F., 1986, *Einstein y los españoles*, (Alianza : Madrid).
- LOPEZ PIÑERO *et al*, 1979, *Historia y sociología de la ciencia en España*, (Alianza : Madrid).
- PAIS, A., 1986, *El Señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein*, (Ariel : Barcelona).
- PROJECT PHYSICS COURS, 1970, (Holt, Rinehart & Winston : Nueva York).
- SELLERI, F., 1994, *Albert Einstein y la relatividad*, en *Física sin dogma*, (Alianza : Madrid).
- THUILLIER, P., 1990, *Ciencia y subjetividad: El caso Einstein*, en *De Arquímedes a Einstein*, (Alianza: Madrid).

6. ELEMENTOS DE FÍSICA CUÁNTICA

Todos los libros de Física y Química de tercer curso de BUP y COU, como ya hemos indicado, incluyen ideas de Física cuántica y la mayoría del profesorado suele introducirlas, especialmente en los temas de Química sobre «Estructura atómica». En Física de COU aparece un tema sobre «Naturaleza de la luz. Dualidad onda corpúsculo».

Así, en algunos textos de BUP y COU analizados, aunque se introduce el efecto fotoeléctrico o los espectros atómicos, no se muestra la incompatibilidad entre los resultados experimentales y las explicaciones que de los mismos proporcionaba la Física clásica, lo que originó su crisis. Tampoco se tienen en cuenta las diferencias entre la Física clásica y la moderna ni los límites de validez de la primera.

Además dicha introducción va acompañada de errores conceptuales de dos tipos: los directos o explícitos, por interpretaciones incorrectas que, en parte, coinciden con las que se cometieron en el desarrollo histórico de la Física moderna; y los implícitos, por falta de un tratamiento didáctico clarificador que muestre cómo las nuevas ideas entran en conflicto con las clásicas y, por tanto, con la estructura conceptual del alumno. Así, por ejemplo, se considera el electrón como una onda o como una partícula. Otros, en los que también se incluyen algunos textos de Física y de Química de primer curso de universidad, hablan de una manera poco clara de la dualidad, como si el electrón fuese onda «y» corpúsculo o como si fuese una partícula «asociada» (¿a caballo?) de una onda. Son muy pocos los que clarifican que los electrones, fotones, etc. no son ni ondas ni partículas clásicas sino objetos de un tipo nuevo. En cuanto a las relaciones de indeterminación, algunos parecen atribuirles a una falta de precisión de los instrumentos y para otros parece que dichas relaciones impidan medir con precisión. En cuanto al orbital atómico, se considera que es una zona del espacio que los electrones pueden ocupar, o que el átomo está constituido por un núcleo y orbitales que pueden estar ocupados o no por electrones, es decir, la idea del «orbital estantería» que existe independientemente de los electrones (Solbes 1986, Solbes *et al* 1987, Gil, Senent y Solbes 1986, Gil y Solbes 1993).

En este tema las ideas alternativas tienen su origen en la enseñanza, bien porque se introducen explícitamente, bien porque no se muestra la contradicción entre las nuevas ideas y la clásica y, en consecuencia, los estudiantes siguen utilizando éstas. Así, por ejemplo, muchos alumnos de tercer curso de BUP y COU consideran el electrón como un corpúsculo, limitan la dualidad de toda la materia a la luz o asocian la onda al movimiento («el movimiento lleva asociada una onda»). Otros afirman que «el electrón no se puede localizar con precisión», cuando en realidad cada magnitud característica de los fenómenos atómicos puede ser medida con tanta precisión como queramos. La imposibilidad se refiere a la determinación simultánea con precisión absoluta de dos magnitudes conjugadas (Solbes 1986, Gil, Senent y Solbes 1986).

Estas ideas persisten en alumnos de segundo curso de Físicas. Un 10,1% considera que el electrón es un corpúsculo y un 3,1% lo consideran sólo como una onda. Un 26,4% responde que la dualidad es una propiedad exclusiva de los sistemas microscópicos. Las relaciones de indeterminación implican para un 14,5% que no se puede medir sin error y para un 15,7% que la posición y la cantidad de movimiento no son buenos observables. Para el 40,9% dichas relaciones sólo son aplicables al mundo microscópico. En cuanto a los orbitales atómicos, un 59,1% les atribuye una existencia independiente de los propios electrones y un 10,1% llega incluso a afirmar que los orbitales son las envolventes de las posibles trayectorias del electrón en el átomo (Solbes *et al* 1988).

En cuanto a los conceptos a introducir y la forma de hacerlo, hay un consenso menor que en Relatividad. Así, se proponen varios posibles caminos para introducir la materia: el axiomático, el histórico y el empírico. El primero sólo se utiliza a nivel universitario. El método empírico consiste en introducir las ideas cuánticas, mediante una serie de experimentos. Es muy usado en los países anglosajones. Un ejemplo muy conocido es Feynmann (1970) que introduce la Física cuántica a partir de la difracción de electrones. Otros casos son Nuffield (1974-75) y PSSC (1980). El histórico es el más utilizado en nuestro país y consiste en presentar de una forma más o menos cronológica las contribuciones de Planck, Einstein, Bohr, Sommerfeld, De Broglie, Heisenberg, Schrödinger, Born, etc.

Sin embargo, esta forma de introducir los conceptos tiene algunos inconvenientes que conviene poner de manifiesto. En primer lugar, se introducen las nuevas ideas, en particular desde Planck hasta De Broglie, tal y como se hizo en los orígenes de la Física cuántica, sin tener en cuenta los desarrollos posteriores de estas ideas (por ejemplo, limitarse a hablar de órbitas estacionarias en los átomos, no introducir la interpretación probabilista para los fotones, etc.) ni sus relaciones con los principios de la Física cuántica. Por otra parte, con este método correspondería cronológicamente comenzar con la teoría de Planck, lo cual no parece conveniente didácticamente para los niveles medios, por la gran dificultad de ésta (supone conocimientos de Electromagnetismo y Física estadística) y porque Planck no concibe la expresión $h\nu$ como cuanto de radiación electromagnética.

Concedemos una gran importancia al desarrollo histórico de las ciencias, no tanto por «contar» la historia del tema tratado, como por extraer de dicha historia los problemas significativos y poner al alumno en situación de abordarlos y resolverlos. Por ello, proponemos iniciar el estudio de los fenómenos cuánticos con dos de los problemas que originaron la crisis de la Física clásica: el efecto fotoeléctrico y la existencia de espectros atómicos.

El procedimiento sería mostrar cómo el efecto fotoeléctrico no puede ser explicado por la teoría electromagnética, por lo que se requieren nuevas hipótesis sobre la naturaleza de la luz que rompen con la teoría clásica. Es conveniente iniciar aquí a los alumnos en la idea de dualidad, para que no incurran en el error de reducir el fotón a su aspecto corpuscular, volviendo a las concepciones de Newton. También es necesario recalcar la cuantización de la energía, que se plantea por primera vez.

A continuación, se debe resaltar la potencia del concepto de fotón, aplicándolo a nuevos fenómenos como el efecto Compton (que sólo se aborda a nivel cualitativo) y los espectros discretos, para evitar la visión simplista de que las teorías se abandonan a consecuencia de unos pocos resultados negativos. En ambos casos es necesario mostrar cómo la Física clásica era incapaz de explicarlos. Al introducir el modelo de Bohr es necesario insistir en la cuantización de la energía y del momento angular y en la idea de estado estacionario.

La dualidad muestra que los electrones, fotones, etc. no son ni ondas ni partículas clásicas, sino objetos (los cuantos) con un comportamiento cuántico. En consecuencia, se cumplen las relaciones de indeterminación y se hace necesario un nuevo modelo para describir el estado y evolución de los cuantos, distinto de los utilizados para las partículas y ondas clásicas: la función de ondas y su interpretación probabilista. Este concepto permite criticar algunas ideas erróneas sobre la noción de orbital atómico.

Para finalizar es muy adecuado realizar un resumen de las diferencias más notables entre Física clásica y moderna, los límites de validez de la Física clásica y mostrar las grandes posibilidades de nuevos desarrollos científicos y tecnológicos que abrió la nueva Física.

Conviene hacer notar cómo las ideas introducidas de cuantización, comportamiento cuántico de los fotones, electrones, etc. (cuantos) y probabilismo, constituyen las principa-

les características de la física cuántica y permiten dar respuesta a sus preguntas básicas: ¿cómo se define el estado de un sistema y qué magnitudes lo caracterizan?, ¿cuáles son los valores posibles de cada magnitud?, ¿cuál es la probabilidad de encontrar cada uno de esos valores si se realiza una medida? y ¿cómo evoluciona el estado del sistema en el tiempo?

1. EL EFECTO FOTOELÉCTRICO: LOS FOTONES

En la actividad A.1 los alumnos señalan que la luz facilita la descarga al hacer que se emitan electrones de la superficie del cátodo. Esto es debido a que los electrones adquieren energía cinética al recibir la energía transferida por la onda luminosa.

La actividad A.2 tiene como objetivo el que los alumnos hagan predicciones sobre lo que debería suceder en el efecto fotoeléctrico de acuerdo con la Física clásica, para que posteriormente lo contrasten con lo que realmente sucede.

El profesor completará las predicciones de la Física clásica indicando lo siguiente: a) La energía cinética de los electrones liberados dependerá de la intensidad de onda y de la frecuencia, b) existirá un tiempo de retardo entre el choque de la luz sobre la superficie y la emisión del electrón porque, como la energía de la luz está distribuida uniformemente en el frente de onda, es necesario un intervalo de tiempo –menor cuanto más intensa sea la onda– durante el cual el electrón está absorbiendo energía de la luz hasta que acumula la suficiente para escapar y c) para un metal dado, el efecto fotoeléctrico debe ocurrir para cualquier frecuencia de la luz, con la única condición de que la luz sea lo bastante intensa o dure el tiempo suficiente para que proporcione la energía necesaria para expulsar a los electrones.

La actividad A.3 es crucial para los alumnos porque al contrastar las hipótesis de la actividad anterior, basadas en la Física clásica, con los resultados experimentales, se comprueba que las predicciones clásicas no pueden explicar dichos resultados. Así, de acuerdo con la Física clásica, el efecto fotoeléctrico debe ocurrir a cualquier frecuencia de la luz, con la única condición de que la luz sea lo bastante intensa o dure el tiempo suficiente para que proporcione la energía necesaria para expulsar a los electrones, lo que contradice el primer resultado. Por otra parte, la energía cinética de los electrones debe aumentar al hacerse más intenso el haz de luz, en contra del segundo y tercer resultados. Para finalizar, la emisión instantánea no se puede reconciliar, como se ha visto, con la idea de onda que se distribuye uniformemente por el espacio.

La actividad A.4 pretende que los alumnos comprendan por qué Einstein en 1905 se vio en la necesidad de considerar que la luz, fenómeno tradicionalmente etiquetado como ondulatorio, manifestaba un comportamiento corpuscular. Por ello, introdujo la hipótesis del fotón.

Con esta nueva hipótesis puede darse una fácil explicación a los diferentes resultados experimentales. En efecto, cada fotón incidirá individualmente sobre un punto de la superficie metálica, arrancando un electrón sólo en el caso de que su energía $h\nu$ sea superior a la atracción de los iones positivos del metal, denominada trabajo de extracción. Ello explica que el efecto fotoeléctrico no se presente por debajo de una frecuencia umbral y no aumente el número de electrones emitidos, aunque aumente la intensidad luminosa $I = nh\nu$, siendo n el número de fotones incidentes. También se explica que la energía cinética sea independiente de la intensidad y crezca, por contra, con la frecuencia. El hecho de que la emisión de electrones sea prácticamente instantánea se puede justificar con dicha hipótesis.

La actividad A.5 permite comprobar el gran número de fotones (por m^2 y s) que constituyen la radiación electromagnética, lo que explica su apariencia continua.

La A.6 pretende llevar a los alumnos a la ecuación fotoeléctrica de Einstein, deducida en 1905

$$h\nu = W + E_c$$

en la que $h\nu$ representa la energía del fotón incidente, W el trabajo de extracción y E_c la energía cinética del electrón liberado.

Cuando $\nu = \nu_0$, la $E_c = 0$ y, por tanto, $W = h\nu_0$ lo que nos da otra expresión para la ecuación de Einstein

$$E_c = h(\nu - \nu_0)$$

La actividad A.8 conduce al alumno a interpretar el efecto Compton como una colisión de los fotones con los electrones, a los que transfieren parte de su energía por lo que pasan a tener una energía menor, es decir, una frecuencia menor. Hay que señalar además que estos electrones, al contrario que en el efecto fotoeléctrico, tienen una energía de enlace menor que la del fotón, es decir, son prácticamente libres. El carácter direccional del efecto Compton pone de manifiesto que los fotones tienen también cantidad de movimiento dada por $p = E/c$.

2. ESPECTROS ATÓMICOS Y MODELO DE BOHR

Algunos autores se manifiestan contra el uso del modelo de Bohr para evitar una descripción del átomo que incluya órbitas. Aquí se sigue la opción contraria por las siguientes razones generales, válidas no sólo en ésta, sino en otras situaciones:

- para familiarizar a los alumnos con la forma de trabajo de los científicos que elaboran modelos para explicar los problemas hasta que surgen dificultades que obligan a cambiarlos. La utilización de los modelos o teorías clásicas o precuánticas (semiclásicas) es algo frecuente en la práctica corriente de la Física y los científicos no se privan de hacerlo siempre que se encuentran en el ámbito de los hechos que explicaba el anterior modelo, en el dominio de validez de la anterior teoría, es decir, como aproximaciones.
- el interés didáctico de la utilización de modelos, por las mismas razones que son utilizados por los físicos: como explicación de forma esquemática y sencilla de fenómenos que, de otro modo, requerirían una descripción complicada. Sin embargo, aparece un inconveniente: muchos textos presentan las aproximaciones de un modelo como descripción real y correcta, ignorando que todo modelo tiene sus limitaciones y que sólo es útil si se es consciente de ellas.

También se pueden señalar las siguientes razones concretas:

- los alumnos, como resultado de las informaciones de los medios de comunicación, de la enseñanza recibida en el educación primaria, etc. poseen una representación atómica mediante órbitas, que proponemos explicitar para cambiarla seguidamente, mostrando los límites tanto teóricos como experimentales del modelo.
- para evitar la imagen de que son únicamente las limitaciones del Electromagnetismo las que justifican la introducción de ideas cuánticas, dado que la crítica del concepto

de trayectoria (órbita) contribuye a mostrar también las limitaciones de la Mecánica clásica.

- porque permite introducir de forma sencilla, aunque reducido al caso particular de un electrón ligado a un núcleo, el concepto de estado, caracterizado por los valores definidos de unas magnitudes, la energía y el momento angular. Además permite ver que estas magnitudes no pueden tomar todos los valores posibles, sino que están cuantizadas por un número cuántico.

En la actividad A.10 se constata que Bohr «mezcla ideas clásicas y cuánticas», introduciendo hipótesis *ad hoc* para evitar los problemas planteados en los modelos de Thomson y Rutherford. Los postulados 2, 3 y 4 están en abierta contradicción con la Física clásica.

En la actividad A.11 los alumnos razonan que, al hacer incidir luz, los electrones sólo podrán absorber los fotones de energías iguales a las correspondientes a la transición de un valor energético o nivel a otro superior y sólo emitirán cuando pasen de dicho nivel a otro inferior. Así, la frecuencia de la radiación emitida es igual a la diferencia de energía entre niveles $E_n - E_m = h\nu$.

En la actividad A.12. se realiza una combinación de la ecuación de Balmer y $E_n - E_m = h\nu$ y teniendo en cuenta que $\nu\lambda=c$, obtenemos $E_n = -Rhc/n^2$ donde se ve que la energía del electrón está cuantizada por el número cuántico principal n . El procedimiento realmente seguido por Bohr fue el contrario: determinó el radio y la energía de la órbita enésima y así comprobó que la constante de Rydberg, calculada teóricamente, coincidía con la experimental. La opción que se toma aquí evita cálculos y, a su vez, no insiste en la idea de órbitas, centrándose en los «estados discretos de energía».

La actividad A.14 permite comprobar que, si un electrón puede efectuar una transición del nivel E_3 al nivel E_2 emitiendo la frecuencia ν_{32} y del E_2 al E_1 emitiendo la frecuencia ν_{21} , entonces debe ser posible la transición directa de E_3 a E_1 emitiendo la frecuencia $\nu_{31} = \nu_{32} + \nu_{21}$. Análogamente, si un electrón pasa de E_3 a E_1 emitiendo la frecuencia ν_{31} o a E_2 emitiendo la frecuencia ν_{32} , también debe ser posible la transición de E_2 a E_1 con la frecuencia $\nu_{21} = \nu_{31} - \nu_{32}$.

3. DE BROGLIE Y LA DIFRACCIÓN DE ELECTRONES

En la actividad A.15 los estudiantes se refieren habitualmente a los trabajos de Einstein, Compton, etc., en los que se había mostrado que la luz poseía, conjuntamente con sus evidentes propiedades ondulatorias, propiedades típicamente corpusculares. Si existen objetos materiales (los fotones) con esta doble característica ondulatorio-corpúscular, ¿por qué no concebir la posibilidad de que esto mismo se dé en cualquier objeto material? El profesor puede plantear, para completar las consideraciones anteriores, cómo el carácter cuantizado de los estados estacionarios en el interior del átomo parece relacionarse con el único fenómeno de la Física clásica en el que aparecen valores discretos: las ondas estacionarias que se forman en un medio confinado.

Si en la actividad A.16 se sustituye en $E = h\nu$, la frecuencia ν por su valor en función de la longitud de onda, resulta $E = hc/\lambda = pc$, de donde $\lambda = h/p$. Al generalizar la expresión anterior para cualquier partícula, obtendremos $\lambda = h/p$. Nuevamente tenemos una ecuación que nos relaciona un concepto clásico corpuscular, el momento lineal p con un concep-

to ondulatorio clásico, la longitud de onda λ . En ambos casos se trata de una nueva clase de ley y no podemos suponer simplemente que cada palabra significa lo mismo que en Física clásica. Lo mejor sería darle otro nombre, como momento quantum-lineal, pero si en la Física cuántica podemos encontrar una magnitud que sea idéntica a nuestra vieja idea de momento lineal cuando el sistema es bastante grande, no es necesario una palabra nueva (Feynman 1971).

Tiene interés en la actividad A.17 calcular la longitud de onda predicha por la hipótesis de De Broglie para un electrón. Resulta del orden de 10^{-9} m, comparable a la de los rayos X, por lo que se puede pensar en la posibilidad de detectar su existencia. Por el contrario, la longitud de onda de los objetos macroscópicos es tan pequeña (del orden de 10^{-63} m para la Tierra y de 10^{-32} m para el guijarro) que es impensable detectarla, lo que justifica el hecho de que dichos objetos no muestren comportamiento ondulatorio.

Los alumnos pueden señalar en la actividad A.18 que conviene recurrir a un fenómeno típicamente ondulatorio, como es la difracción. Para que ésta se produzca, es necesario encontrar obstáculos de dimensiones próximas a la longitud de onda del electrón.

La actividad A.19 permite utilizar las relaciones de De Broglie para determinar las energías en función de λ . Vienen dadas por $E = h\nu = hc/\lambda$ (fotones) y $E = p^2/2m = h^2/2m\lambda^2$ (partículas). En la actividad A.20 podemos ver un ejemplo de utilización de las relaciones obtenidas. Necesitamos una longitud de onda del mismo orden de magnitud que la separación entre planos, es decir, 1 Å. Conviene expresar los resultados en eV, encontrándose para el fotón un valor de unos 10 KeV; para el electrón, de unos 100 eV y para el neutrón, de unos 0,08 eV. En los dos últimos casos los valores son mucho menores que sus masas y, por tanto, no se necesita la Relatividad. En la actividad A.21 $\lambda = h/(2mE)^{1/2} = 1,5$ Å.

La actividad A.22 es crucial en el planteamiento de este programa de actividades. Pretende que los alumnos expongan sus ideas (originadas en cursos anteriores, medios de comunicación, etc.) para comprobar si alguna de ellas coincide con los errores que se cometieron durante la génesis de estos conceptos. Ello da pie a que el profesor exponga las siguientes interpretaciones:

1. La idea del propio De Broglie de «onda asociada», guía o piloto de la partícula, con una relación entre ellas similar a la existente entre las planchas de «surf» y las olas que las arrastran. Ahora bien, la imposibilidad de explicar la indisoluble unidad entre la onda y la partícula o cómo es engendrada, llevaron al propio De Broglie a sustituir dicha interpretación por otra que mencionaremos en el punto siguiente. Por ello, hablar de «ondas asociadas» es una mala terminología, porque da la impresión de que hubiera un corpúsculo clásico moviéndose junto con una onda, cuando en realidad, como veremos, la onda de De Broglie y la partícula son la misma cosa, no hay nada más. La partícula real tiene propiedades ondulatorias y esto es un hecho.
2. El nuevo error, que vino a sustituir al anterior, fue reducir el aspecto corpuscular a un efecto puramente ondulatorio, considerando al electrón como un «paquete de ondas». Sin embargo, fue preciso abandonar esta idea porque los cálculos mostraban que un paquete de ondas, por muy compacto que sea, se difunde rápidamente por el espacio, desapareciendo cualquier posible comportamiento corpuscular.
3. Otra forma de interpretar el comportamiento ondulatorio sería suponer que los electrones son simples corpúsculos y que el comportamiento ondulatorio aparece debi-

do al gran número de ellos. Según esto, la difracción observada al hacer pasar los electrones por una fina lámina metálica no debería presentarse al trabajar con un número reducido de ellos. Sin embargo, la experiencia muestra que si se prolonga la exposición suficiente tiempo, un débil haz de electrones produce el mismo efecto, lo que prueba que la difracción y, por tanto, el carácter ondulatorio es consustancial a cada electrón individual y no es un efecto de la presencia de gran número de ellos.

4. RELACIONES DE INDETERMINACIÓN DE HEISENBERG

La actividad A.23 pretende que los estudiantes asocien, de forma cualitativa, el carácter ondulatorio del electrón a una cierta deslocalización que impide situar al electrón en un punto determinado. Se introduce, por tanto, una cierta indeterminación en el movimiento que puede seguir el electrón, por lo cual éste carecerá de una trayectoria absolutamente determinada. Esta actividad trata de relacionar la ecuación de De Broglie con las relaciones de Heisenberg, mostrando cómo ambas modifican los conceptos básicos de la Física clásica.

Con el título y la actividad se pretende evitar la tendencia a darle una mayor relevancia a las relaciones de indeterminación, dado que muchos textos hablan de principio. Con ello se olvida que los principios básicos de la teoría cuántica llevan a las relaciones de indeterminación, pero si se parte de éstas no se pueden deducir aquéllos.

En la teoría cuántica vemos que las relaciones de indeterminación están conectadas con las de conmutación. Si dos magnitudes conmutan, es decir, $p_x p_y - p_y p_x = 0$, se pueden preparar los sistemas de forma que se puede medir simultáneamente p_x y p_y con resultados de dispersión cuadrática media tan pequeña como se quiera para ambos. Por el contrario, si $x p_x - p_x x = ih/2\pi$, se cumplen las relaciones de indeterminación. Su importancia reside en que nos permiten averiguar el conjunto de todas las magnitudes compatibles que caracterizan el estado de un sistema, es decir, todas aquellas que se pueden determinar simultáneamente. Así, por ejemplo, un electrón libre vendrá caracterizado por (p_x, p_y, p_z, S_z) , un electrón ligado en un átomo hidrogenoide por (E, L^2, L_z, S_z) , como veremos.

La actividad A.24 nos muestra que la indeterminación para los objetos macroscópicos ($x = 10^{-25}$ m) es absolutamente despreciable frente al tamaño del objeto, al contrario de lo que sucede en los microscópicos; para el electrón $x = 0,1$ m, que es billones de veces superior al tamaño atribuido experimentalmente. La razón de este hecho se debe al pequeño valor de la constante h , que determina que los resultados del principio de indeterminación queden fuera de los límites de nuestras experiencias ordinarias (aunque hay fenómenos macroscópicos, como veremos, a los que se aplica la Física cuántica). Análogamente, la pequeñez de la expresión v/c deja a la Relatividad fuera de nuestras experiencias ordinarias. Es decir, las relaciones de indeterminación establecen los límites más allá de los cuales no se pueden aplicar los conceptos de la Física clásica.

En este tipo de actividades, algunos textos tratan las relaciones de Heisenberg como una ecuación entre magnitudes, olvidando que se trata de unas relaciones de dispersión, es decir, unas relaciones entre las indeterminaciones (o dispersiones cuadráticas medias) de las magnitudes. Sólo si se usan como aproximaciones, del mismo modo que las ecuaciones dimensionales, permiten estimar valores de magnitudes.

La actividad A.25 permite salir al paso del error, cometido durante la génesis de estos conceptos, de atribuir la indeterminación a faltas de precisión de los instrumentos de observación (como señala la primera frase de la actividad). En cuanto a la segunda proposición,

muestra cómo la relación de indeterminación ha contribuido a clarificar el hecho de que el proceso de medida es una interacción que modifica o que se observa, perturbación que también se verifica en Física clásica –recordemos, por ejemplo, el efecto de un termómetro en un sistema pequeño–, pero introduce el error de unir indisociablemente la indeterminación a la propia observación, induciendo así a pensar que cuando no se está observando, desaparecería la indeterminación. Se olvida así que la indeterminación tiene un origen mucho más profundo que hace referencia, como señala la tercera frase, a la propia naturaleza de la materia, a su carácter cuántico.

Por otra parte esto hace referencia a la confusión, señalada por Bunge (1973, ver pag. 166-167 y 320-321), entre enunciados con significación objetiva y con significación empírica. Los primeros hacen referencia a objetos autónomos no perturbados por medición, como un átomo en estado estacionario (que no absorbe e irradia energía) o un fotón que viaja por un espacio vacío, en el cual ningún dispositivo puede detectarlo, absorbiéndolo. Los segundos a objetos en observación, medición o, en general, interacción con sistemas macroscópicos, como un haz de electrones que atraviesa un sistema de ranuras. Algunas interpretaciones de la teoría –las que, por ejemplo, atribuyen la indeterminación únicamente a la observación– intentan reducir ésta a enunciados del segundo tipo, lo cual, si fuera cierto, impediría la aplicación de la teoría cuántica a objetos como los mencionados en el primer tipo de enunciados o a la astrofísica.

5. LA FUNCIÓN DE ONDAS Y LA INTERPRETACIÓN PROBABILISTA

La actividad A.26 pone de manifiesto que en la Mecánica clásica el estado de movimiento de una partícula, en un instante determinado, queda descrito por su posición r y su velocidad v (o cantidad de movimiento p) y en cualquier instante, por su ecuación de movimiento $r = r(t)$. Análogamente, el estado en un instante determinado de una onda viene dado por su amplitud E_0 , su longitud de onda λ y su frecuencia ν y en cualquier instante, por su ecuación de onda $E = E(r,t)$ (p.ej., una onda armónica plana).

Los alumnos pueden avanzar en la actividad A.27, siendo $I \propto E^2$ e $I \propto \alpha n$, que $E^2 \propto \alpha n$, es decir, el cuadrado de la amplitud es proporcional al número de fotones. Si tratamos con haces luminosos poco intensos, con un sólo fotón, es evidente que E^2 constituye una medida de la probabilidad de que haya un fotón. En los lugares en que E^2 sea grande, habrá una gran probabilidad de que se encuentre el fotón. Las actividades siguientes nos permiten profundizar en estas ideas.

Así, en la actividad A.28 los alumnos recuerdan, por el tema de Óptica, que la intensidad de luz transmitida por el polarizador es $I = I_0 \cos^2 \Phi$, es decir, la intensidad I nos indica la fracción de fotones que pasan. Ahora bien, si incide un único fotón (lo cual se puede conseguir con intensidades suficientemente bajas), la expresión $I_0 \cos^2 \Phi$ no nos puede indicar la fracción de fotón que atraviesa el polarizador, ya que el fotón es una partícula y, como tal, indivisible. Por tanto, sólo podemos decir si pasa o no pasa, lo cual implica que $I/I_0 = \cos^2 \Phi$ (número comprendido entre 0 y 1) indica la probabilidad de que pase un fotón. En otras palabras, el comportamiento probabilista no es debido a la presencia de un gran número de fotones, sino que se aplica a cada fotón individualmente.

Con respecto a los diagramas de interferencia o las fotografías de la actividad A.29, se observa la construcción progresiva de franjas de interferencia de apariencia continua a partir de impactos discretos. Esto pone de manifiesto el carácter corpuscular de los fotones y, por otra parte, su comportamiento probabilista, dado que en los lugares donde la intensidad sea grande, habrá una gran probabilidad de que incidan fotones.

En la actividad A.30 los alumnos no relacionan habitualmente el orbital atómico (OA) con la función de ondas del electrón, sino con la región del espacio en que existe probabilidad de encontrarlo. Esta opción suele estar acompañada del error conceptual de considerar el orbital como una región que los electrones pueden ocupar o no. Con otras palabras: el átomo está constituido por un núcleo y orbitales que pueden estar ocupados o no por electrones. Como este error se introduce desde la enseñanza primaria, es el más persistente de todos los relacionados con la Física moderna.

6. APLICACIONES DE LA FÍSICA CUÁNTICA

En la actividad A.31 comprobamos que la Física cuántica, junto con la Relatividad, abrieron grandes posibilidades a nuevos progresos científicos y tecnológicos. Así, la nueva Física es capaz de explicar el conjunto de los fenómenos físicos, desde la más pequeña escala a la mayor: desde la estructura electrónica del átomo y del enlace químico, los sólidos y sus propiedades (conductividad, magnetismo, etc.), la estructura del núcleo y el mundo de las partículas elementales, hasta la evolución de las estrellas, las galaxias y el Universo. Con respecto a las aplicaciones, hay que mencionar la microelectrónica (base de los ordenadores, las telecomunicaciones, la robótica, la automatización, etc.), el láser, la física nuclear (centrales, bombas, medicina nuclear, etc., un ejemplo más del carácter productivo-destrutivo de las ciencias físicas), los nuevos materiales (fruto de la Química moderna).

Tiene interés subrayar que la Física cuántica no se aplica sólo a sistemas microscópicos (átomos, núcleos, partículas, etc.) sino a dispositivos macroscópicos como el láser, los diodos, transistores y chips, las bobinas superconductoras de los electroimanes, etc. Incluso el principio de exclusión es responsable de la evolución de las estrellas.

Las implicaciones de la Física cuántica se pueden seguir mediante una recopilación de artículos de prensa: papel en la productividad, en la destrucción y la generación de empleo, en el control de la intimidad, etc.

7. RECAPITULACION DE LA FÍSICA MODERNA

Se pueden mencionar en la actividad A.32, las siguientes diferencias entre la visión clásica y cuántica del comportamiento de la materia:

1. Carácter continuo de magnitudes como la energía y el momento angular frente al carácter discreto.
2. Emisión de radiación de las cargas aceleradas ligadas (igual que las libres) frente a la emisión de radiación de las cargas ligadas sólo en las transiciones de nivel energético (a diferencia de las libres).
3. Partículas y campos clásicos frente a cuantos (electrones, fotones, etc.) con un comportamiento probabilista.
4. Posibilidad frente a imposibilidad de determinar simultáneamente con absoluta precisión la posición y velocidad de una partícula.

5. Trayectorias definidas frente a la falta de sentido del concepto de trayectoria para las partículas.

Desde la Relatividad Especial se podrían añadir las siguientes:

1. Carácter absoluto del tiempo ($t = t'$) y del espacio ($\Delta x = \Delta x'$), frente a su carácter relativo.
2. Masa constante de los cuerpos, frente a masa variable con la velocidad.
3. Conservación independiente de la masa y la energía, frente a la equivalencia masa-energía.

En la actividad A.32 podemos mencionar, entre otros:

1. El límite no relativista: Cuando las velocidades involucradas son apreciablemente menores que la velocidad de la luz en el vacío nos encontramos en el dominio de la Física clásica, ya que el valor de $(v/c)^2$ se hace muy pequeño.
2. El límite clásico: Cuando el producto de dos magnitudes conjugadas de un sistema físico toma un valor numérico superior a la constante de Planck nos encontramos en el dominio de la Física clásica. Aunque generalmente esto sucede en los fenómenos macroscópicos, hay también fenómenos y dispositivos macroscópicos de carácter cuántico (p.ej. el láser, los diodos y transistores, los superconductores, el helio superfluido, etc.).

Las actividades como ésta y la anterior tienen interés por su carácter recopilador y porque permiten una mayor comprensión de la Física clásica al mostrar sus límites de validez o la diferencia entre el paradigma clásico y cuántico-relativista.

Es conveniente mostrar no sólo los logros de las principales teorías, sino también sus controversias, debates, etc. Algunos de ellos pueden encontrarse en Bernabeu *et al* (1987) y Selleri (1988).

Señalar que tanto durante su génesis, como posteriormente, la Física cuántica tuvo grandes debates sobre su interpretación.

Algunos físicos como De Broglie (y su onda asociada), Schrödinger (reducción al aspecto ondulatorio), Landé, algunos físicos soviéticos (reducción al aspecto corpuscular) e incluso el propio Einstein, mantuvieron posturas contrarias a la interpretación probabilista. La mayor parte de los físicos como Bohr, Heisenberg, Born, Pauli, Dirac y un largo etc., defendieron dicha interpretación probabilista (también denominada de Copenhague, en cuya universidad trabajaba Bohr), aunque mezclada con altas dosis de filosofía positivista. Esto es un buen ejemplo del carácter conflictivo, controvertido, del desarrollo de la ciencia. Esta controversia, basada en «experimentos conceptuales» y cuyos principales protagonistas fueron Einstein y Bohr, duró más de una década. Su resultado fue la tendencia de los profesores de Física a refugiarse en el incontestado aparato matemático, aderezado con algunas ideas confusas sobre la complementariedad, dualidad, etc. Esto retrasó considerablemente el esfuerzo de clarificación y reformulación de los conceptos cuánticos. Actualmente, las desigualdades de Bell y su verificación experimental por Aspect y otros, parecen

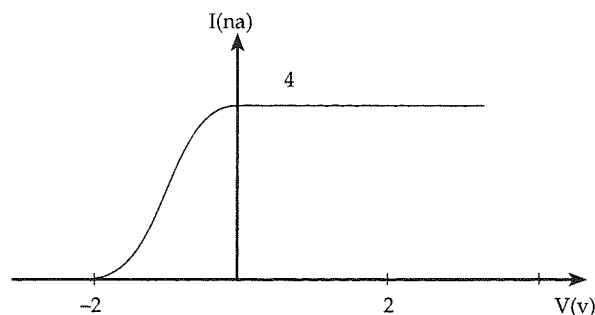
haber zanjado la cuestión a favor de la interpretación probabilista. Esta interpretación, combinada con ideas de Fock, Langevin, Einstein, etc., y con un esfuerzo de discusión y clarificación conceptual, sostiene este programa de actividades, siguiendo la línea abierta por Feynman (1971), Wichmann (1972) y Balibar, y Levy-Leblond (1984).

CRITERIOS DE EVALUACIÓN

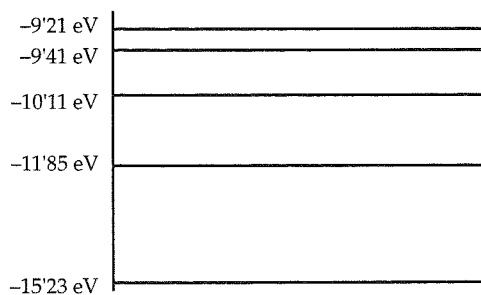
1. Comprender que la Física clásica no puede explicar una serie de experiencias como el efecto fotoeléctrico, los espectros discontinuos, la difracción de electrones, etc.
2. Utilizar las ideas y relaciones de Einstein, Bohr, De Broglie, para explicar la cuantización de determinadas magnitudes (como la energía), el comportamiento corpuscular de la luz y el ondulatorio de los electrones.
3. Comprender que los electrones, fotones, etc. no son ni ondas ni partículas clásicas sino objetos nuevos con un comportamiento nuevo.
4. Valorar el importante desarrollo científico y técnico que supuso la Física moderna, base de lo que se denomina revolución científico-técnica, que comienza a desarrollarse tras la II Guerra Mundial.
5. Utilizar el principio de conservación de la energía en el efecto fotoeléctrico, en la emisión y absorción de radiación por los átomos, etc.
6. Determinar la longitud de onda de protones, electrones, etc. dada la diferencia de potencial a la que están sometidos o su energía cinética.
7. Aplicar las relaciones de indeterminación y de De Broglie para explicar el comportamiento cuántico de los electrones, fotones, etc.
8. Señalar los límites de validez de la Física clásica que pone de manifiesto la Física cuántica.
9. Indicar las diferencias más notables entre Física clásica y Física cuántica.
10. Enumerar alguno de los múltiples desarrollos teóricos y prácticos, fruto de la Física cuántica.

ACTIVIDADES DE EVALUACIÓN

1. Se ilumina el emisor de una célula fotoeléctrica con luz de 250 nm. Al representar la intensidad que pasa por el circuito de la célula fotoeléctrica en función de la tensión aplicada se obtiene la siguiente gráfica:



- a) Calcular la energía cinética máxima de los electrones emitidos.
 - b) Calcular el trabajo de extracción del metal.
 - c) Si se ilumina con luz cuya longitud de onda es 200 nm, calcular el potencial de frenado.
2. Mediante un láser se produce luz monocromática de 632,8 nm con una potencia emitida de 2 mw. ¿Cuántos fotones se emitirán en un minuto de funcionamiento del láser? ($h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Js).
 3. En la figura aparecen los niveles de energía de un átomo.
 - a) ¿Cuántas líneas se producirían en el espectro de emisión?
 - b) ¿A qué transición entre niveles le corresponde la frecuencia menor?
 - c) ¿Cuántas líneas se producirían en el espectro de absorción?



4. ¿Qué ocurriría si se observase el espectro de absorción del sodio utilizando luz procedente de una lámpara de sodio en lugar de luz blanca?
5. Calcular la longitud de onda de un partícula cuya energía cinética es E_c . Aplicarlo al caso de un electrón de 4 eV. ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg).
6. La Física clásica da una visión del comportamiento de la materia distinta de la visión que proporciona la Física moderna. Citar alguna de dichas diferencias. (Selectividad. 1988).
7. Enumerar progresos tecnológicos fruto del desarrollo de la Física cuántica.

BIBLIOGRAFÍA

- GIL, D.; SENENT, F. y SOLBES, J., 1986, Análisis crítico de la introducción de la Física moderna, *Revista de Enseñanza de la Física*, 2, 16-21.
- GIL, D. y SOLBES, J., 1993, The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science, *International Journal of Science Education* 15 (3), 255-260.
- SOLBES, J., 1986, *La introducción de los conceptos básicos de física moderna*, Tesis doctoral, Universitat de València.
- SOLBES, J.; BERNABEU, J.; NAVARRO, J. y VENTO, V., 1988, Dificultades en la enseñanza/aprendizaje de la física cuántica, *Revista Española de Física*, 2, 22-27.
- SOLBES, J.; CALATAYUD, M.L.; CLIMENT, J.B. y NAVARRO, J., 1987, Errores conceptuales en los modelos atómicos cuánticos, *Enseñanza de las Ciencias*, 5, 189-196.

7. FÍSICA NUCLEAR Y DE PARTÍCULAS

En este tema, como en los anteriores, los alumnos no tienen experiencias previas. Por ello, las ideas alternativas deben ser atribuidas a los errores introducidos por la propia enseñanza (textos, profesores, etc.), a la utilización de ideas clásicas (que, como ya hemos señalado, pueden estar reconciliadas con las relativistas o cuánticas), a formas de razonamiento analógico, lineal, etc.

La bibliografía al respecto es escasa. Se han detectado errores coherentes con los vistos en Relatividad y Física cuántica. Se interpretan transformaciones de masa en energía y se induce a pensar que existe un tipo particular de energía, la nuclear, que sería capaz de dichas transformaciones. Por otra parte, algunas expresiones llevan a una imagen de las partículas como bolas de billar microscópicas (Solbes 1986, Gil, Senent y Solbes 1986 y 1989). Además, un trabajo reciente realiza una exploración gráfica de ideas extraescolares de los alumnos sobre radiactividad (De Posada y Prieto 1990).

Se puede comenzar el tema revisando la evolución histórica desde el descubrimiento de la radiactividad hasta el del núcleo, mostrando algunos modelos que intentaron explicar su constitución.

Justificar la estructura nuclear exige la introducción de una nueva interacción en cuyo estudio no podemos emplear la noción newtoniana de fuerza. Resulta más conveniente un análisis basado en la energía de ligadura que podemos determinar cuantitativamente a partir del defecto de masa, resultando así una verificación espectacular de las ideas de Einstein.

La introducción de la radiactividad permite realizar cálculos energéticos, sin limitarnos únicamente a las reglas de Soddy, como sucede en la mayor parte de los textos que la introducen al comienzo. El principio de conservación de la energía también se puede aplicar a las reacciones nucleares.

El último apartado tiene por objeto introducirse en el complejo y fascinante mundo de las partículas elementales. La aparición de nuevas partículas (positrón, neutrino, pión) nos permite mostrar conceptos fundamentales de la nueva Física: antipartículas, interacción como intercambio de partículas (superando así la idea de campo de Faraday). Finalmente, la gran proliferación de partículas nos lleva a la hipótesis del quark (situación análoga a la que se produjo en la Química con la proliferación de elementos), que se verifica con una experiencia similar a la de Rutherford.

1. ORÍGENES DE LA FÍSICA NUCLEAR

La actividad A.1 permite observar que existen tres tipos de radiación –a las que se denominó α , β y γ –, que se desvían de forma diferente en un campo magnético, lo que indica que tienen carga diferente: los rayos α están cargados positivamente, los β negativamente y los γ son neutros.

En la actividad A.2 se comprueba que, antes de conocer la ecuación de De Broglie, se pudo determinar aproximadamente dicho radio igualando la energía cinética de las partículas α con la energía potencial de Coulomb del núcleo. Con ello averiguaremos la distancia de máximo acercamiento de las partículas α al centro del núcleo, siempre superior al radio de dicho núcleo, pues de lo contrario entrarían en juego otras fuerzas y no se cumpliría la ley de Coulomb $mv^2/2 = kQq/r$. Como la energía cinética es $3 \cdot 10^{-13}$ J, entonces

$r = 2,7 \cdot 10^{-14} \text{ m} = 27 \text{ fm}$. Es decir, el tamaño del núcleo es del orden de unos 10 fm, aproximadamente 10^{-4} veces el del átomo (1 Å). La longitud de onda es de 5 fm y la energía de 8,2 MeV. Para explorar núcleos necesitamos energías del orden del MeV y longitudes de onda del orden del fm (para los átomos eran eV y Å).

Los alumnos conocen el modelo nuclear formado por protones y neutrones. Por ello las actividades A.3 y A.4 tienen el interés de ver cómo se llegó a dicho modelo. El primer modelo del núcleo en base a He-4 y electrones no puede explicar ni siquiera la constitución del núcleo del átomo más simple, el H-1, cuya masa es la cuarta parte de He-4. Sin embargo, se realizaron muchos experimentos para comprobar si el par electrón-protón, propuesto por el segundo modelo, podía existir como partícula, ninguno de los cuales tuvo éxito, por lo que se plantearon serias dificultades a este modelo, confirmadas por el establecimiento de las relaciones de indeterminación en 1927.

Dado que, según Heisenberg $\Delta p = \hbar/\Delta x$, la energía cinética mínima del electrón dentro del núcleo (radio $\Delta x = 10 \text{ fm}$) será $E_c = p^2/2m = \hbar^2/2m(\Delta x)^2 = 15 \text{ GeV}$, lo cual es imposible ya que la energía de los rayos emitidos es del orden del MeV. Cuando Chadwick descubrió en 1932 el neutrón –una partícula neutra con masa ligeramente superior a la del protón– se abandonó definitivamente la idea de que los electrones eran constituyentes permanentes del núcleo. En lugar de esto se admitió que el núcleo contiene Z protones y N neutrones, es decir, un total de $A = Z + N$ partículas.

En la actividad A.6 se comprueba que la existencia de nuevos elementos con propiedades químicas idénticas a los de los elementos conocidos, aunque difieran en propiedades físicas, se pudo explicar mediante el concepto de isótopo, núcleo con el mismo número atómico Z y distinto número másico A y, por tanto, con las mismas propiedades químicas (es el mismo elemento) y distintas propiedades físicas. Así, la relación entre la masa y el radio en un campo magnético, permitió comprobar que la mayor parte de los elementos se presentan en la naturaleza como una mezcla de isótopos (que eran separados en un campo magnético B, base del espectrógrafo de masas). El oxígeno natural se presenta como una mezcla de tres isótopos 0-16, 0-17 y 0-18. Esto permite determinar las masas atómicas de los distintos isótopos y, por tanto, sus abundancias naturales.

2. INTERACCIONES NUCLEARES Y ENERGÍA DE ENLACE

La actividad A.8 permite que los alumnos introduzcan una nueva interacción. En efecto, la atracción gravitatoria no puede justificar la estabilidad, dado que su intensidad es menor que la repulsión electrostática. Esto hizo que se avanzase la hipótesis de una nueva interacción entre protones y neutrones, la nuclear fuerte, de una gran intensidad (unas 100 veces superior a las interacciones electromagnéticas) y de naturaleza atractiva, que no distingue entre protones y neutrones, para contrarrestar la repulsión recíproca de los protones presentes en el núcleo. Por otra parte, su radio de acción debe ser extraordinariamente pequeños, del orden de 1 fm, por lo que no se manifiestan fuera de los núcleos, lo que contrasta con las interacciones gravitatoria y electromagnética, cuyo alcance es ∞ . Posponemos una discusión de mayor profundidad al apartado de partículas elementales.

De la figura de la actividad A.9 se deduce que los núcleos estables tienen el mismo Z que N hasta aproximadamente $A = 30$ o 40. Más allá de este valor los núcleos estables contienen más neutrones que protones. Esto refleja el hecho de que, al aumentar Z, aumenta la repulsión eléctrica, por lo que hará falta un mayor número de neutrones (los cuales sólo ejercen

fuerza nuclear atractiva) para mantener la estabilidad. Para valores de Z muy grandes no hay número de neutrones que pueda vencer la repulsión eléctrica que se alcanza. Efectivamente, por encima de $Z = 82$ no hay núcleos totalmente estables.

La masa total de un átomo es siempre menor que la de sus protones, neutrones y electrones constituyentes (para tener en cuenta la masa del electrón usamos la masa de H-1 en vez de la masa del protón). Esta diferencia entre las masas que, en el caso de la actividad A.10. es de $0,0024$ u, recibe el nombre de defecto de masa (Δm). ¿Cómo puede ser eso? La teoría de la Relatividad lo explica a partir de la relación de equivalencia entre masa y energía $E = mc^2$. Según esto, existe una proporcionalidad entre la energía que se libera cuando se unen los nucleones o la que se necesita para desintegrar el núcleo en sus componentes (energía de enlace E_b) y el defecto de masa Δm , dada por $E_b = \Delta mc^2$.

Como el equivalente energético de una «uma» ($1,66 \cdot 10^{-27}$ kg) es 931 MeV, valor que podemos pedir a los alumnos que calculen, la energía de enlace del deuterio será $0,0024 \cdot 931 = 2,23$ MeV. Podemos estudiar, pues, la estabilidad de los núcleos con ayuda del concepto de energía de enlace que se puede calcular, en general por medio de la expresión

$$E_b = (Zm_H + Nm_n - M_a)c^2$$

siendo M_a la masa del átomo y m_H la masa del átomo de hidrógeno.

En la curva que aparece en la actividad A.13, el valor de la energía de enlace por nucleón crece al aumentar el número másico A , alcanzando un valor prácticamente constante, de unos 8 MeV, a partir de $A > 16$. Por encima de $A = 60$, aproximadamente, la curva disminuye lentamente, lo que indica que los núcleos más pesados y más ligeros se mantienen unidos menos firmemente que los de la zona central (Fe, Co, Ni). Más adelante veremos que este hecho permite la liberación de energía en los procesos de fisión y fusión. El hecho de que se alcance un valor prácticamente constante muestra que la energía de enlace no depende del número total de nucleones. Por tanto, la interacción nuclear sólo tiene lugar entre nucleones próximos (confirmando el corto alcance de la fuerza nuclear). En segundo lugar, se presentan una serie de picos para los núcleos He-4, C-12, O-16, que indican una estabilidad superior de dichos isótopos con respecto a los más próximos. Todo parece indicar que los núcleos que tienen 2, 8, 20, 28, 50, 82 y 126 protones y/o neutrones son más estables y los elementos correspondientes, mucho más abundantes en la naturaleza, por lo que son denominados números mágicos. Es una situación similar a lo que ocurría con los átomos con 2, 10, 18, 36, 54 y 86 electrones en la corteza (los gases nobles) cuya estabilidad es la mayor de todos los elementos. Este hecho pone de manifiesto la existencia de niveles energéticos en el núcleo.

3. RADIATIVIDAD

3.1. Modos de desintegración radiactiva

Cuando el núcleo emite un He-4, tal como se propone en la actividad A.14, el número másico A del núcleo resultante decrece en cuatro unidades y el número atómico Z en dos (primera regla de Soddy) porque se conserva la carga eléctrica total y la masa (el número A de nucleones). Se produce una transmutación que da origen a un nuevo elemento, en nuestro caso concreto el Rn-222.

En la actividad A.15 la masa del núcleo padre debe ser mayor que la suma de las masas del núcleo hijo más la partícula α . La diferencia de masas aparece en forma de energía cinética E_c que transporta principalmente la partícula α . Si no se verifican los enunciados anteriores, no se produce la desintegración, porque se vulnera el principio de conservación de la energía. Por ello se emiten preferentemente partículas α , dado que está muy firmemente ligada y su masa es mucho menor que la de los cuatro nucleones separados.

Cuando un núcleo emite un electrón, como se indica en la actividad A.17, el número másico A del átomo no sufre cambio, mientras que la carga positiva del núcleo aumenta en una unidad, de acuerdo con el principio de conservación de la carga (segunda regla de Soddy), con lo que el átomo resultante estará situado un lugar más adelante en el Sistema Periódico. Es decir, también tiene lugar una transmutación.

La energía cinética de la desintegración propuesta en la actividad A.18 sería $0,16$ MeV. En efecto, la masa del N-14 (que no es neutro ya que tiene seis electrones a su alrededor) más la masa del electrón emitido es la de un átomo neutro de N, por lo que la diferencia de masas es $0,00017$ u, que corresponde a $0,16$ MeV. Sin embargo, la experiencia muestra que la mayoría de los electrones emitidos tienen una energía cinética entre 0 y $0,16$ MeV, lo que, aparentemente, constituye una violación de la conservación de la energía.

Para contestar la actividad A.19 se debe considerar que los rayos gamma son fotones de energías muy elevadas. En la actividad A.14 se puso de manifiesto la existencia de niveles energéticos en los núcleos. Por ello, el núcleo puede estar en un estado excitado y cuando efectúa una transición al estado inferior o al fundamental, emite un fotón. El estado excitado puede deberse a un choque con otra partícula, a una transición radiactiva, etc. Los niveles nucleares están mucho más separados energéticamente que los atómicos: del orden de un keV o MeV. Como el rayo γ carece de carga eléctrica no originará ningún cambio de elemento.

3.2. Periodo y velocidad de desintegración (OPC)

Si el profesor no dispone de tiempo, éste es uno de los apartados de la Física nuclear que podría quedar como optativo. En ese caso, sería conveniente que los alumnos conociesen el concepto de periodo de semidesintegración, propuesto en la actividad A.20. Las actividades de conservación de la energía son más importantes y este principio se utiliza en la práctica totalidad de los temas. Por contra, el decrecimiento exponencial sólo se utiliza (opcionalmente) en la absorción de ondas.

Para calcular la relación propuesta en la actividad A.21 basta hacer $N = N_0/2$ y $t = T$ para tener $\ln(1/2) = -\lambda T$, de donde $-\ln 2 = -\lambda T$, y de aquí, $T = \ln 2/\lambda = 0,693/\lambda$ por lo que el periodo es inversamente proporcional a la constante radiactiva.

4. REACCIONES NUCLEARES. FISIÓN Y FUSIÓN

La actividad A.25 permite deducir las leyes de conservación de las reacciones nucleares a partir de las que se vieron en el estudio de las transformaciones radiactivas, que pueden considerarse reacciones sin partícula incidente. Por tanto, se conserva la carga eléctrica, el número atómico Z y también el número total de nucleones A . También se conserva la energía, la cantidad de movimiento, el momento angular, etc. Aplicando las dos primeras leyes podemos escribir las reacciones $^{14}\text{N} (^4\text{He}, ^1\text{H}) ^{17}\text{O}$ y $^9\text{Be} (^4\text{He}, n) ^{12}\text{C}$.

Las masas totales antes y después de la reacción de la actividad A.26 son, respectivamente, $13,003355 + 1,007825 = 14,011180$ u y $13,005739 + 1,008665 = 14,014404$ u (utilizamos la masa del átomo H-1 y no la del protón porque las masas de C-13 y N-13 incluyen los electrones y debemos tener un número igual de electrones en cada miembro de la reacción). Los productos tienen un exceso de masa de $0,0032244.931,5 = 3,0$ MeV. Esta reacción necesita energía y los protones de 2,0 MeV no tienen la necesaria para que se produzca. De hecho, deberían tener algo más de 3 MeV, pues con esta energía se produciría el N-13 y el neutrón sin energía cinética y, por tanto, sin cantidad de movimiento, contraviniendo la ley de conservación de éste.

5. PARTÍCULAS ELEMENTALES

La longitud de onda del electrón, que se propone determinar en la actividad A. 32, debe ser menor que $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$. La energía total de la partícula es

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

y, por otra parte,

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

Como la energía cinética E_c del electrón es mucho menor que su masa en reposo (0,5 MeV), podemos despreciar los sumandos que la contienen, llegando a una expresión sencilla

$$E_c = pc = hc/\lambda = 1 \text{ GeV}$$

Por tanto, para estudiar las partículas debemos dar un nuevo salto de energía, al mundo de los GeV (para los núcleos bastaba con MeV de energía y para los átomos con eV). Hacia 1960 se realizaron este tipo de experiencias y los resultados indicaron que el protón posee estructura interna.

5.1. Partículas y antipartículas

Al examinar la figura de la actividad A.33 se deduce que la curva de la partícula desconocida es similar, pero se desvía en sentido contrario, es decir, se trata de una partícula de igual masa que el electrón y carga positiva. Es el positrón, la antipartícula del electrón, cuya existencia había sido predicha por Dirac. En este proceso desaparece un fotón produciéndose un par electrón-positrón, es decir, se transforma el campo en materia ordinaria. Usualmente se denomina producción de un par e^-e^+ .

Para el cálculo de la energía propuesta en la actividad A.34 tendremos en cuenta que la energía mínima en reposo de un e^- o un e^+ es mc^2 , por lo que se necesita para su producción una energía $2mc^2$. Teniendo en cuenta que la masa en reposo del e^- es $0,00055 \text{ u} = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, $E = 2mc^2 = 2 \cdot 0,00055 \cdot 931 = 1,02 \text{ MeV}$. Como $E = hv = hc/\lambda$, $\lambda = hc/E = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$. Luego su λ ha de ser muy corta. Tales fotones están en la región de los rayos X del espectro. También pueden tener antipartículas otras partículas, siendo la energía mínima para su producción mucho mayor. Así, el antiprotón fue descubierto en 1955 por Segré y sus colaboradores. Dos años después fue descubierto el antineutrón.

En la actividad A.35 se debe tener en cuenta que, del mismo modo que los fotones pueden dar lugar a pares e^-e^+ , el proceso inverso puede tener lugar cuando un e^- se encuentra con un e^+ dando fotones. Se necesitan como mínimo dos fotones para que se conserve la cantidad de movimiento. Este proceso se denomina aniquilación. Aunque el e^+ es estable tiene una existencia muy corta en presencia de materia puesto que se aniquilan. Esta es una característica general de nuestro Universo. Las antipartículas se aniquilan con sus correspondientes partículas. Afortunadamente este suceso no tiene lugar muy a menudo, puesto que supondría la aniquilación de la materia ordinaria. El hecho anterior permite concluir que en nuestro Universo las antipartículas son más raras que las correspondientes partículas.

5.2. Las interacciones como intercambio de partículas

La actividad A.36 permite que el profesor exponga los conocimientos actuales sobre las interacciones que se pueden resumir en la siguiente tabla:

Interacción	Intensidad relativa	Alcance (cm)
Fuerte	1	10^{-13}
Electromagnética	10^{-2}	∞
Débil	10^{-5}	10^{-15}
Gravitatoria	10^{-40}	∞

En la actividad A.37 se puede partir de los dos problemas fundamentales de la acción a distancia newtoniana. Para evitar dicha idea, en el siglo XIX se introduce el concepto de campo que las masas o cargas crean a su alrededor. Si colocamos una carga q en un punto de un campo eléctrico E , aquella interactúa con el campo en dicho punto, evitando así el problema de la distancia. Por otra parte, si la carga Q , que crea el campo, cambia su estado de movimiento en un instante t , el campo en los puntos circundantes deberá cambiar también pero con un retardo $t' = t + r/c$ siendo r la distancia del punto a la carga Q , lo que elimina el carácter instantáneo de la interacción newtoniana.

Posteriormente, vimos que el campo electromagnético está constituido por fotones, por lo que cabe pensar que la interacción entre dos partículas cargadas suponga el intercambio de fotones. Sin embargo, si una partícula cargada emite un fotón, la energía del sistema aumenta en una cantidad $h\nu$, lo que contradice el principio de conservación de la energía. Sin embargo, la Física cuántica lo explica mediante las relaciones de indeterminación y proporciona, al mismo tiempo, una estimación del alcance de las interacciones.

La actividad A.38 se puede resolver por medio de las relaciones de indeterminación de Heisenberg. De acuerdo con éstas, la energía de una partícula puede venir afectada por una indeterminación ΔE , durante un tiempo, debiendo cumplirse que $\Delta t = \hbar/\Delta E$, tanto mayor cuanto menor sea la energía $h\nu$ del fotón intercambiado. El alcance $r = c\Delta t = \hbar c/\Delta E$ puede tomar cualquier valor por grande que sea, lo que equivale a decir que el alcance de la interacción electromagnética es ∞ . Es decir, cuanto más alejadas estén las dos partículas menor es la energía de los fotones que pueden intercambiar, lo que justifica la disminución de la intensidad con la distancia.

Si consideramos en la actividad A.39 que la masa del protón o del neutrón que interactúa se ve afectada por una indeterminación igual a la masa del mesón durante el tiempo

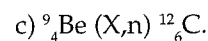
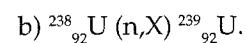
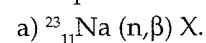
Δt permitido por las relaciones de indeterminación, tenemos $\Delta t = \hbar/mc^2$. Teniendo en cuenta que la velocidad de los mesones ha de ser inferior a la de la luz, el límite para la distancia recorrida será $r = \hbar/mc$ y, por tanto, si $r = 1 \text{ fm}$, $m = 130 \text{ MeV}/c^2$. En 1937 se descubrió el muón μ ($mc^2 = 105 \text{ MeV}$), creyéndose que era la partícula de Yukawa, pero en 1946 se comprobó que los muones no interactúan nuclearmente y, poco tiempo después, se descubrió el pión π ($mc^2 = 140 \text{ MeV}$), que se consideró el mediador de la interacción nuclear. En la década de los 70, se han descubierto aspectos de la interacción fuerte que no encajan en la teoría de Yukawa, como se indica en el subapartado 5.3. Partículas e interacciones.

CRITERIOS DE EVALUACIÓN

1. Comprender la necesidad de una nueva interacción para justificar la estabilidad nuclear.
2. Aplicar la equivalencia masa-energía a la determinación de la energía de enlace de los núcleos.
3. Calcular energías de enlace (o energías de enlace por nucleón).
4. Determinar los nuevos núcleos o nucleones obtenidos en las reacciones nucleares o en la radiactividad.
5. Utilizar las leyes de conservación del número atómico, del número másico y de la energía a las reacciones nucleares y a la radiactividad.
6. Valorar la importancia social de temas como la contaminación radiactiva, las bombas y reactores nucleares, los isótopos y sus aplicaciones.
7. Comprender algunas implicaciones de los descubrimientos de nuevas partículas: existencia de antimateria, interacciones como intercambio de partículas, etc.
8. Estimar la energía cinética del producto de una desintegración nuclear y predecir si puede tener lugar una determinada reacción conocida la energía cinética de la partícula incidente.
9. Enumerar las principales aplicaciones de los isótopos radiactivos.
10. Señalar los efectos de la radiactividad en la materia y, en particular, en los organismos.
11. Indicar las ventajas e inconvenientes de la energía nuclear sobre otros tipos de energía.
12. Comparar la idea de interacción cuántica con la idea de la Física clásica.

ACTIVIDADES DE EVALUACIÓN

1. Completar las siguientes reacciones nucleares:



2. Se observa que la masa de una sustancia radiactiva se reduce a la octava parte al cabo de 30 horas. ¿Cuál es su semivida (o periodo de semidesintegración)? (Selectividad. 1992)
3. Calcular la energía de enlace y la energía de enlace por nucleón del núcleo ${}^{56}_{26}\text{Fe}$. (Masa atómica = 55,9349 u)
4. Señalar los efectos que produce la radiación al atravesar la materia.
5. Indicar cuáles son las causas de contaminación radiactiva en los organismos, señalando los daños biológicos que producen.
6. Señalar las principales aplicaciones de los isótopos radiactivos.
7. Determinar si la reacción ${}^2_1\text{H} (d, n) {}^3_2\text{He}$ necesita energía umbral. $M({}^2_1\text{H}) = 2,014102 \text{ u}$; $M({}^1_0\text{n}) = 1,008665 \text{ u}$; $M({}^3_2\text{He}) = 3,016209 \text{ u}$.
8. Calcular la energía que se libera en la reacción de fusión ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + n$. $M({}^2_1\text{H}) = 2,014102 \text{ u}$; $M({}^3_1\text{H}) = 3,016049 \text{ u}$; $M({}^4_2\text{He}) = 4,002603 \text{ u}$; $M(n) = 1,008665 \text{ u}$.
9. La construcción actual de centrales nucleares provoca una gran oposición. Indicar las razones.

BIBLIOGRAFÍA

- DE POSADA, J.M. y PRIETO, T., 1990, Exploraciones gráficas de ideas escolares de los alumnos sobre radiactividad, *Enseñanza de las Ciencias*, 8 (2), 127-133.
- GIL, D.; SENENT, F. y SOLBES, J., 1986, Análisis crítico de la introducción de la Física moderna, *Revista de Enseñanza de la Física*, 2, 16-21.
- GIL, D.; SENENT, F. y SOLBES, J., 1989, Física moderna en la enseñanza secundaria: una propuesta fundamentada y unos resultados, *Revista Española de Física*, 3, 53-58.
- SOLBES, J., 1986, *La introducción de los conceptos básicos de física moderna*, Tesis doctoral, Universitat de València.

BIBLIOGRAFÍA COMENTADA

DIDÁCTICA DE LA FÍSICA Y LA QUÍMICA

CALATAYUD, M. L. *et al*, 1988, *La construcción de las ciencias físico-químicas, Programas-guía de trabajo y comentarios para el profesor*, (NAU: Valencia).

CALATAYUD, M. L. *et al*, 1990, *La construcción de las ciencias físico-químicas, Programas-guía de trabajo para el alumno*, (NAU: Valencia).

El libro del alumno ofrece materiales destinados a favorecer un trabajo colectivo de grupos de estudiantes, una actividad investigadora –contando con la ayuda/dirección del profesor– a través de la cual los propios estudiantes vayan construyendo los conocimientos que los textos habituales proporcionan elaborados. El libro del profesor ofrece las bases teóricas que fundamentan los materiales, y comentarios que describen los resultados previsibles de las actividades propuestas, justifican el hilo conductor, etc.

GIL, D. *et al*, 1991, *La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria*, (Horsori/ICE: Barcelona).

Libro que trata brevemente los problemas básicos de la didáctica de las ciencias: qué debe saber el profesor de ciencias, las prácticas de laboratorio, la resolución de los problemas, el aprendizaje de conceptos, las relaciones de las ciencias y el medio, la evaluación, el diseño de un currículum, etc.

HIERREZUELO, J. y MONTERO, A., 1989, *La ciencia de los alumnos*, (Laia/MEC: Barcelona).

DRIVER, R.; GUESNE, E. y TIBERGHEN, A., 1989, *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*, (Morata/MEC: Madrid).

Ambos textos presentan las preconcepciones o ideas previas de los alumnos en una serie de dominios: las fuerzas y movimientos, el calor y la temperatura, los circuitos eléctricos, la luz, la constitución de la materia, las transformaciones químicas, etc.

VARIOS AUTORES, 1992, *Curso de actualización científica y didáctica*, 6 volúmenes (MEC: Madrid).

Un curso muy completo que consta de los siguientes volúmenes: teoría y práctica del currículum; psicología de la comprensión y del aprendizaje de las ciencias; didáctica de las ciencias de la naturaleza; orientaciones teórico-prácticas para la elaboración de proyectos curriculares; orientaciones teórico-prácticas para la elaboración de unidades didácticas; recursos y elementos de actualización científica.

HISTORIA DE LA CIENCIA E INTERACCIONES CTS

BERNAL, J.D., 1976, *Historia social de la ciencia*, vol. 1 y 2, (Península: Barcelona)

Un texto clásico sobre las interacciones CTS a lo largo de la historia, que muestra cómo los descubrimientos científicos y técnicos están condicionados por la realidad social y, a su vez, actúan sobre ella.

MASON, S.F., 1986, *Historia de las ciencias*, 5 vols. (Alianza: Madrid).

Reconstruye la evolución de las ciencias desde sus precedentes hasta su maduración a principios del siglo xx, prestando atención tanto a la coherencia de su desarrollo interno como a algunas de sus interrelaciones con la sociedad.

SÁNCHEZ RON, J. M., 1992, *El poder de la ciencia*, (Alianza: Madrid).

Un excelente libro que muestra en el primer capítulo la institucionalización de la Física y la Química en el siglo xix. En el segundo y en el tercer capítulos presenta las grandes revoluciones de la Física del siglo xx, la Física cuántica y la Relatividad, mostrando aplicaciones de la primera (estado sólido, química cuántica, etc.) y el fenómeno social que supuso la Relatividad. En los restantes capítulos aparecen las relaciones de la Física con el mundo socio-económico, desde principios del siglo xx hasta los años posteriores a la II Guerra Mundial.

ZIMAN, J., 1980, *La fuerza del conocimiento*, (Alianza: Madrid).

Presenta la evolución de la ciencia como profesión, la génesis de la gran ciencia, la economía de la investigación y el desarrollo, las conexiones entre guerra y ciencia, la política científica, la responsabilidad moral del científico, etc.

TEXTOS DE CONSULTA

Los tres primeros textos se ajustan al nivel de este curso, tanto en contenidos como en Matemáticas. Utilizan el álgebra y la trigonometría elemental pero no el cálculo infinitesimal (en este aspecto, el nivel matemático de Hewitt es inferior).

GIANCOLI, D.C., 1985, *Física. Principios y aplicaciones*, (Reverté: Barcelona).

Un texto que da una visión completa de los conceptos básicos de Física, con una amplia gama de ejemplos que muestran las múltiples aplicaciones de la Física en la vida cotidiana y en diversos campos (medicina, arquitectura, tecnología, medio ambiente, etc.). Consta de 30 capítulos que revisan todos los campos de la Física. Los siete últimos capítulos están dedicados a la Física moderna (uno a Relatividad, tres a Física cuántica, dos a Física nuclear y uno a partículas elementales).

Existe una nueva edición publicada por la editorial Prentice-Hall que no incluye la Física moderna.

HEWITT, P.G., 1993, *Conceptos de Física*, (Limusa/Noriega: México).

Se trata de un libro de «high school» (nivel análogo al bachillerato) del que ya se ha publicado en inglés la quinta edición. Además de explicar por qué el cielo es azul, los planetas describen órbitas y el Sol brilla, se pretende comunicar al estudiante la emoción, la belleza y el gusto de toda la Física que cotidianamente le rodea. Para ello usa un lenguaje directo, coloquial y apenas utiliza matemáticas.

HOLTON, G., 1976, *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*, (Reverté: Barcelona).

Un texto clásico que realiza un uso completo y eficaz de la historia y la filosofía de la ciencia para introducir los conceptos de Física y Química. Trata de los orígenes de la cosmología

científica, el estudio del movimiento, las leyes de Newton y su sistema del mundo, sobre la estructura y el método de la ciencias (tres capítulos), las leyes de conservación, orígenes de la teoría atómica, luz y electromagnetismo, y el átomo y el Universo en la Física moderna (capítulos 26 a 30).

Los cuatro textos que siguen tienen un nivel superior al de este curso. Los dos últimos son un ejemplo de cómo se concibió la renovación de la enseñanza de la Física a mediados de los años 60. Introducían ideas modernas y el análisis vectorial. Los primeros utilizan menos aparato matemático (sólo cálculo) y destacan las múltiples aplicaciones de la Física. Ejemplifican el camino actual de la renovación.

ALONSO, M. y FINN, E. J., 1971, *Física*, (Fondo Educativo Interamericano: Panamá), 3 volúmenes.

Texto escrito en la línea renovadora iniciada por Feynman. Se trata de un curso para tres semestres a los que corresponden cada uno de los tres volúmenes: Mecánica, Campos y ondas, y Fundamentos cuánticos y estadísticos.

FEYNMAN, R.P.; LEIGHTON, R.B. y SANDS, M., 1971, *Física*, (Fondo Educativo Interamericano: Panamá), 3 volúmenes.

Este curso de Física es un texto clásico que influyó en la renovación de la enseñanza de la Física general. Realiza un gran esfuerzo de clarificación y discusión conceptual, muestra la importancia de los resultados experimentales, de las situaciones del mundo real, los problemas pendientes de solución, etc. Se trata de un texto para dos cursos universitarios. El primero corresponde al volumen I (Mecánica, radiación y calor) y el segundo a los volúmenes II y III (Electromagnetismo y materia, y Mecánica cuántica). Aunque no contiene enunciados de cuestiones y problemas, ofrece múltiples y sugestivas ideas para la enseñanza de la Física. En el volumen I se introduce la gravitación, las vibraciones y ondas, la Óptica, la Relatividad especial e ideas de Física cuántica mientras que en el volumen II se introduce el Electromagnetismo.

GETTYS, W.E.; KELLER, F.J. y SKOVE, M.J., 1992, *Física clásica y moderna*, (McGraw-Hill: Madrid).

Un excelente texto de Física general, caracterizado por la claridad de sus exposiciones. Consta de 43 capítulos, de los que seis son de Física moderna: Relatividad, cuantización de la radiación electromagnética, Mecánica cuántica, el átomo de hidrógeno y la Tabla Periódica, electrones en sólidos y el núcleo atómico. La mayoría de los capítulos incluyen comentarios de una o dos páginas con los que se pretende activar el interés de los estudiantes: biografías de científicos, aspectos tecnológicos de actualidad, aspectos epistemológicos, etc. Algunos capítulos incluyen instrucciones para resolver problemas con ayuda de un ordenador.

TIPLER, P.A., 1992, *Física*, (Reverté: Barcelona), 2 volúmenes.

Un texto clásico de Física general del que ya ha publicado la tercera edición. Consta de 35 capítulos estructurados en cinco partes: Mecánica, oscilaciones y ondas, Termodinámica, Electricidad y Magnetismo, Óptica y Física moderna (con sólo dos capítulos: Relatividad y los orígenes de la Física cuántica). Las excelentes fotografías en color proporcionan ejemplos de las aplicaciones contemporáneas de la Física y los dieciocho ensayos situados al final de algunos capítulos, muestran múltiples aplicaciones de la Física, explican fenómenos complejos de la Naturaleza (calentamiento global, auroras boreales, etc.), biografías de Newton y Maxwell, etc.