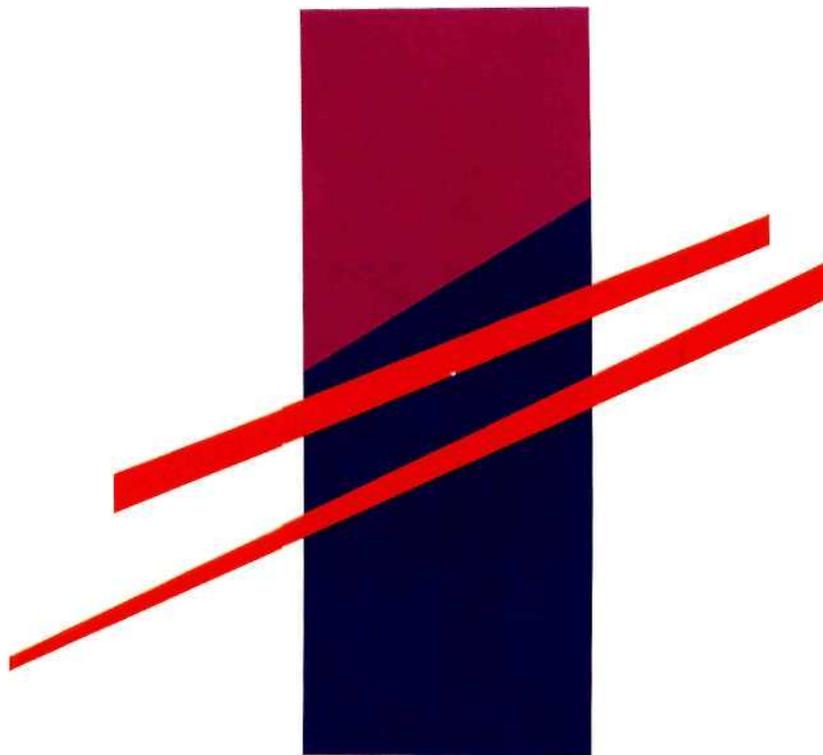


Materiales Didácticos

Física

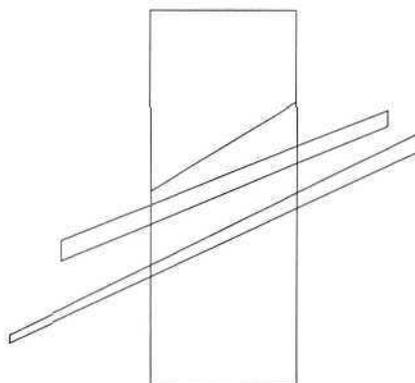


BACHILLERATO



Ministerio de Educación y Ciencia

Materiales Didácticos



Ciencias de la Naturaleza y de la Salud / Tecnología

Física

Autor:

Jordi Solbes Matarredona

Coordinación:

M.^a Jesús Martín-Díaz
del Servicio de Innovación



Ministerio de Educación y Ciencia

CENTRO DE DESARROLLO CURRICULAR

DEPARTAMENTO DE PUBLICACIONES

- *Coordinación de la edición:* Ana Francisca Aguilar Sánchez
- *Maquetación y supervisión de pruebas:* Pedro Sauras Jaime



Ministerio de Educación y Ciencia

Secretaría de Estado de Educación

Edita: Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica

N.º P. O.: 176-95-112-1

I. S. B. N.: 84-369-2668-4

Depósito legal: M. 25.033-1995

Imprime: Imprenta Fareso, S. A.

Paseo de la Dirección, 5 - 28039 Madrid

Prólogo

La finalidad de estos materiales didácticos para el Bachillerato es orientar a los profesores que, a partir de octubre de 1993, impartirán las nuevas enseñanzas de Bachillerato en los centros que han anticipado su implantación. Pretenden facilitarles el desarrollo de las materias de segundo curso, algunas de las cuales continúan las de primer curso. Con estos materiales el Ministerio de Educación y Ciencia quiere facilitar a los profesores la aplicación y desarrollo del nuevo currículo en su práctica docente, proporcionándoles sugerencias de programación y unidades didácticas que les ayuden en su trabajo; unas sugerencias, desde luego, no prescriptivas, ni tampoco cerradas, sino abiertas y con posibilidades varias de ser aprovechadas y desarrolladas. El desafío que para los centros educativos y los profesores supone el haber anticipado desde el curso 1992/93 la implantación de las nuevas enseñanzas, constituyéndose con ello en pioneros de lo que será más adelante la implantación generalizada, merece no sólo un cumplido reconocimiento, sino también un apoyo por parte del Ministerio, que a través de estos materiales didácticos pretende ayudar a los profesores a afrontar ese desafío.

El Ministerio valora muy positivamente el trabajo de los autores de estos materiales, que se adaptan a un esquema general propuesto por el Servicio de Innovación, de la Subdirección General de Programas Experimentales, y han sido elaborados en estrecha conexión con los asesores de este Servicio. Por consiguiente, aunque la autoría pertenece de pleno derecho a las personas que los han preparado, el Ministerio considera que son útiles ejemplos de programación y de unidades didácticas para la correspondiente asignatura, y que su utilización por profesores, en la medida en que se ajusten al marco de los proyectos curriculares que los centros establezcan y se adecuen a las características de sus alumnos, servirá para perfeccionar estos materiales y para elaborar otros.

La presentación misma, en forma de documentos de trabajo y no de libro propiamente dicho, pone de manifiesto que se trata de materiales con cierto carácter experimental: destinados a ser contrastados en la práctica, depurados y completados. Es intención del Ministerio seguir realizando ese trabajo de contrastación y depuración a lo largo del próximo curso, y hacerlo precisamente a partir de las sugerencias y contrapropuestas que vengan de los centros que se anticipan a la reforma.

El Real Decreto 1179/1992 de 2 de octubre, por el que se establece el currículo de Bachillerato, contiene en su anexo la información referida a esta asignatura que aparece reproducida al término del presente volumen.

Índice

	<i>Páginas</i>
I. INTRODUCCIÓN	7
II. ORIENTACIONES DIDÁCTICAS Y PARA LA EVALUACIÓN	11
Análisis crítico de la enseñanza usual de la física	11
Algunas ideas actuales sobre la enseñanza y el aprendizaje	12
De los «errores conceptuales» a las ideas previas	12
Algunos antecedentes	13
Hacia un nuevo modelo de enseñanza y aprendizaje	13
Implicaciones en la enseñanza	15
Orientaciones sobre estrategias didácticas	17
El programa de actividades	17
El método de trabajo en el aula y el papel del profesor	19
Utilización de audiovisuales y ordenadores en el aula y laboratorio	19
Orientaciones para la evaluación	20
III. PROGRAMACIÓN	25
1.ª Parte: El triunfo de la mecánica	26
Interacción gravitatoria	26
Vibraciones y ondas	29
2.ª Parte: El poder unificador de la física: El electromagnetismo	31
Óptica	31
Interacción electromagnética	33
3.ª Parte: La crisis de la física clásica y el surgimiento de la física moderna	36
Elementos de física relativista	36
Elementos de física cuántica	38
Física nuclear y de partículas	40
IV. DESARROLLO DE LA UNIDAD DIDÁCTICA: INTERACCIÓN GRAVITATORIA	43
Guía para el profesor	43
Actividades para el alumno	56

VI. BIBLIOGRAFÍA	63
Bibliografía citada en el texto	63
Bibliografía comentada.....	66
ANEXO: CURRÍCULO OFICIAL	69

Introducción

A fines del siglo XX el impacto que las ciencias físicas han tenido y tienen en la vida de los hombres son evidentes para todos. Su utilidad se ha puesto de manifiesto en la tecnología; industrias enteras se basan en sus descubrimientos y todo un conjunto de electrodomésticos y otros dispositivos proclama su eficacia. Sin olvidar su papel como fuente de cambio social, su influencia en el desarrollo de las ideas, sus implicaciones en el medio ambiente, etc. (Bernal 1976, Eckert y Schubert 1991, Sánchez Ron 1992, Ziman 1980).

Esta nueva realidad social plantea un doble reto a la enseñanza de las ciencias en general y de la física en particular. Por una parte formar científicos e ingenieros mejor cualificados, para potenciar la competitividad económica; por otra parte, que los ciudadanos dispongan de la información científica que les permita comprender y participar en un mundo cada vez más marcado por el desarrollo de la ciencia y la tecnología.

La enseñanza usual de las ciencias parece querer dar respuesta al primer problema y, por ello, su finalidad básica son los contenidos, que se plantean siempre en función del siguiente nivel. Así, por ejemplo, en la actualidad en nuestro país el BUP y COU en función de la Universidad. Igualmente, en Francia los alumnos señalan que «tal como son enseñadas las ciencias físicas, están destinadas sólo a los futuros alumnos de las secciones científicas» (Boyer y Tiberghien 1989). Frente a esto, a partir de los 80 en algunos países occidentales se plantea dar respuesta al segundo reto, potenciando la formación de ciudadanos críticos, que puedan participar en el proceso democrático de toma de decisiones, y por ello, en la enseñanza de las ciencias se da importancia a las relaciones CTS (ciencia, tecnología y sociedad).

Pensamos que es posible y necesaria, la consecución de ambas finalidades, mediante el tratamiento conjunto de contenidos, aspectos metodológicos e interacciones CTS (Solbes y Vilches, 1992). Este enfoque conjunto permitirá mostrar la física y, más en general, las ciencias, como un elemento fundamental de la cultura de nuestro tiempo, que ha debido ampliarse en las últimas décadas, para incluir no sólo aspectos de las humanidades tradicionales (literatura, historia, etc), sino también los principales avances científicos y sus aplicaciones, sin los cuales es difícil comprender la sociedad en que vivimos.

Quizá la Reforma pueda contribuir a solucionar esto, al concebir el Bachillerato como una enseñanza no obligatoria, con un carácter formativo y propedéutico a la vez. Este carácter debe ponerse de manifiesto en cada una de las materias que constituyen el Bachillerato y, por tanto, en la Física. El carácter formativo hace necesario que el currículo contribuya a la formación de ciudadanos informados y críticos y por ello debe incluir aspectos de formación cultural, como la forma de trabajar del científico, las complejas interacciones CTS, etc., que se concretan en los bloques transversales: Aproximación al trabajo científico y Física, tecnología y sociedad.

El carácter propedéutico implica que el currículo debe incluir los contenidos referidos a conceptos, procedimientos y actitudes que permitan abordar los estudios posteriores, no sólo las carreras universitarias de carácter científico y técnico, sino también el amplio abanico de especialidades de formación profesional de grado superior. Por ello esta Física se estructura en tres grandes núcleos (mecánica, electromagnetismo y física moderna) y su diseño es igual en las dos modalidades de Bachillerato que la cursan (Ciencias de la Naturaleza y de la Salud/Tecnología), aunque los proyectos de los centros y las programaciones de aula lo adapten a las diferentes situaciones.

El hecho de que el diseño sea común es lógico, dado que en este nivel sólo se pueden introducir los conceptos más básicos y generales, es decir, aquellos que reflejan problemas fundamentales de la materia, capaces de generar estructuras que integren los nuevos conocimientos y de gran aplicabilidad en distintos contextos. Por otra parte, es conveniente que este nivel educativo proporcione una visión general de la física puesto que las distintas facultades y escuelas técnicas que la imparten, sólo presentan aquellos temas más convenientes para sus estudios ulteriores.

Es necesario señalar, además, la imposibilidad de incluir esos conceptos más básicos en un único curso de Física de cuatro horas. Por ello, estos conceptos básicos deben repartirse entre los dos cursos del Bachillerato. Pero al aparecer juntas la Física y la Química en una única asignatura en 1º (siendo el único país de nuestro entorno europeo, salvo Portugal, en el que esto sucede) se plantea una dificultad de la Reforma. En efecto, si no se respeta la distribución cuatrimestral recomendada en los materiales didácticos de Física y Química de 1º (Hernández y Solbes 1992) puede darse la situación, señalada por Jiménez *et al.* (1992), de que el profesor comience, de forma arbitraria, por los temas de su disciplina, Química o Biología, y le quede muy poco tiempo para llegar hasta la Física o la Geología (o al revés). Esto, en el caso que nos ocupa, la Física, es particularmente grave, dado que en el cuatrimestre de 1º se introducen necesariamente los conceptos más generales e integradores (fuerza, movimiento, trabajo, energía, corriente, etc), que deberán ser usados constantemente en la Física de 2º.

En cuanto a los siete grandes núcleos de contenidos en la Física del 2º curso de Bachillerato, parecen los lógicos en una física para el siglo XXI. Los dos primeros núcleos transversales son necesarios para familiarizar a los alumnos con la forma de trabajo de los científicos y contextualizar la ciencia, aspectos cuya necesidad ya se ha resaltado anteriormente. Los cuatro siguientes (interacción gravitatoria, vibraciones y ondas, óptica e interacción electromagnética) son necesarios para completar la física clásica (mecánica y electricidad) introducida en la Física y Química de 1.º. Se consigue así, entre los dos cursos, mostrar las ideas fundamentales de ese gran cuerpo coherente de conocimientos que es la física clásica, articulada en torno a la mecánica newtoniana (que explicó el sonido y el calor a partir de las leyes del movimiento) y a la teoría electromagnética (que acabó integrando los fenómenos eléctricos, magnéticos y ópticos).

Pero a su vez, esta gran concepción del mundo no pudo explicar una serie de fenómenos y esto originó el surgimiento de la física moderna, algunas de cuyas ideas (relatividad, cuántica y física nuclear) también son introducidas en 2º de Bachillerato. Diversas razones lo justifican (Solbes 1992):

- Dar una imagen más correcta del desarrollo de la física, dado que la física moderna es un claro ejemplo de cambio conceptual.
- La creciente importancia de sus aplicaciones en nuestra sociedad (como la electrónica o la física nuclear).
- El interés manifiesto de los alumnos no sólo por dichas aplicaciones, sino también por aspectos más teóricos.
- Y, finalmente, por contribuir la física moderna a una mayor comprensión de la física clásica al mostrar sus límites de validez y las diferencias entre ambos paradigmas.

Enfoques de la materia

A continuación presentaremos diversos modelos o enfoques que puede tener la materia:

Primer enfoque

Un posible enfoque para la física, es el disciplinar. En su versión más tradicional se trata de seleccionar una serie de temas de mecánica, termodinámica, electricidad y magnetismo, óptica y física moderna, que aparecen capítulo a capítulo, sin ningún tipo de estructuración.

Segundo enfoque

Otro posible enfoque disciplinar de la física podría ser el que se plantea en algunos textos de Física general, que surgen a finales de los 60, principios de los 70, como intentos de actualizar la enseñanza de la física. Este enfoque, aplicado a la Física de 2º, implicaría comenzar por interacciones (gravitatoria y electromagnéticas), proseguir con ondas (incluyendo vibraciones y ondas y óptica) y finalizar con la física moderna (relatividad, cuántica y sus aplicaciones).

Tercer enfoque

Un tercer enfoque disciplinar, sería mostrar cómo se han ido construyendo las distintas teorías físicas. Para ello, se puede empezar completando el edificio teórico que supuso la mecánica como primera ciencia moderna, realizando una introducción a la teoría de la gravitación universal, que permitió derribar la supuesta barrera entre el mundo sublunar y celeste. Seguidamente estudiar el movimiento ondulatorio para completar la imagen mecánica del comportamiento de la materia. A continuación se aborda el estudio de la óptica, para mostrar posteriormente su integración en el electromagnetismo, que se convierte así, junto a la mecánica, en el pilar fundamental del imponente edificio teórico que se conoce como física clásica. Pero a su vez, esta gran concepción del mundo no pudo explicar una serie de fenómenos y esto originó el surgimiento de la física moderna (relatividad, cuántica y sus aplicaciones).

Cuarto enfoque

Un cuarto modelo podría ser el de utilizar centros de interés, problemas relevantes de la humanidad, para introducir los diversos contenidos. Así, por ejemplo, en esta Física se podrían utilizar:

- El movimiento de los satélites artificiales en el núcleo temático de gravitación.
- La contaminación acústica en vibraciones y ondas.
- Los instrumentos ópticos y sus aplicaciones en óptica.
- La producción de energía eléctrica en interacción electromagnética.
- El uso de la energía nuclear en física moderna.

Este enfoque sería análogo al de los proyectos de ciencia integrada o combinada de los años 70, por ejemplo, la ciencia combinada de Nuffield, donde los diferentes componentes disciplinares se estudian en la misma asignatura alrededor de temas globales, por ejemplo. También los más recientes proyectos CTS tienen una orientación interdisciplinar basada en las relaciones de la ciencia con la tecnología y en sus implicaciones en la sociedad y el medio ambiente; por ejemplo, el SATIS (Science and Technology in Society) (1986) y el PLON (Physics Curriculum Development Project)

(1984). Hay que señalar que estos proyectos se plantean para la enseñanza secundaria obligatoria, así como la dificultad de una cuidadosa selección de los centros interés que permita contemplar todos los núcleos de contenidos de 2º de Bachillerato.

Quinto enfoque

Un quinto enfoque sería el histórico, realizando un estudio de una serie de científicos, de la época en que trabajaron y de sus principales contribuciones. En concreto se podría abordar el estudio de Newton (gravitación), Rayleigh (ondas), Newton, Huygens, Fresnel, Young, etc. (óptica), Coulomb, Ampère, Faraday, Maxwell, etc. (electromagnetismo), Einstein (relatividad), Einstein, Bohr, Planck, De Broglie, Heisenberg, Schrödinger, etc. (cuántica) y los Curie, Rutherford, Soddy, Dirac, Fermi, Yukawa, etc. (física nuclear).

No hay materiales en esta línea, aunque hemos de mencionar textos como «La introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas» (Holton, 1976) y su adaptación a la enseñanza secundaria superior «The Project Physics Course» (1970) que, desde un enfoque disciplinar, hacen una amplia utilización de la historia de la ciencia.

Evidentemente, rechazamos las dos primeras propuestas, por que al carecer de perspectiva histórica, no permiten mostrar el cambio de los marcos conceptuales o paradigmas, la evolución de las ideas, etc. Nos inclinamos, de acuerdo con las ideas expuestas en esta introducción por una síntesis entre la tercera propuesta disciplinar y los aspectos históricos y de interacción CTS. Es decir, se trata de una propuesta disciplinar que:

- Muestre las interacciones ciencia, tecnología, sociedad y naturaleza a lo largo de la historia y en la actualidad, lo que permite dar una imagen más correcta y contextualizada de la física.
- Extraiga de la historia de la ciencia los problemas significativos y ponga al alumnado en situación de abordarlos; ello permite, además, tener en cuenta sus ideas previas. Así mismo, que muestre el carácter colectivo y controvertido de la física y como en la construcción de las teorías se producen ideas erróneas, experiencias cruciales, hipótesis geniales, es decir, dé una imagen viva de la ciencia.

En resumen, en nuestra propuesta se muestran las interacciones CTS y algunos aspectos de la historia de la física, pero no se toman como hilo conductor, como en el cuarto y quinto enfoques mencionados anteriormente.

Orientaciones didácticas y para la evaluación

Diversos autores han caracterizado el modelo de transmisión verbal (Ausubel 1976, Novack 1982, Gil 1983). Así, según dicho modelo se supone que basta una explicación clara y bien presentada por el profesor para producir, junto con los clásicos ejercicios y experimentos, la comprensión de los conocimientos por el alumnado. Considera que el aprendizaje se produce por recepción de los conocimientos elaborados, es decir, considera que la inteligencia del alumno es susceptible de enriquecerse con la aportación de conocimientos que el sujeto va incorporando a medida que se le transmiten. Desde esta visión, el hecho de que los estudiantes no aprendan es sólo debida a la falta de trabajo personal o a factores relacionados con su capacidad intelectual.

El impacto que produjo la capacidad de los soviéticos para adelantarse en la carrera espacial con el lanzamiento del Sputnik en 1957 (Medina y Sanmartín 1990) es una de las causas de los intentos de renovación en la enseñanza de la física a partir de los años 60. Se puso en cuestión la enseñanza basada en la simple transmisión verbal y se buscó en la utilización del «método científico» y, más concretamente, en la realización de trabajos prácticos, la superación de las dificultades en el aprendizaje de la física. Con estas prácticas se pretendía que los alumnos fuesen descubriendo las cosas por sí mismos, mediante una amplia realización de observaciones y actividades experimentales guiadas por el método científico. Estas ideas influyeron en la elaboración de una serie de proyectos en los años 60/70 para la enseñanza de la física (el Nuffield, el PSSC, etc), de la química (el CBA, el CHEM, etc.).

En lo que respecta a nuestro país, en las recomendaciones oficiales se instaba a la práctica de la metodología científica por los alumnos (BOE 13-4-1975) y en los planes de estudio universitarios aparecen asignaturas de «Técnicas experimentales».

Pero los resultados obtenidos con esta reorientación de la enseñanza de la física allí donde se llevó a cabo no se muestran tan positivos como inicialmente se había previsto. En palabras de Ausubel (1976):

«...Como los términos «laboratorio» y «método científico» se volvieron sacrosantos en las preparatorias y las universidades los estudiantes fueron obligados a remedar los aspectos exteriormente conspicuos pero inherentemente triviales del método científico. En realidad con este procedimiento aprendieron poco de la materia y menos aún del método científico».

Las causas de estos resultados 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 muchas actividades experimentales, en las que aspectos esenciales del trabajo científico, como la emisión de hipótesis o el diseño de experimentos, son ignorados, convirtiendo dichas actividades en meras manipulaciones (Ausubel 1976, Gil 1983).

Por otra parte, cuando los trabajos prácticos se incorporan al modelo usual de enseñanza por transmisión verbal, como sucede en muchos países, juegan simplemente el papel de ilustración o

Análisis
crítico de la
enseñanza
usual
de la física

comprobación de lo expuesto anteriormente por el profesor. Incluso, muchas veces son realizados por el propio profesor como experiencias de cátedra. Esto convierte dichas prácticas en meras manipulaciones siguiendo guías pormenorizadas (Gil y Payá 1988).

Esta orientación de aprendizaje por descubrimiento supuso un gran intento de renovación curricular. Si a esto añadimos los retos, ya señalados en la introducción, de formar científicos y técnicos mejor cualificados y de familiarizar con las relaciones CTS a todos los ciudadanos, tendremos el origen de un proceso de transformación de la enseñanza de la física. Dicho proceso ha mostrado otras limitaciones del modelo de transmisión verbal como, por ejemplo, el fracaso generalizado de los alumnos en la resolución de problemas, en particular, si se separan ligeramente de los realizados en clase; la imagen deformada que poseen los mismos sobre la física (su desarrollo, sus relaciones con la tecnología y la sociedad) y, finalmente, el descenso constatado del interés de los alumnos hacia el aprendizaje de la Física y la Química.

Análogamente, en lo que concierne a los problemas 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 que los alumnos se limiten a reconocer problemas que ya han sido resueltos o a abandonar (Gil y Martínez, 1987).

Además, en cuanto a la visión de las ciencias y de los científicos se caracteriza por no mostrar la evolución de los conceptos y la existencia de rupturas conceptuales con las ideas aceptadas por los científicos, que se traducen en la aparición de nuevos paradigmas (Gil, Senent y Solbes 1989) y por ignorar sus relaciones con la tecnología y las interacciones con la sociedad y el medio ambiente (Solbes y Vilches 1989). En efecto, pocos estudiantes españoles de Física y Química son capaces de mencionar dichas relaciones y los que lo hacen, se limitan en su mayor parte a aquellas que tienen un carácter negativo (armamento, contaminación, lo nuclear, etc). Lo contrario sucede con las ciencias biológicas, cuyas interacciones aparecen mayoritariamente como positivas (Solbes y Vilches 1992). Esto puede traducirse en una posible imagen social negativa de la física en un futuro próximo.

Esta ausencia de las interacciones CTS, junto con otros factores como el método de enseñanza del profesor, la escasez de trabajos prácticos, la ausencia de temas de física moderna y la falta de confianza en el éxito al ser evaluados, han sido señalados por los estudiantes españoles como los principales causantes de su actitud desfavorable, de su desinterés hacia la física y su aprendizaje (Solbes y Vilches 1992).

Las consecuencias de todo lo anterior son muy concretas y sobradamente conocidas. En la Física de COU, se constata un elevado porcentaje de suspensos (superior al 70 % en las pruebas de Selectividad, aunque la mayoría apruebe dichas pruebas globalmente) y una disminución considerable de los alumnos que la cursan desde que pasó a ser optativa (actualmente algunos alumnos menos que la Química de COU).

Algunas ideas actuales sobre la enseñanza y el aprendizaje

De los «errores conceptuales» a las ideas previas

La publicación de algunos trabajos como la tesis de Viennot (1976) puso en cuestión la efectividad de la enseñanza usual allí donde sus resultados parecían más positivos. Los alumnos terminaban sus estudios de física no sólo sin saber resolver problemas y sin una imagen correcta del trabajo científico, sino que una gran mayoría de ellos no había logrado comprender los conceptos científicos más básicos, a pesar de la insistencia y repetición con que habían sido enseñados. Estos 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 y son similares para alumnos de distintos países. Estos preconceptos

presentan una notable resistencia a ser sustituidos por los conocimientos científicos, encontrándose en estudiantes universitarios e incluso en un porcentaje significativo de profesores en activo.

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 (Jiménez *et al* 1992). Por otra parte se puso en duda que la transmisión verbal de conocimientos hiciera posible un aprendizaje significativo de los mismos por los alumnos.

Existe una abundante bibliografía sobre la detección de preconceptos en todos los campos de la ciencia y, en especial, de la física. La mayor parte de los trabajos corresponde a la mecánica, pero los hay también sobre el calor, la corriente eléctrica o la óptica. Se han podido escribir incluso libros sobre ellos como los de Driver, Guesne y Tiberghien (1989) y Hierrezuelo y Montero (1989). Sobre los temas tratados en la Física de 2º de Bachillerato se pueden encontrar referencias bibliográficas, así como la descripción de algunos preconceptos en el siguiente apartado de este libro.

Algunos antecedentes

Aunque el interés por las preconcepciones es reciente, conviene señalar que existen precedentes como Piaget, Ausubel, Vigotsky, etc., que llamaron la atención sobre la importancia de las estructuras cognitivas en el aprendizaje. Así, por ejemplo, las ideas de Piaget sobre la adaptación, que implica cambios en la organización de las estructuras cognoscitivas a lo largo del proceso evolutivo y que se realiza a través de la asimilación y la acomodación, han sido utilizadas por Posner *et al* (1982), sin aceptar otros aspectos de su teoría. También ha resultado fructífera su idea sobre las semejanzas entre las concepciones de los estudiantes sobre el movimiento y la física aristotélica (Piaget 1970). Aunque no conviene llevar demasiado lejos el paralelismo entre la historia de la ciencia y las preconcepciones de los alumnos porque, a menudo, sólo aparecen algunas características comunes entre la idea empleada por los alumnos y su contrapartida histórica y porque cuando las ideas en cuestión fueron manejadas por científicos del pasado, formaban parte de sistemas conceptuales coherentes, mientras que las ideas utilizadas por los alumnos lo son mucho menos (Saltiel y Viennot 1983, Driver *et al* 1989).

También continúa vigente la distinción entre aprendizaje memorístico y significativo realizada por Ausubel. El primero es un aprendizaje literal sin comprensión, en el cual la información nueva no se asocia con los conceptos existentes en la estructura cognitiva y, por lo tanto, se produce una interacción mínima o nula entre la información recientemente adquirida y la información ya almacenada. El segundo es un aprendizaje con significado, en el cual se relaciona la nueva información con alguna idea relevante de la estructura conceptual del individuo. Otro aspecto interesante es la relación existente entre el tipo de aprendizaje y la memoria: el conocimiento aprendido significativamente se retiene durante más tiempo y aumenta la capacidad para aprender después, de manera más fácil, otros materiales relacionados. El aprendizaje significativo es el que muchos profesores pretenden lograr de los estudiantes, encontrándose que muchas veces éstos se limitan a aprender información literal carente de significado para ellos. Una consecuencia para la enseñanza de dicho modelo se puede resumir en la conocida frase de Ausubel (1976): «*si yo tuviera que reducir toda la psicología educativa a un solo principio enunciaría éste: averíguese lo que el alumno ya sabe y enséñese consecuentemente*»

Hacia un nuevo modelo de enseñanza y aprendizaje

Los trabajos sobre ideas previas y sus convergencias con las aportaciones de Piaget, Ausubel, etc., antes señaladas han dado lugar, en estos últimos años, a propuestas que coinciden básicamente en concebir el aprendizaje de las ciencias como una construcción de conocimientos que parte

necesariamente de un conocimiento previo y en la que comprender supone establecer relaciones. Se puede hablar así de la emergencia de un modelo constructivista de aprendizaje de las ciencias (los trabajos de Driver (1988) y Novack (1988) son una muestra del consenso existente al respecto).

El nuevo modelo constructivista pone en duda que la enseñanza usual por transmisión verbal de conocimientos elaborados haga posible el aprendizaje significativo porque este tipo de enseñanza ignora que cada alumno posee una estructura conceptual previa (Driver 1986, Novack 1982). Dicha estructura posee, además de los conocimientos adquiridos a través del aprendizaje de la física, una serie de ideas intuitivas o preconceptos, que se originan en:

- El proceso de inducción, intuición e imaginación que el alumno realiza, desde su infancia, para intentar explicar y predecir lo que ocurre alrededor, es decir, los fenómenos de su entorno natural y técnico.
- El uso de términos científicos en el lenguaje ordinario con significados diferentes y ambiguos (p.e. fuerza, trabajo, energía) (Solis 1984).
- Las formas de razonamiento espontáneas de los alumnos (Viennot 1989), como la causalidad lineal, el razonamiento analógico, secuencial, etc. (Pozo 1992).
- Los errores introducidos explícitamente por los textos, los propios profesores, etc.

Esos preconceptos, capaces de coexistir con conocimientos que los contradicen, actúan como obstáculos, impidiendo la comprensión de nuevos conceptos transmitidos por el profesor y produciendo errores conceptuales.

Según este nuevo modelo, para que se produzca un aprendizaje significativo de la física (y de cualquier ciencia), en lugar de un aprendizaje puramente memorístico, es necesario que haya una interacción entre la estructura conceptual previa y la nueva información que puede —o no— producir cambios en ésta. Dicha situación es comparable, en cierta forma, con los cambios de paradigma en las ciencias, dado que como Hewson (1981) señala:

«El aprendizaje de la ciencia es complejo, el alumno ha de adquirir nueva información, reorganizar el conocimiento existente e incluso abandonar ideas profundamente asumidas (...) La analogía entre el aprendizaje individual y el cambio conceptual en las disciplinas científicas ha sido fructífera y ha propiciado un marco adecuado para el análisis del aprendizaje de las ciencias».

Describiremos a continuación, brevemente, las distintas posibilidades de interacción conceptual que involucra el aprendizaje de la física (Posner et al 1982), en las que coinciden otros autores:

- La asimilación, que tiene lugar cuando las ideas previas permiten tratar la información nueva; la cual queda, por tanto, incorporada (asimilada) al esquema conceptual.
- La acomodación, que es el cambio que se produce cuando los conceptos previos son inadecuados para tratar la nueva información. Esto produce una insatisfacción que se traduce en una reestructuración o reorganización de los conceptos previos, o bien en una sustitución de los conceptos existentes por otros nuevos.

Para que se produzca la reorganización conceptual y, sobre todo, la sustitución de conceptos previos por otros nuevos, es decir, para que se produzca el cambio conceptual es necesario que:

- Exista insatisfacción con las ideas previas, para lo cual el profesor debe presentar un número suficiente de anomalías o problemas que el esquema no pueda resolver.
- Las ideas nuevas sean inteligibles (el alumno debe comprender lo que significan), plausibles (reconciliables con los fenómenos conocidos) y fructíferas (capaces de explicar las anomalías encontradas y ampliar el campo de conocimientos, abriendo nuevos campos de investigación).

En resumen, podemos observar un paralelismo nada superficial entre el proceso de aprendizaje y el modo de producción de los conocimientos científicos. En otras palabras, se establece una analogía fructífera entre el aprendizaje individual y los cambios de modelos, teorías, etc., en las disciplinas científicas, lo cual viene a apoyar la idea de una enseñanza de las ciencias acorde con las características del trabajo científico (Gil 1983).

Por ello, el nuevo modelo didáctico debería enfocar el aprendizaje, no sólo como cambio conceptual, sino también como cambio metodológico (Gil y Carrascosa 1985). Los alumnos únicamente llegarán a cambiar sus formas usuales de razonamiento, (como por ejemplo, la causalidad lineal, explicar cambios pero no estados, etc. (Pozo 1992)) y a superar sus tendencias metodológicas usuales de sacar conclusiones precipitadas y de generalizar acríticamente a partir de observaciones meramente cualitativas, si son puestos reiteradamente en situación de aplicar la metodología científica, es decir, de plantearse problemas, emitir hipótesis a la luz de los conocimientos previos, diseñar experimentos, realizarlos, analizar los resultados, que verifican o falsan la hipótesis, etc. (Carrascosa y Gil 1985).

Y, además, este planteamiento de ajustar la enseñanza a las características de la metodología científica es necesario, no sólo porque la familiarización de los alumnos con el trabajo científico sea un objetivo en sí, sino porque los cambios conceptuales durables exigen a la vez cambios metodológicos en el alumno (Gil y Carrascosa 1985), es decir, sin el cambio metodológico no es concebible un efectivo cambio conceptual y, por tanto, una verdadera superación de los preconceptos erróneos.

Por último, parece necesario conseguir no sólo cambios conceptuales y procedimentales, sino también axiológicos y actitudinales (Gil 1986, Solbes y Vilches 1989, Duschl y Gitomer 1991). Esto es particularmente relevante si se tiene en cuenta el descenso del interés de los estudiantes por la enseñanza de las ciencias físico-químicas (y la consiguiente carencia de científicos e ingenieros en algunos países occidentales), así como la existencia de una creciente actitud de rechazo hacia ellas, que confunde la ciencia con las consecuencias más negativas del desarrollo económico y político (destrucción del medio, carrera armamentista, etc). Un instrumento muy potente para conseguir dicho cambio es la inclusión de contenidos de historia de la ciencia y de interacciones CTS (Solbes y Vilches 1989, 1992). Y esto último por las siguientes razones:

- Presentar una imagen más contextualizada y, por tanto, menos deformada de la ciencia.
- Desarrollar actitudes positivas y críticas hacia la ciencia, intentando superar el desinterés y el rechazo.
- Mejorar el aprendizaje, dado que éste «estará limitado si la persona no ve conexiones relevantes entre esa actividad y sus intereses personales» (Pope y Gilbert 1983).

Las estrategias para favorecer el triple cambio (conceptual, metodológico y actitudinal) dan gran relevancia a la actividad de los alumnos, a los que se les plantean actividades problemáticas, como veremos en el siguiente apartado.

Estas concepciones sobre el aprendizaje de las ciencias ha conducido a estrategias de enseñanza para superar los errores conceptuales que coinciden en la necesidad de sacar a la luz las ideas de los alumnos, para después crear conflictos que las pongan en cuestión e introducir, a continuación, las nuevas concepciones científicas, cuya mayor potencia favorecerá el cambio conceptual (Driver 1986).

Es cierto que dichas estrategias pueden, puntualmente, dar resultados positivos al llamar la atención sobre preconcepciones asumidas acríticamente como evidencias; pero también es cierto que

Implicaciones en la enseñanza

practicada de forma reiterada (en casi todos los temas) se trata de una estrategia «perversa» porque favorece la formulación y consolidación de las ideas previas, para seguidamente cuestionarlas, con lo que se puede provocar a la larga la inhibición de los alumnos. Y además aleja la situación de aprendizaje de lo que constituye la base de la construcción de los conocimientos científicos, que es la resolución de los problemas planteados por la propia ciencia y la tecnología.

Análogamente, las actividades que se plantean a los alumnos no son tanto para cuestionar ideas o provocar cambios conceptuales, cuanto para resolver problemas de interés (para los alumnos y no sólo para los profesores) (Otero 1989). Para resolverlos los alumnos emiten hipótesis, basadas en sus ideas (equivocadas o no), que deben ser contrastadas mediante análisis críticos, experimentos. Así se ponen de manifiesto los posibles fallos y limitaciones de las ideas expuestas por los alumnos y se introducen las nuevas ideas como respuesta a problemas que el alumno se ha planteado previamente. Estas ideas nuevas habrán de ser repetidamente confrontadas con las antiguas si queremos consolidarlas (Calatayud *et al.* 1988, Gil *et al.* 1991).

Hay situaciones en las que la enseñanza de la física debe tener en cuenta que los conocimientos se articulan en cuerpos coherentes o teorías, hasta que dificultades insuperables provocan el surgimiento de un nuevo marco teórico. Nos estamos refiriendo al cambio de la física pregalileana a la clásica y al de ésta a la moderna. Pero incluso, dentro de uno de esos marcos teóricos, la física clásica, hay problemas cuya resolución implica el cambio de conceptos, modelos, etc. (por ejemplo, el paso del modelo corpuscular de la luz al ondulatorio). En estos casos, la enseñanza ha de organizarse para provocar cambios conceptuales en los alumnos, ajustados en cierta medida a los cambios de teoría o modelo.

Así, en el caso de la física preclásica (que debe trabajarse en 1º, pero también en la gravitación de 2º) conviene comenzar planteando problemas sobre situaciones mecánicas que lleven a los alumnos a exponer sus ideas y puntos de vista, mostrando el profesor sus semejanzas con las ideas aristotélicas y de la teoría de ímpetus. De esta forma cuando los alumnos se enfrenten en los capítulos de cinemática, dinámica y gravitación con problemas que no puedan explicarse a la luz del paradigma conceptual que se ha hecho explícito, podrán experimentar la necesidad de un cambio de ideas y comprender que el desarrollo de la física ha supuesto en ocasiones enfrentamientos de concepciones (Calatayud *et al.* 1988, Payá, Solbes y Vilches 1992).

En cuanto a la física moderna, conviene plantear a los alumnos algunos problemas (por ejemplo, el efecto fotoeléctrico), viendo las predicciones que la física clásica hace para explicarlos. A continuación se contrastan dichas predicciones con los resultados experimentales y se comprueba que la física clásica no puede explicarlos. Esto permite mostrar los fallos y limitaciones del paradigma clásico y sustituir las viejas ideas por otras nuevas que habrán de configurar un nuevo paradigma, la física moderna. Dicho paradigma habrá de ser repetidamente confrontado con el clásico, si queremos que pueda quedar verdaderamente consolidado (Solbes 1986 y 1992, Gil, Senent y Solbes 1989).

Por ello, el nuevo modelo plantea los trabajos prácticos como pequeñas investigaciones en las que los estudiantes definen el problema, emiten hipótesis, incluso diseñan los experimentos, los realizan, analizan los resultados obtenidos y elaboran informes (Gil y Payá 1988). Así mismo, replantea los problemas con una metodología de trabajo que indica que se aborden como investigaciones, lo que permite a los estudiantes analizar cualitativamente el problema, elaborar estrategias de resolución, analizar los resultados (las situaciones límite, etc.) (Gil y Martínez 1987). Se trata de evitar los planteamientos empiristas y puramente operativos y organizar la enseñanza de la física para familiarizar a los alumnos con la metodología científica y favorecer así el cambio metodológico, desde sus formas espontáneas de razonamiento a una metodología más coherente con el trabajo científico.

Por último, para el nuevo modelo las interacciones CTS y algunos aspectos históricos son también contenidos de las materias científicas (Solbes 1990, Solbes y Vilches 1992). Por ejemplo, la

historia de la ciencia, al considerar la física como una actividad humana, pone de manifiesto que la física es un conjunto articulado de teorías o modelos que interpretan la realidad; cuando estos modelos no pueden explicar ciertos problemas son sustituidos por otros nuevos. Por otra parte, el análisis de las relaciones CTS pone de manifiesto que la física está sometida a ciertos condicionantes y determinada por la sociedad en que se desarrolla.

La inclusión de las interacciones CTS y de aspectos históricos, junto al replanteamiento del método de trabajo en el aula y de la evaluación (de los que hablaremos a continuación), contribuye, como ya hemos señalado, a un cambio de actitud hacia la Física y su aprendizaje. Por otra parte, permite que la enseñanza de las ciencias físicas se transforme en un elemento fundamental para la formación de los ciudadanos, no sólo para su capacitación profesional, sino también para que puedan participar activamente en los asuntos sociales.

Las ideas sobre el aprendizaje y la enseñanza expresadas en el apartado anterior contienen orientaciones para un cambio de la enseñanza de las ciencias físicas. Sin embargo, es conveniente desarrollar algunos aspectos con mayor profundidad, para facilitar la concreción en los proyectos curriculares de cada centro.

El programa de actividades

En cuanto a los materiales y métodos de trabajo, una de las propuestas coherentes con el nuevo modelo de aprendizaje son los programas de actividades, cuya idea central es que cada tema, desde la introducción de conceptos a la discusión de las aplicaciones sociales, pasando por la resolución de problemas o el trabajo experimental, se convierta en un conjunto de actividades, debidamente organizadas, que los alumnos tienen que realizar (que pueden estar estructurados en pequeños grupos) bajo la dirección del profesor (Calatayud *et al.* 1988).

Estas actividades problemáticas deben permitir a los alumnos exponer sus ideas previas, elaborar y afianzar conocimientos, explorar alternativas, etc., superando la mera asimilación de conocimientos ya elaborados. Además, estas actividades deben cubrir el contenido de cada tema con una lógica interna que evite un aprendizaje desconexo y han de aprovechar todas las ocasiones posibles de que el alumno se familiarice con la metodología científica. Por último, conviene resaltar que la gran flexibilidad que ofrecen las actividades permite adaptarlas a los distintos intereses del alumnado puestos de manifiesto por muchos autores (Boyer y Tiberghien 1989, Martín-Díaz y Kempa 1991).

Tipos y ejemplos de actividades

Presentamos a continuación algunos tipos de actividades que deben considerarse para el desarrollo de un tema cualquiera y que se pueden agrupar en tres bloques:

Actividades de iniciación: de sensibilización al tema, de explicitación y puesta en valor de las ideas que posean los alumnos, que proporcionen una concepción preliminar de la tarea que sirva de hilo conductor.

Un ejemplo de actividad de este tipo puede ser:

- «Dar una relación de las aplicaciones de la óptica que conozcas»

El objetivo de esta actividad es sensibilizar a los alumnos sobre la importancia de la óptica. Para ellos el término óptica está relacionado con gafas, prismáticos, cámaras fotográficas, etc., es decir,

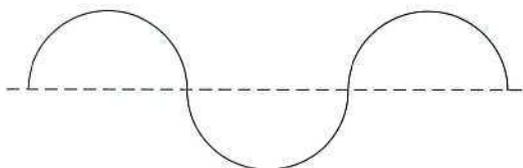
Orientaciones sobre estrategias didácticas

con los instrumentos ópticos. El profesor deberá ampliar esta visión presentando la óptica como el estudio de la luz y sus propiedades. Puede contribuir a aumentar la importancia del tema el señalar que más del 70% de la información proviene de la visión o la aparición de nuevas tecnologías basadas en el laser y la fibra óptica.

Actividades de desarrollo: construcción y manejo significativo de conceptos (introducción cualitativa de conceptos, invención de definiciones operativas basadas en ellos, manejo reiterado de los conceptos en distintas situaciones, para contrastar su validez y afianzarlos, etc.); familiarización con aspectos clave del trabajo científico al abordar problemas experimentales o de lápiz y papel (emisión de hipótesis, manejo de la literatura científica, elaboración de estrategias de resolución y de diseños experimentales, obtención de resultados, análisis e interpretación de los mismos); estudio de las relaciones CTS (aplicaciones tecnológicas, implicaciones sociales, toma de decisiones, etc.).

Este tipo de actividades constituyen la mayor parte y, por ello, presentaremos varios ejemplos:

- «Introducir las magnitudes necesarias para describir una onda superficial de un líquido cuya sección se adjunta»



- «Indicar, a título de hipótesis, de qué dependerá el período de oscilación T de un muelle. Diseñar y realizar una investigación para comprobarlo»
- «¿Cómo puede tener lugar la interacción de cargas distantes entre sí?»
- «¿Cuál será la velocidad de escape que habrá que comunicar a un satélite?»
- «Realiza un trabajo sobre los diferentes tipos de centrales eléctricas que conoces, explicando las posibles ventajas o inconvenientes que presenta cada una»

Aunque extraer las actividades de sus contextos y secuencia siempre las empobrece, pueden servir de ilustración. Así, la primera de ellas permite que el alumnado introduzca, de una forma cualitativa, una serie de conceptos (magnitudes) características de las ondas. El profesor completará las aportaciones de los alumnos introduciendo conceptos que no hayan aparecido, como el de frente de ondas. La segunda es un trabajo práctico planteado como una pequeña investigación que permite emitir hipótesis, diseñar experiencias para contrastarla, analizar los resultados obtenidos, etc.

La tercera permite, una vez se han mostrado las insuficiencias del concepto de fuerza newtoniana para describir las interacciones (son fuerzas a distancia e instantáneas) introducir cualitativamente el concepto de campo como soporte físico, material, a través del cual se transmiten las interacciones.

La cuarta actividad es un problema de lápiz y papel planteado como una pequeña investigación. Para ello se da un enunciado abierto (sin datos) o también pueden darse más datos de los estrictamente necesarios para resolverlos. Por otra parte hay que plantear problemas que no sean puramente académicos y tengan algún tipo de interés práctico, técnico, etc.

La última, es una actividad de relaciones CTS que permitirá hacer referencia a las formas convencionales y alternativas de producir corriente eléctrica, a su carácter centralizado o no, a su

impacto ambiental, etc. Conviene resaltar que el tipo de central responde a intereses empresariales evidentes, lo que permite explicar el bajo nivel de financiación de algunas energías alternativas, etc.

Actividades de acabado: recapitulación, elaboración de síntesis, esquemas, etc.; establecimiento de relaciones, semejanzas y diferencias; evaluación del aprendizaje realizado, interés por la tarea, etc.

- «Señalar alguno de los principales éxitos (incluyendo sus aplicaciones prácticas) de la física clásica, es decir, desde la época de Galileo a la de Maxwell»

Es una típica actividad de síntesis que conviene realizar al finalizar los temas de física clásica. Los estudiantes suelen realizar enumeraciones poco sistemáticas. Es necesario que el profesor las estructure y muestre el carácter de cuerpo coherente de conocimiento de la física, refiriéndose a cómo la mecánica acabó explicando los fenómenos caloríficos o la propagación del sonido y el electromagnetismo integrando la óptica.

El método de trabajo en el aula y el papel del profesor

Para la realización de estas actividades, es conveniente la estructuración en pequeños grupos porque favorece el nivel de participación y la creatividad necesarios para la emisión de hipótesis, realización de diseños, etc. Una forma eficaz de trabajo puede consistir en que tras la realización de cada actividad se produzca una puesta en común, que no debe emplear excesivo tiempo. Pueden utilizarse para ello diversas técnicas: una transcripción simultánea de las respuestas de los grupos en la pizarra; solicitar la respuesta de un sólo grupo, que los demás grupos critican o completan. Ello permite al profesor centrar las intervenciones, realizar reformulaciones globalizadoras de las aportaciones de los grupos o incluso —cuando estas sean incompletas— añadir información. Esto no supone una transgresión del método propuesto, el hecho de que los estudiantes hayan abordado previamente las cuestiones hace que su receptividad ante la información sea superior, por responder a cuestiones que ellos se han planteado.

Por ello, el propósito de los programas de actividades es evitar la tendencia espontánea a primar la actividad del profesor, es decir, a centrar el trabajo en clase en el discurso ordenado del profesor y en la asimilación de éste por los alumnos. Aunque no excluye las intervenciones del profesor ni tampoco que alguna actividad pueda consistir en escuchar una exposición del profesor o en la lectura de un texto (para extraer las ideas clave, comentar, etc). Lo esencial, repetimos, es primar la actividad de los alumnos, sin la cual no hay aprendizaje significativo.

Esta propuesta metodológica supone un nuevo papel del profesor, cuyas funciones (lo que debe saber y saber hacer) aumentan considerablemente. De un transmisor de conocimientos a un profesional con los conocimientos y recursos necesarios para diseñar y organizar actividades de aprendizaje y dirigir el trabajo de los alumnos, sin limitarlo a la mera asimilación de sus exposiciones ni renunciar a una acción orientadora (coherente con cualquier tarea colectiva de investigación). Para que esto sea posible, es necesario que las nuevas tareas sean incorporadas en materiales para el aula e introducidas en programas de formación en la práctica para profesores (Gil *et al* 1991).

Utilización de audiovisuales y ordenadores en el aula y laboratorio

A continuación, vamos a realizar unas consideraciones sobre la utilización de nuevas tecnologías (audiovisuales, ordenador) en el aula y laboratorio. Evidentemente hay que contar con ellas, pero con una actitud crítica, porque existe una gran presión del mercado y, por contra, aún no existe una suficiente investigación didáctica al respecto y tampoco la correspondiente formación del profesorado.

Audiovisuales

Respecto a los audiovisuales existen muchos (baste señalar las conocidas series «Cosmos» o «El universo mecánico»), sin embargo, no se pueden utilizar íntegramente en el aula (por ejemplo, algunos empiezan y acaban con clases magistrales del mejor estilo). De ellos podemos extraer fragmentos que sirvan para motivar al alumno, desarrollar actitudes críticas (Carl Sagan, por ejemplo, no se limita a presentar conocimientos, sino que transmite una nueva ética, un nuevo humanismo, basado en la racionalidad, el espíritu crítico y la idea de la nave espacial Tierra) o para visualizar fenómenos, experimentos o aplicaciones técnicas imposibles de mostrar en el aula (por ejemplo, la simulación de un viaje a velocidades próximas a las de la luz con una motocicleta en «Cosmos»). Aunque en esto hay que ser cuidadoso: no es conveniente sustituir una visita a una central eléctrica por un vídeo o tener en cuenta que situaciones como la caída vertical de graves, difícil de realizar y que, por ello, aconsejaba la utilización del vídeo, ahora se puede hacer sencillamente con un ordenador y los correspondientes sensores fotoeléctricos.

Ordenador

Respecto al ordenador la presión es aún mayor y se subraya su carácter motivador para los alumnos (¿para todos?). Por ello, conviene distinguir entre sus múltiples usos. En primer lugar, como auxiliar de la enseñanza, es decir, como medio audiovisual, tutorial y sistema evaluativo. Muchos de los primeros programas que se escribieron caen dentro de esta categoría y en la actualidad son bastante rechazados por su orientación marcadamente conductista. También es posible utilizarlo como lo hacen actualmente los científicos y técnicos, es decir, para tratar, representar y almacenar datos numéricos e información gráfica y textual, para almacenar y consultar documentación, para simular gráfica y numéricamente procesos y situaciones y para realizar experimentos (como aparato de medida y registro de datos), pero habría que analizar cada uno de los casos.

Respecto a las primeras aplicaciones (tratamiento de la información), es necesario que los alumnos tengan ciertas destrezas informáticas, destrezas que se considera que el alumno debe haber adquirido previamente. No se ve conveniente invertir tiempo de la clase de Física en enseñar dichas habilidades.

En cuanto a las simulaciones, tienen interés cuando permiten resolver problemas que no son abordables de otra forma (por ejemplo, la dispersión de partículas alfa por núcleos de Au), pero hay algunas tan triviales que es mucho mejor realizarlas en el laboratorio.

Por último, la utilización más interesante en estos momentos puede ser la experimentación o laboratorio asistido por ordenador (EXAO o LAO), dado que permite realizar multitud de experiencias con una relación calidad-precio muy favorable (una fuente de alimentación, un osciloscopio y unos polímetros pueden ser más caros y mucho menos versátiles). El problema es que los centros dispongan de las dotaciones necesarias y que se forme al profesorado para utilizarlas.

Orientaciones para la evaluación

Las innovaciones en el método, en los materiales, etc, perderán gran parte de su efectividad si no se reflejan en innovaciones similares en los sistemas de evaluación, dado que la evaluación es la forma más clara de mostrar a que se da importancia, y tiene enorme influencia en conformar la actividad de profesores y alumnos (Alonso, Gil y Martínez 1992).

Es necesario reflexionar sobre la función de la evaluación en el aprendizaje de la Física, pasando de concebirla como un medio de constatación de si los alumnos son capaces de reproducir las respuestas correctas a considerarlo como un instrumento para constatar el aprendizaje signi-

ficativo, el cambio conceptual, metodológico y actitudinal. En lo que concierne a este último, sólo recientemente se ha reconocido que los métodos de evaluación pueden afectar no sólo a la cantidad y a la calidad del aprendizaje de los estudiantes, sino también a sus intereses y actitudes hacia la Física y su aprendizaje. Y no sólo debe ser un buen instrumento de «medida» del aprendizaje, sino que además debe impulsar a los alumnos a un aprendizaje significativo.

Respecto a su papel de instrumento de constatación del aprendizaje, diversos estudios han puesto de manifiesto que muchas pruebas se limitan a medir el aprendizaje repetitivo a corto plazo, con énfasis en ejercicios o problemas de aplicación (directivos, con datos y condiciones dadas), en cuestiones de teoría memorísticas, en ejercicios de manejo operativo, etc.

Un ejemplo de ello puede ser:

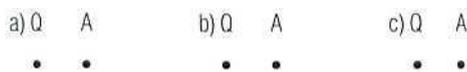
- «Conceptos de período y actividad de una muestra radiactiva»
- «En los vértices de un cuadrado se sitúan tres cargas puntuales de $10 \mu\text{C}$. Calcular la fuerza sobre una carga de $1 \mu\text{C}$ situada en el cuarto vértice»

Con ello se penaliza el aprendizaje significativo, se inhibe el desarrollo de otras destrezas en los alumnos y se orienta el método de enseñanza.

Para conseguir una medida más adecuada del aprendizaje significativo, las pruebas deberían incluir:

1. Actividades de introducción de conceptos, situaciones de cambio conceptual, utilización adecuada de los mismos en situaciones concretas, delimitación de su campo de validez, interpretación de constantes y magnitudes, analogías y diferencias, síntesis, etc.:

- «Dibuja el campo creado en el punto A por una carga de 2 C situada en el punto Q, en los 3 casos siguientes:
a) En A hay una carga $q=1 \mu\text{C}$; b) en A hay una carga $q=-1 \mu\text{C}$; c) en A no hay nada».



(Esta cuestión es preferible al enunciado anterior —el del cuadrado— porque permite comprobar si los alumnos han comprendido el concepto de campo, independiente de la carga testigo situada en A, y saben distinguirlo del concepto de fuerza. Por otra parte, es necesario ser cuidadosos con los enunciados para no dar al alumno la sensación de que las configuraciones de cargas son estables).

- «Elaborar un mapa conceptual de las principales relaciones y magnitudes introducidas para el estudio del campo eléctrico»
- «Señalar semejanzas y diferencias entre los campos eléctrico y magnético estáticos»

2. Actividades con énfasis en aspectos metodológicos; dada la dificultad de evaluar una pequeña investigación en una prueba escrita, es conveniente plantear actividades en las que se utilice sólo alguno de los procedimientos, por ejemplo, la formulación de hipótesis, la propuesta de diseños experimentales, análisis cualitativo de resultados (tablas, gráficas, ecuaciones), etc.

- «Emitir una hipótesis sobre los factores de que depende el campo magnético B creado por una corriente rectilínea de intensidad I en un punto A próximo a ella»
- «Para comprobar la hipótesis anterior se han determinado los valores de del campo magnético B creado por una corriente rectilínea en función de la distancia r (para I cte) y en función de la intensidad I (para r cte)

I (A)	B (10^{-6} T)	r (cm)	B (10^{-6} T)
0.5	0.65	5	4.0
0.8	1.04	10	2.0
1.2	1.56	15	1.2
1.8	2.34	25	0.8

Analizar los resultados y señalar si la hipótesis es correcta»

Otra forma importante de evaluar el aprendizaje de los procedimientos son las memorias de los trabajos prácticos, planteados como pequeñas investigaciones, que se hayan desarrollado a lo largo del curso. Es necesario entregar previamente a los alumnos un esquema de los aspectos procedimentales que se van a evaluar.

En cuanto a los problemas con enunciado abierto también permiten evaluar las destrezas metodológicas, aunque como su resolución necesita mucho tiempo, algunas veces se propone sólo una parte de los problemas, por ejemplo, el análisis de resultados:

- «Unos estudiantes al determinar la velocidad de escape de un satélite han obtenido el siguiente resultado $v^2 = 2GM / R$, siendo M la masa de la tierra y R el radio terrestre. Analiza dicho resultado»

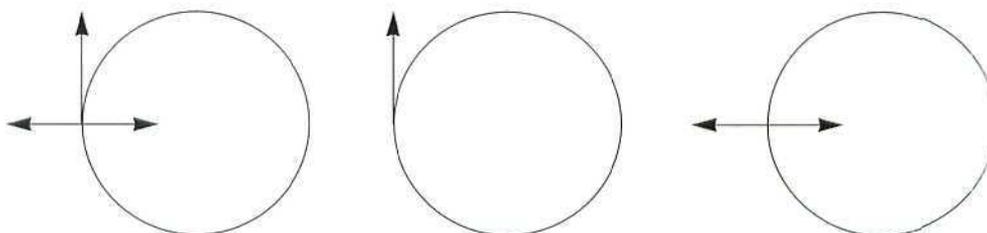
3. Actividades en las que surjan aspectos de las relaciones CTS.

- «La actual construcción de centrales nucleares provoca una gran oposición. Indicar las razones de ésta»
- «Enumerar progresos tecnológicos fruto de la física cuántica»

Por otra parte, para impulsar a los alumnos a un aprendizaje significativo es necesario que reconozcan y valoren sus avances, es decir, que tengan información comprensible y clara sobre lo que han aprendido y lo que no. Para ello, en el proyecto curricular, hay que indicar para cada tema o bloque niveles esperados de logro y asignar las «notas» o «grados» a dichos criterios o niveles de logro. Sólo así es posible valorar el éxito de los alumnos y del proyecto curricular.

Así mismo es necesario que los alumnos regulen sus propios procesos de aprendizaje, es decir, rectifiquen sus ideas iniciales, aprendan de sus propios errores. Esto supone que la evaluación debe realizarse a lo largo del período de aprendizaje y no sólo al final, lo que no equivale a una medición más frecuente para terminar dando una calificación por acumulación, sino en utilizar actividades de autorregulación a lo largo de un tema o, incluso, en la misma prueba (dándoles una interpretación incorrecta hecha por ellos mismos anteriormente y la ocasión de rectificarla y apreciar sus avances, dándoles la solución a mitad de la actividad, etc). Veamos un ejemplo:

- «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. Analiza sus respuestas y si no estás de acuerdo con ninguna de ellas propón otro dibujo»



Tampoco hay que olvidar el papel de la evaluación en la enseñanza de la Física, en la contrastación de sus resultados, sin la cual la labor educativa dejaría de ser revisable y mejorable. No se puede atribuir un fracaso generalizado en la evaluación de los alumnos únicamente a que «los alumnos no hacen nada». Por ello, la evaluación debe ser un instrumento válido para juzgar la efectividad de los materiales y métodos de enseñanza desarrollados y para decidir las modificaciones que son necesarias.

Para que esto sea posible es necesario que el equipo de profesores haya diseñado previamente el proyecto curricular y concretado las actividades que realizarán los alumnos y lo que se espera obtener de ellos (actitudes, niveles de logro, etc). Además, es necesario que se incluyan métodos y criterios para juzgar la efectividad de las actividades, del método de trabajo, del papel del profesor, de los materiales, etc. Todo esto permite comprobar si se han logrado los niveles de avance esperados, así como el diagnóstico de puntos débiles comunes a muchos alumnos (p. e., algún preconcepto no superado) y puntos débiles de los materiales o de la actuación de los profesores.

Estas y otras cuestiones deberían ser tenidas en cuenta por el equipo de profesores al elaborar sus pruebas de evaluación. Así mismo, la prueba externa de acceso a la Universidad debería tenerlos en cuenta para mantener una coherencia con este diseño curricular.



Programación

Cualquier propuesta de programación que intente desarrollar un diseño curricular debe tener en cuenta diversos criterios de tipo disciplinar, psicopedagógico y sociológico o, en otras palabras, debe desarrollarse según tres ejes básicos, la ciencia, el alumno y el contexto. Por ello la propuesta debe apoyarse en:

1. Un modelo didáctico, es decir, un modelo de enseñanza y aprendizaje de las ciencias teóricamente fundamentado, que debe tener en cuenta los tres ejes señalados. Algunas ideas de este modelo las hemos intentado desarrollar en el capítulo anterior, para apoyar las orientaciones metodológicas y de evaluación.
2. La estructura de la disciplina, pero también en la evolución histórica de los conceptos, en las dificultades que aparecieron; en la forma que los científicos abordan los problemas, en las características más notables del trabajo científico; en los desarrollos científicos recientes; etc.
3. Las características de los estudiantes, es decir, debe tener en cuenta las ideas previas de los alumnos, sus formas de razonamientos, sus intereses y actitudes, ya sea para apoyarse en ellos, ya sea para transformarlos.
4. Las interacciones ciencia, tecnología, sociedad y medio ambiente, es decir, en la relevancia social de los temas tratados.

En resumen, debe tener en cuenta que los contenidos deben ser conceptuales, procedimentales y de actitudes, y que no deben basarse sólo en la lógica de la disciplina, sino tener en cuenta las ideas de las alumnas y los alumnos, el modelo didáctico y las interacciones CTS.

Otros aspectos más concretos son:

La necesidad de que cualquier secuencia de contenidos tenga en hilo conductor que impida aprendizajes dispersos.

Así mismo, dado que la comprensión de los conocimientos científicos exige tiempo, tratamiento en profundidad, es necesario seleccionar los contenidos teniendo en cuenta el número de horas disponibles, sin pretender ver todo lo que es importante, pues ello conduce a tratamientos superficiales que deforman la imagen de la ciencia y no proporciona conocimientos durables. Es, por ello, conveniente que el número de temas de la programación no exceda los ocho para poder disponer, en promedio, de un tema por mes.

También es necesario tener en cuenta el nivel de conocimientos matemáticos del alumnado. Cabe suponerle familiarizado con el carácter vectorial de las magnitudes y con las razones trigonométricas básicas. Se pueden ahora introducir físicamente los conceptos de derivada e integral (este último para calcular el trabajo realizado por una fuerza variable que es función de r^2).

Esta asignatura es continuación de la Física estudiada el curso anterior que estuvo centrada en la mecánica de los objetos asimilables a puntos materiales y en una introducción de la electricidad (Hernández y Solbes 1992). Por esto, y por las razones expuestas en la Introducción, parece más conveniente optar por el enfoque allí propuesto. Comenzaremos así por completar la mecánica. Para ello trataremos primero la teoría de la gravitación universal, denominada así porque permitió unificar los fenómenos terrestres y celestes. Seguidamente introduciremos vibraciones y ondas en muelles, cuerdas, superficies de líquidos, acústicas, etc, para mostrar la potencia de la mecánica para explicar el comportamiento de la materia.

Sin embargo, pese a todos los esfuerzos de los físicos del siglo XIX, existe un vasto conjunto de fenómenos no reductible a explicaciones mecánicas. Abordaremos, por ello, el estudio de la óptica como un dominio inicialmente autónomo y mostrando las controversias entre la óptica geométrica y la ondulatoria. A continuación, se realiza un estudio de los campos eléctricos y magnéticos estáticos y de las fuerzas que aparecen sobre cargas o corrientes en su seno, pasando a explicar lo que sucede cuando dichos campos dependen del tiempo: inducción, ondas electromagnéticas e integración de la óptica en el electromagnetismo. Así, éste se convierte, junto a la mecánica, en el pilar fundamental del gran edificio teórico que se conoce como física clásica, cuyas repercusiones en todos los campos es preciso resaltar.

Pero a su vez, esta gran concepción del mundo no pudo explicar una serie de fenómenos y esto originó el surgimiento de la física moderna (relatividad, cuántica y sus aplicaciones).

De acuerdo con ello, las unidades didácticas de esta asignatura se podrían ajustar al siguiente esquema:

- 1.^a parte: *El triunfo de la mecánica*
 1. Interacción gravitatoria
 2. Vibraciones y ondas.
- 2.^a parte: *El poder unificador de la física: el electromagnetismo.*
 3. Óptica.
 4. Interacción electromagnética.
- 3.^a parte: *La crisis de la física clásica y el surgimiento de la física moderna.*
 5. Elementos de física relativista.
 6. Elementos de física cuántica.
 7. Física nuclear y de partículas.

1.^a parte: ***Interacción gravitatoria***

El triunfo de la mecánica

Objetivos didácticos

- Comprender que los conceptos, modelos o teorías de las ciencias físicas evolucionan, cambian con el tiempo.
- Comprender el papel que en la evolución de la ciencia tiene tanto la resolución de problemas dentro del marco de una teoría como las modificaciones que llevan a la sustitución de una teoría por otra.

- Aplicar el teorema de conservación del momento angular a un planeta del sistema solar.
- Comprender la ley de gravitación universal y su importancia en la unificación de las mecánicas terrestre y celeste.
- Utilizar el concepto de campo para superar las dificultades que plantea la interacción a distancia.
- Aplicar el principio de conservación de la energía a un satélite.

Ideas previas

Aunque ya hemos señalado en las «Orientaciones didácticas y para la evaluación» que no es conveniente iniciar cada tema con un cuestionario de ideas previas, también es cierto que, como hemos indicado al comienzo de esta programación, para realizarla es necesario tener en cuenta tres ejes, la propia física, el alumno y el contexto. En lo que concierne a los alumnos se han tenido en cuenta, entre otras cosas, las ideas previas que ha podido detectar la investigación didáctica.

En este tema se puede comprobar la persistencia de la ideas previas de la mecánica. Un ejemplo revelador serían las fuerzas que actúan sobre un satélite en movimiento alrededor de la Tierra. Así mismo, 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 mucha bibliografía y en ella podremos encontrar algunas ideas sobre gravitación (Driver *et al* 1989, Hierrezuelo y Montero 1989, Carrascosa y Gil 1992).

En Solbes y Martín (1991) se realiza un análisis sobre la enseñanza del concepto de campo en el que se detectan algunas ideas de los alumnos. No son capaces de distinguir entre las fuerzas y los campos; estos últimos aparecen como un mero artificio matemático y no adquieren 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.

En éste, como en los siguientes apartados, mencionaremos bibliografía de fácil acceso. En ella se pueden encontrar más referencias bibliográficas por si alguien desea profundizar en alguno de los temas.

Contenidos. Sugerencias de actividades

Se puede comenzar esta unidad mostrando los orígenes de la teoría la gravitación universal, es decir, viendo la evolución desde el modelo geocéntrico del mundo hasta los modelos de Copérnico y Kepler. Esta es una buena ocasión para realizar actividades de tipo histórico y de relaciones CTS que muestren como la teoría heliocéntrica no era coherente con los intereses e ideas de las clases dominantes de la sociedad y, por ello, los científicos que la apoyaron fueron objeto de múltiples presiones sociales.

A continuación se puede mostrar cómo el estudio dinámico de los movimientos curvilíneos se ve facilitado, como ya se vio en cinemática, por la introducción de nuevas magnitudes como el momento angular y el momento de la fuerza. La ecuación que las relaciona $\vec{M} = d\vec{L}/dt$, permite establecer la conservación del momento angular. Se puede demostrar que la ley de áreas es un caso particular de dicha conservación, lo que pone de manifiesto que las fuerzas que actúan sobre los planetas son centrales.

Esto plantea el problema de los factores de que dependerá la fuerza gravitatoria entre dos cuerpos, cuya solución llevó a Newton a establecer la ley de la gravitación, basándose en las leyes de

Kepler y realizando así la unificación de la mecánica terrestre y la celeste. Es conveniente destacar algunas consecuencias del trabajo de Newton (la determinación de la masa de algunos cuerpos celestes, la explicación de las mareas, la predicción de la existencia de planetas).

Las dificultades que supone la idea de una «acción a distancia» (de la cual ya era consciente el propio Newton) e «instantánea» conducen a la introducción del campo gravitatorio. Es necesario insistir en que el campo es un ente físico y no un mero artificio matemático para calcular la fuerza. Se puede estudiar el campo gravitatorio terrestre y diseñar una experiencia para determinarlo en las proximidades de la superficie terrestre. En concreto se puede realizar un trabajo práctico como pequeña investigación utilizando métodos indirectos para determinar g , siendo uno de los más sencillos el basado en el péndulo simple.

Se proseguirá planteando el problema de determinar el trabajo realizado por las fuerzas gravitatorias, lo que lleva a la introducción del concepto de energía potencial. Se debe relacionar ésta con la energía potencial en las proximidades de la superficie terrestre, vista en cursos anteriores. Es conveniente que los alumnos representen y analicen gráficas en este tema (por ejemplo, la energía potencial), para evitar que un instrumento tan importante para la física se limite a las gráficas de la cinemática. Por último, hay que introducir el concepto de potencial.

Finalmente se puede mostrar la contribución de la teoría de la gravitación al estudio de los movimientos de planetas y satélites, abordando problemas como la energía para poner un satélite en órbita o la determinación de la velocidad de escape.

Además de realizar una recapitulación que subraye la gran síntesis que supuso la ley de gravitación universal, junto con las leyes de la dinámica, son posibles muchas actividades complementarias como observaciones astronómicas, trabajos bibliográficos sobre el Universo, sobre la ingravidez, etc.

Distribución temporal

Si la duración del curso de Física es de 30 semanas, con cuatro horas semanales, disponemos de 120 horas. A este tema le podemos asignar unas 20 horas.

Evaluación

Como ya hemos señalado en las orientaciones para la evaluación, ésta debe incluir actividades de tipo conceptual, procedimental, de interacciones CTS, historia de la ciencia. Ante la dificultad al evaluar los contenidos procedimentales, ya señalamos la necesidad de valorar las memorias de las pequeñas investigaciones realizadas y de incluir en las pruebas escritas alguna actividad que permita comprobar si se domina una destreza determinada (emisión de hipótesis, análisis de resultados, diseño de experiencias, etc). Por ello sugerimos las siguientes actividades generales:

- Indicar los obstáculos que se opusieron al modelo heliocéntrico o las razones de aceptación del geocéntrico.
- Analizar la gráfica de la energía potencial terrestre, indicando los tipos de movimiento posibles de un satélite según su energía total.
- Utilizar la ley de gravitación para determinar la masa de algunos cuerpos celestes (estrellas con planetas, planetas con satélites, etc.).
- Determinar la energía de un satélite en una órbita geostacionaria.
- Valorar el informe de algún 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.

Vibraciones y ondas

Objetivos didácticos

- Comprender el movimiento vibratorio y cómo su propagación en un medio origina ondas.
- Resolver problemas de determinación de las magnitudes características de una onda a partir de su ecuación y viceversa.
- Comprender las principales propiedades de las ondas: amortiguamiento, interferencia, difracción, reflexión y refracción.
- Valorar la potencia del modelo de onda para explicar diversos fenómenos cotidianos, desde el eco a la contaminación acústica.

Ideas previas

En este tema la bibliografía es muy escasa. En las recopilaciones sobre mecánica aparecen pre-concepciones 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 ideas de que las fuentes parecen comunicar «algo» (una fuerza, etc.) a la cuerda.

Contenidos. Sugerencias de actividades

Será necesario comenzar planteando el problema de cuáles son las magnitudes necesarias para describir el movimiento vibratorio más sencillo, el movimiento armónico simple (MAS), por ejemplo, de un cuerpo unido a un muelle, así como la ecuación que rige su dinámica. Dado que la obtención de la ecuación de movimiento del MAS es compleja, se puede recurrir a métodos intuitivos (a partir del movimiento circular, considerando que el seno y el coseno son las únicas funciones cuya derivada segunda es proporcional y de signo contrario a la propia función).

Una actividad que conviene realizar es el diseño y realización de una experimento para estudiar la vibración de un muelle, determinando de qué factores depende su período de oscilación.

A continuación los estudiantes producirán ondas en muelles y cuerdas, ondas superficiales en los líquidos, ondas sonoras, etc. Esto plantea los problemas de cómo se producen y cómo se propagan dichas ondas, lo que nos llevará a construir un modelo sobre la naturaleza del movimiento ondulatorio (una vibración que se propaga en un medio). Este modelo permite distinguir entre ondas longitudinales y transversales, razonar que se propaga, introducir a título de hipótesis las magnitudes que caracterizan una onda, mostrar la influencia del medio en la velocidad de propagación, etc.

Se señalará que este modelo permitió incorporar a la mecánica los movimientos sin desplazamiento neto de materia y que los conceptos y propiedades introducidos serán utilizados en óptica y en física cuántica.

A continuación, se plantea el problema de obtener la ecuación del movimiento ondulatorio para el caso de las ondas armónicas planas, viendo cómo se propaga el movimiento armónico simple del foco por el medio.

Se proseguirá con el estudio de las propiedades de las ondas, en particular:

- La transmisión de la energía a través de un medio, mostrando el carácter deslocalizado (distribuida por todo el frente de onda) y continuo de la energía, estudiando de qué depende la

intensidad de la onda (se facilita así la comprensión del efecto fotoeléctrico). Una imagen más real de la propagación de la onda se consigue resaltando su amortiguamiento debido a la atenuación de las ondas esféricas, a la absorción de la intensidad por el medio, etc.

- La difracción, sobre la que se puede realizar un tratamiento cualitativo mediante el principio de Huygens-Fresnel.
- La interferencia que junto a la difracción es una propiedad característica de las ondas que permite decidir sobre la naturaleza corpuscular u ondulatoria de las radiaciones. Se puede introducir cuantitativamente la condición de interferencia constructiva y destructiva para el caso de dos ondas coherentes.
- La reflexión y la refracción, cuyas leyes se pueden justificar a partir del principio de Huygens.
- Las ondas estacionarias, fenómeno con importantes aplicaciones (instrumentos musicales, resonancia...) y con implicaciones en el surgimiento de las concepciones de la física cuántica.
- Opcionalmente, también se pueden abordar otras propiedades como el efecto Doppler dada su importancia para comprender las teorías actuales sobre el origen del Universo.

La utilización de la cubeta de ondas para estudiar la interferencia, la difracción, la reflexión, la refracción, etc., es básica para la visualización de estas propiedades de las ondas. Sin ella es difícil que los alumnos puedan comprenderlas.

Otras actividades de interés para los alumnos pueden ser el estudio de: la contaminación sonora, sus fuentes y efectos, comparar los niveles de intensidad sonora a los que se está expuesto a lo largo de un día con las recomendaciones de los expertos (50–55 dB diurnos y 30–35 dB nocturnos), el eco, el amortiguamiento acústico y, por tanto, las formas de combatir la contaminación sonora, (García 1989), las ondas sísmicas S (transversales) y P (longitudinales).

Distribución temporal

Se le podrían asignar unas 18 horas. Con ello la primera parte dispondría de unas 38 horas, es decir, casi un tercio del tiempo total disponible.

Evaluación

Se pueden sugerir actividades generales como:

- Obtener la amplitud, frecuencia, longitud de onda, etc., a partir de la ecuación de ondas.
- Asociar dichas magnitudes a su percepción sensorial (frecuencias bajas y altas a sonidos graves o agudos, la amplitud con la intensidad, etc.).
- Deducir la ecuación de ondas a partir de las magnitudes que caracterizan el movimiento ondulatorio.
- Representar gráficamente (mediante frentes de onda, rayos, etc) diversos fenómenos (reflexión, refracción, interferencias, difracción).
- Indicar posibles soluciones a la contaminación acústica.
- Recapitular las propiedades características de las ondas diferenciadoras de las de haces de partículas.
- Valorar la memoria del trabajo práctico realizado como una pequeña investigación, por ejemplo, el estudio del período de oscilación de un muelle.
- Señalar, a título de hipótesis, de qué dependerá la variación de la intensidad de una onda al atravesar un medio.

Óptica

Objetivos didácticos

- Identificar la existencia de diversos modelos para explicar la naturaleza de la luz, viendo las razones que llevaron a su aceptación.
- Explicar las propiedades de la luz, utilizando los diversos modelos.
- Comprender el mecanismo de la visión, tanto de imágenes como de colores.
- Valorar las múltiples aplicaciones de la óptica.

Ideas previas

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 con alumnos de 10 a 15 años y 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) y para más bibliografía remitimos a la reseña de Perales y Nienas (1987). En nuestro país la investigación es muy escasa.

En un trabajo reciente Solbes y Zacarés (1993) realizan un análisis sobre la enseñanza usual de la óptica que se caracteriza por: no tener en cuenta las múltiples preconcepciones de los alumnos; dar más importancia a ciertas expresiones matemáticas que a la comprensión de los conceptos sobre la luz, sus interacciones con la materia y, en particular, la visión de los objetos; no clarificar la relación entre los diferentes modelos sobre la luz, sus límites y diferencias; no tener en cuenta las múltiples aplicaciones de la óptica y sus implicaciones en la sociedad. Se constata así mismo la persistencia en alumnos de 15 a 18 años de ideas previas. Entre ellas señalaremos que confunden fuentes y luz, limitan el alcance de la luz a sus efectos visibles, consideran que la luz se ve, restringen 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.

Contenidos. Sugerencias de actividades

Proponemos un estudio de la óptica como un campo inicialmente autónomo, rehaciendo en cierto modo el proceso que llevó a su integración en el electromagnetismo.

Dado que la óptica sólo se ha introducido de forma elemental en la Educación Secundaria Obligatoria, se puede por ello iniciar la unidad planteando a los estudiantes los siguientes problemas: cómo se produce la luz, cómo permite ver los objetos, si se trata de ondas o partículas, etc. Al resolverlos, expresarán sus concepciones sobre la luz. Estas ideas pueden ser debatidas y completadas con referencias a la larga controversia histórica sobre la naturaleza de la luz, desde los griegos a Descartes, Newton y Huygens. Se puede mostrar cómo el prestigio de Newton hizo que la teoría corpuscular prevaleciese sobre la ondulatoria hasta principios del siglo XIX, pese a la existencia de experiencias en contra (la difracción descubierta por Grimaldi a mediados del XVII, las interferencias en lentes delgadas descubiertas por el propio Newton).

A continuación, se trataría la dirección y velocidad de propagación de la luz en un medio. La propagación rectilínea y la velocidad de la luz son aspectos conocidos por los alumnos y por ello es

2.ª parte:
El poder
unificador
de la física:
el electro-
magnetismo

más interesante pedirles que sugieran múltiples diseños que permitan comprobarlos. La construcción de una cámara oscura es una actividad muy conveniente porque permite comprobar la propagación rectilínea y además comprender un aspecto esencial de la visión: para que se forme la imagen es necesario que a cada punto de la pantalla sólo llegue luz proveniente de un punto del objeto. Se puede pedir a los alumnos que expliquen fenómenos como la formación de sombras y penumbras y los eclipses.

A continuación se estudiarán algunos fenómenos relacionados con el paso de la luz de un medio a otro: la reflexión y la refracción.

Respecto a la reflexión se puede realizar una pequeña investigación experimental y mostrar que tanto la teoría corpuscular como ondulatoria la pueden explicar. Por otra parte, no hay que limitarse a estudiar sólo la dirigida. Es necesario abordar también la difusa, de tanta importancia para comprender la visión de los objetos no luminosos (se les puede pedir a los estudiantes que expliquen cómo ven los objetos no luminosos, por ejemplo, la pizarra). Por último, conviene abordar la formación de imágenes en espejos planos y curvos, insistiendo en su manejo (no existen problemas de material, una cuchara pulida puede servir de espejo cóncavo y convexo) y sin limitarse a actividades de trazado de rayos.

En la refracción los alumnos también pueden realizar otro trabajo práctico. Así mismo, conviene mostrar que la refracción se puede explicar con ambos modelos, pero el modelo corpuscular predice que la luz se mueve más rápidamente en otro medio (como el agua) que en el aire, al contrario que el ondulatorio. Pero esta predicción no se pudo contrastar, porque no fue posible medir la velocidad de la luz en el agua hasta 1850. Puede tener interés realizar alguna actividad sobre la reflexión total, determinando el ángulo límite e indicando sus aplicaciones (en las fibras ópticas, gemelos binoculares, etc). Se puede proseguir con formación de imágenes en lentes delgadas, insistiendo en su manejo (lupas) y sin limitarse a actividades de lápiz y papel.

Estas ideas de óptica geométrica en espejos y lentes facilitan la comprensión de la visión y permiten tratar algún sistema óptico (ojos, gafas, cámaras fotográficas, proyector de diapositivas, retroproyector, etc), como aplicación y verificación de estas leyes. Así mismo se puede abordar el problema de los defectos del ojo y del tipo de lente adecuado para corregirlos.

Unas experiencias cualitativas de los fenómenos de difracción e interferencias, análogas a las realizadas por Young y Fresnel a comienzos del siglo XIX, ayudan a comprender cómo éstos dieron fin (¡provisionalmente!) al debate onda/corpusculo.

Se puede finalizar con el estudio de la dispersión y el espectro visible, viendo sus aplicaciones en la espectroscopía (si se ha estudiado el efecto Doppler en el tema anterior se puede explicar el corrimiento al rojo de los espectros de las galaxias). Para explicar la visión del color, hay que distinguir entre los objetos que emiten luz (como la TV), en los que se produce mezcla aditiva, y los que no emiten, en los cuales los colores se forman sustractivamente, por absorción selectiva de determinadas bandas y la reflexión difusa de los colores complementarios.

Como hemos visto, el tema en conjunto permite un tratamiento muy diversificado, incluyendo pequeñas investigaciones experimentales sobre la reflexión y la refracción, estudios cualitativos sobre interferencias, diseño y construcción de instrumentos (cámara oscura, periscopio, telescopio de Galileo...), debates a partir de las concepciones intuitivas de los alumnos, etc.

Distribución temporal

Se le pueden asignar 16 horas, dado que la comprensión de las propiedades ondulatorias de la luz se verá notablemente facilitada por la unidad didáctica anterior de Vibraciones y Ondas.

Evaluación

- Indicar las razones a favor y en contra del modelo corpuscular.
- Identificar las leyes ópticas subyacentes a fenómenos cotidianos como la formación de sombras, eclipses, espejismos, arco iris, etc.
- Explicar la formación de imágenes en dispositivos ópticos sencillos: espejos planos y curvos, lentes delgadas, cámara fotográfica, microscopio.
- Justificar la visión de colores cotidianos, es decir, por qué el carbón es negro, la sangre roja, la hierba verde.
- Valorar los informes de las pequeñas investigaciones realizadas sobre reflexión y refracción.

Interacción electromagnética

Objetivos didácticos

- Utilizar el concepto de campo para superar las dificultades que plantea la interacción a distancia e instantánea entre cargas.
- Determinar el campo 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.
- Explicar la producción de corriente eléctrica mediante variaciones del campo magnético.
- Comprender algunos aspectos de la síntesis de Maxwell: el campo electromagnético, la predicción de ondas electromagnéticas y la integración de la óptica.

Ideas previas

En electricidad y magnetismo existe una abundante bibliografía de ideas previas y formas de razonamiento en corriente eléctrica (Driver *et al* 1989 y Hierrezuelo y Montero 1989). En otros aspectos es escasa.

En este tema, como en los siguientes, las experiencias previas de los alumnos son escasas. 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 masas (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 (supera los problemas que plantea el concepto de fuerza y explica los fenómenos electromagnéticos: inducción, ondas).

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 donde hay magnetismo). 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 tal 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. Otro error en el que incurrir incluso alumnos de 2º de Físicas es afirmar que las partículas cargadas colocadas en campos magnéticos se ven sometidas a fuerzas independientemente de su estado de movimiento (Solbes *et al* 1988).

Contenidos. Sugerencias de actividades

Una breve revisión de la fenomenología de la electrización y de la ley de Coulomb, vistas en cursos anteriores, permite establecer dos hechos básicos: la existencia de cargas eléctricas (y su conservación) y de interacciones entre ellas.

El problema de cómo explicar la interacción de cargas distantes entre sí conduce a los alumnos, al igual que en gravitación, a introducir el concepto de campo eléctrico, que se calculará, en general, para una o varias cargas puntuales (para introducir el principio de superposición).

El típico problema de determinar el campo creado por cargas puntuales es más conveniente plantearlo en situaciones realistas en las que aparezcan ligaduras mecánicas, por ejemplo, dos péndulos electrostáticos. Es conveniente que los alumnos tracen líneas de campo de una carga, un dipolo y placas planas cargadas y si el centro dispone de un generador de Van der Graaf que las visualicen.

A continuación se abordará la fuerza de un campo eléctrico uniforme sobre una carga, planteándoles a los estudiantes el problema de los tipos de movimiento que llevará dicha carga si el campo eléctrico tiene la misma dirección que la velocidad o si es perpendicular a ésta, así como las ecuaciones que los describirán. Este tipo de actividades tienen un interés doble: sus aplicaciones prácticas en tubos de rayos catódicos y algunos aceleradores o detectores de partículas, y revisar el movimiento rectilíneo uniformemente acelerado y el tiro horizontal, vistos el curso anterior, en un contexto diferente, lo que debe favorecer un aprendizaje más significativo.

La electrostática puede finalizar con el estudio energético de la interacción eléctrica, que permite introducir los conceptos de energía potencial eléctrica, de potencial eléctrico y de diferencia de potencial. Esto nos permite mostrar, además, el carácter conservativo del campo eléctrico.

Una revisión de la semejanzas y diferencias entre los fenómenos eléctricos y magnéticos, conduce al problema de intentar establecer una relación entre ambos. Conviene plantear a los alumnos esta búsqueda como una investigación, que les permita comprobar que no se produce ninguna interacción cuando se utilizan cargas e imanes en reposo y la efectividad de experiencias similares a las de Oersted. La evidencia de la interacción entre imanes y corrientes plantea nuevos problemas que se convierten en hilo conductor para el resto del tema:

- El *primer problema* es la determinación del campo magnético producido por cargas en movimiento. Se puede pedir a los alumnos que indiquen, a título de hipótesis, de qué factores depende la intensidad del campo magnético creado por una corriente rectilínea indefinida y que lo comprueben experimentalmente de forma cualitativa, visualizando las líneas de campo alrededor de la corriente. También se puede estudiar el campo magnético de un solenoide en su interior, por su importancia práctica (electroimanes y sus múltiples aplicaciones en altavoces, timbres, etc).
- El *segundo problema* es el estudio de las fuerzas entre cargas móviles y campos magnéticos. La visualización de algunas trayectorias de partículas cargadas en el seno de campos

magnéticos constantes permitirá plantear a los alumnos de qué dependerá la fuerza que ejerce el campo sobre la carga en movimiento, lo que conduce a la ley de Lorentz. Se puede aplicar al estudio del movimiento circular de cargas en el seno campos magnéticos, utilizados en los espectrógrafos de masas y algunos aceleradores y detectores, planteándoles a los estudiantes que determinen el radio de la circunferencia.

- A partir de la ley de Lorentz también se puede determinar la fuerza sobre una corriente rectilínea e indefinida, cuyo interés reside en el hecho de que las fuerzas entre corrientes rectilíneas indefinidas permiten definir el Amperio. Por último, se pueden introducir experimentalmente las fuerzas sobre una espira (de gran interés por sus aplicaciones; motores eléctricos, instrumentos de medida de corrientes).
- El *tercer problema* es la explicación del magnetismo de los imanes. Dada la complejidad del tema, en este nivel basta con la hipótesis, ya avanzada por Ampère en el siglo XIX, de que dicho magnetismo es debido a corrientes (atómicas).
- El *cuarto problema* es la producción de corriente mediante imanes (campos magnéticos). Es necesario que los alumnos se planteen, a título de hipótesis, en qué condiciones cabe esperar que un campo magnético produzca corrientes en un conductor y que realicen experiencias que pongan de manifiesto la inducción electromagnética. El concepto de flujo, introducido como el número de líneas de fuerza que atraviesa una superficie dada, nos permite realizar un estudio cuantitativo de la ley de Faraday y Henry, aplicándola a diversos casos, en particular, a una espira que gira en un campo magnético constante, lo que origina una corriente alterna y muestra la importancia de las aplicaciones de la inducción electromagnética.

Para que el campo no aparezca como un mero artificio matemático es conveniente no limitarse sólo a situaciones que puedan ser explicadas mediante fuerzas (como de hecho sucedió históricamente) y abordar situaciones en las que los campos varían con el tiempo. Para ello hay que mostrar cómo la ley de Faraday pone de manifiesto que un campo magnético variable con el tiempo engendra un campo eléctrico y, por tanto, que es necesario realizar algunas modificaciones en las leyes para campos estáticos. Se puede justificar así la idea de que los campos eléctricos variables con el tiempo engendran campos magnéticos. Esto facilita la comprensión cualitativa de la síntesis de Maxwell: los campos eléctrico y magnético están íntimamente asociados, constituyendo el campo electromagnético, que se puede propagar en forma de onda por el espacio. Se les puede pedir a los alumnos que calculen la velocidad de las ondas electromagnéticas a partir de la constante dieléctrica y la permeabilidad del vacío, encontrando que ésta es c , lo que sugiere que la luz es una onda electromagnética.

Se puede finalizar refiriendo las experiencias de detección de ondas electromagnéticas de Hertz, con la «anomalía» (efecto fotoeléctrico) que observó, y presentando el espectro electromagnético, sus fuentes y aplicaciones.

Todo ello puede facilitar la comprensión de analogías y diferencias entre dos campos conservativos como el gravitatorio y el eléctrico, y entre uno conservativo y otro que no lo es, el magnético.

También tiene gran interés resaltar el gran desarrollo científico y técnico que implica este tema: la posibilidad de producir, transmitir y utilizar la energía eléctrica con generadores y motores, el campo de aplicaciones que abrió la producción de ondas electromagnéticas (radio, radar, TV...). La importancia de estos aspectos recomienda evitar un tratamiento puramente escolar de los mismos, introduciendo actividades de manejo (o, incluso de construcción, si hay alumnos y profesores interesados) de generadores, motores, emisores y detectores de ondas, el análisis crítico de la producción y consumo de energía eléctrica en nuestro país, los problemas que las centrales producen en el medio ambiente, visitas a centrales, etc.

Distribución temporal

Se le puede asignar unas 28 horas, dado que la comprensión del concepto de campo eléctrico y magnético así como el manejo formal del campo, energía potencial y potencial eléctricos se ven facilitados por el estudio de la unidad didáctica 1.

Con esto, la 2ª parte dispondrá de unas 44 horas semanales, es decir, otro tercio del tiempo disponible (exactamente, 4 horas más).

Evaluación

Se pueden realizar las siguientes actividades:

- 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.
- Diseñar una experiencia para producir corriente inducida.
- Determinar el sentido de la corriente inducida en diversos dispositivos.
- Realizar esquemas de cualquier central eléctrica, comprendiendo que la única diferencia entre ellas es la fuente de energía que se utiliza para mover el alternador.
- Valorar ventajas e inconvenientes de distintas fuentes (renovables o no, descentralizadas o no, etc.) para obtener energía eléctrica.
- Enumerar aplicaciones de la electricidad, el magnetismo, y las ondas electromagnéticas.
- Valorar los informes sobre las diversas experiencias realizadas en este tema (Oersted, Faraday, etc.).

3.ª parte: La crisis de la física clásica y el surgimiento de la física moderna

Se puede iniciar esta parte pidiéndoles a los estudiantes que realicen una síntesis de la física clásica vista hasta aquí. Se puede seguir mostrando la imagen del comportamiento de la materia que proporciona la física clásica y viendo cómo había surgido contra una concepción, la física pregalileana, que se había mostrado incapaz de resolver importantes problemas del comportamiento de la materia. Esto permite romper con una imagen lineal del crecimiento de la ciencia y mostrar como, análogamente, una serie de dificultades insuperables originaron la crisis de la física clásica, en particular, la inestabilidad del átomo de Rutherford y los espectros (vistas en Química) y el efecto fotoeléctrico (mencionado al final del tema anterior). A esto es necesario dedicarle por lo menos una hora.

Elementos de física relativista

Objetivos didácticos

- Comprender que la física clásica no puede explicar una serie de fenómenos como el incumplimiento del principio de relatividad de Galileo por la luz o la existencia de una velocidad límite.

- Comprender los postulados de la relatividad de Einstein y cómo resuelven los problemas anteriores.
- Utilizar los principios de 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.

Ideas alternativas

En Posner *et al* (1982) y Hewson (1982) se muestra cómo alumnos y profesores 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.

En nuestro país 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 y 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 2º de Físicas, un 20% de los cuales señala que la velocidad de los electrones no influye en la trayectoria (Solbes *et al* 1988).

Contenidos. Sugerencias de actividades

Se puede empezar viendo uno de los problemas que originaron la crisis de la física clásica: el fracaso en la búsqueda de un sistema de referencia en reposo absoluto, cuya existencia es un pre-concepto muy frecuente de los alumnos.

Se puede plantear a los alumnos el problema de si existe alguna diferencia entre fenómenos mecánicos en un tren en movimiento uniforme vistos por un observador en el tren y otro en la estación. Algunos estudiantes, como Simplicio, piensan que sí y por ello es necesario insistir en que dichos fenómenos no permiten distinguir si un sistema de referencia dado se encuentra en reposo o en movimiento uniforme, resultado que se conoce como principio de relatividad de Galileo. Es conveniente, y muy sencillo para los alumnos, obtener las transformaciones de Galileo para un sistema de referencia que se desplaza a lo largo del eje X.

Se trata de ver si otro tipo de fenómenos permiten establecer esas diferencias entre dichos sistemas. Así, por ejemplo, podemos pedir a los estudiantes que calculen el tiempo que tarda la luz en atravesar un vagón en movimiento. Según las transformaciones de la velocidad de Galileo dependerá de la dirección de la luz. Sin embargo, la experiencia contradice este resultado. Ésta fue la idea subyacente a la experiencia de Michelson y Morley, que no es nada aconsejable introducir por su complejidad.

Este fracaso condujo a Einstein a criticar los supuestos básicos de la física newtoniana y al establecimiento de los postulados de la relatividad especial.

Se puede proseguir mostrando algunas implicaciones de la física relativista sin necesidad de introducir las transformaciones de Lorentz. Por ejemplo, la dilatación del tiempo se puede introducir

mediante el «reloj de luz» (un cilindro en cuya base inferior se emite luz). Las distancias recorridas por la luz respecto a un observador O que permanece en reposo y otro O' ligado al cilindro dan un triángulo rectángulo. Aplicando el teorema de Pitágoras los estudiantes pueden obtener fácilmente la relación entre los tiempos. Apoyándonos en estas consideraciones, se puede introducir así mismo la contracción de la longitud. La variación de la masa con la velocidad y la equivalencia masa-energía se pueden introducir a partir de experiencias (p.e., la de Bertozzi). Es conveniente recalcar, utilizando las palabras del propio Einstein, que «la masa de un sistema puede considerarse como una medida de su energía. La ley de conservación de la masa equivale a la ley de conservación de la energía». En otras palabras, así como el calor y la energía son dos magnitudes equivalentes, también lo son la masa y la energía. Por otra parte, la variación de la masa con la velocidad se puede interpretar como una variación de la masa que tiene lugar al comunicar energía cinética al cuerpo o , lo que es equivalente, $E_c = mc^2 - m_0c^2$.

La generalización de la teoría de la relatividad a sistemas de referencias no inerciales (la relatividad general) es más difícil de formular, sin embargo, por su importancia se pueden hacer unas breves consideraciones sobre el principio de equivalencia.

Conviene finalizar con aspectos de las relaciones ciencia—sociedad en conexión con la relatividad, por ejemplo, su influencia en el pensamiento contemporáneo, la visita de Einstein a España y la situación de la física en nuestro país en esa época, etc.

Distribución temporal

A esta Unidad didáctica le podemos asignar unas nueve horas.

Evaluación

- Calcular el período de semidesintegración o la masa de una partícula con velocidades próximas a las de la luz, comparándolas con las que tendría en reposo.
- Utilizar la equivalencia-masa energía para determinar la energía que se libera en una reacción nuclear o química.
- Señalar los límites de validez de la física clásica que pone de manifiesto la física relativista.
- Indicar las diferencias más notables entre mecánica clásica y mecánica relativista.
- Señalar implicaciones de la teoría de la relatividad en la filosofía, en el arte, etc.

Elementos de física cuántica

Objetivos didácticos

- Comprender que la física clásica no puede explicar una serie de experiencias como el efecto fotoeléctrico, los espectros discontinuos, la difracción de electrones, etc.
- 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.
- Comprender que los electrones, fotones, etc, no son ni ondas ni partículas clásicas sino objetos nuevos con un comportamiento nuevo
- 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.

Ideas alternativas

En los textos de BUP y COU analizados es común considerar al electrón como una onda o como una partícula. Otros (en los que también se incluyen algunos textos de Física y de Química de primero 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 tipo nuevo. En cuanto a las relaciones de indeterminación, alguno parece atribuirla a una falta de precisión de los instrumentos y en 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 y 1989).

Alumnos de 3.º 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 y 1989).

Estas ideas persisten en alumnos de 2.º de Físicas. Un 10.1% considera que el electrón es un corpúsculo y un 3.1% lo considera 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).

Contenidos. Sugerencias de actividades

Es conveniente comenzar abordando el problema del efecto fotoeléctrico haciendo que los estudiantes comparen las predicciones de la física clásica con los resultados experimentales y vean que son incompatibles. Estos resultados sólo se pueden explicar si se considera que la luz, un fenómeno clásicamente ondulatorio, manifiesta propiedades corpusculares, es decir, está constituida por fotones de energía $E=h\nu$. El principio de conservación de la energía permite a los alumnos obtener fácilmente la ecuación del efecto fotoeléctrico.

Así mismo, la física clásica no puede explicar los espectros discontinuos ni la estabilidad del modelo atómico de Rutherford. Se les puede plantear a los alumnos cómo los postulados «ad hoc» de Bohr resuelven dichos problemas y utilizan la relación $E_1-E_2=h\nu$ para explicar los espectros de emisión y absorción. Las ideas de Bohr confirman la potencia del concepto de fotón y muestran el carácter cuantizado de algunas magnitudes (la energía, el momento angular) en sistemas atómicos. No es conveniente realizar los cálculos del radio o energía de las órbitas, por no insistir en ese concepto y no ocupar un tiempo excesivo.

A continuación, se puede presentar como la hipótesis de De Broglie y su confirmación experimental muestran que los electrones, protones, etc, inicialmente clasificados como partículas manifiestan un comportamiento ondulatorio. Los esfuerzos para resolver estas paradojas deben llevar a los alumnos al convencimiento de que los electrones, fotones, etc, no son ni ondas ni partículas clásicas y deben ser concebidos como objetos nuevos con un comportamiento nuevo, el comportamiento cuántico.

Seguidamente se pueden introducir las relaciones de indeterminación, deteniéndose en su interpretación y saliendo al paso de posibles errores conceptuales. Llegados a este punto, es positivo, aunque de forma opcional que los alumnos realicen cálculos de órdenes de magnitud con las relaciones de De Broglie y de Heisenberg, para familiarizarse con los límites de validez de la física clásica.

A modo de recapitulación, se puede mostrar cómo el hecho de que los fotones, electrones, etc, no sean ni ondas ni partículas clásicas impide que sean descritos mediante teorías clásicas (ecuación de Newton, ecuación de ondas) y hace necesario un modelo más general para describir su comportamiento, algunas de cuyas relaciones (Planck, De Broglie, Bohr) ya se han introducido. Para completar este modelo se puede hacer referencia, opcionalmente, a la función de onda y su interpretación probabilística, que se puede introducir fácilmente teniendo en cuenta que la intensidad de una onda luminosa es proporcional al cuadrado de la amplitud (del campo eléctrico) y que, según Einstein, es proporcional al número de fotones; por tanto, la amplitud al cuadrado es proporcional al número de fotones.

Para finalizar, los alumnos deben realizar actividades sobre los límites de validez de la física clásica, sus diferencias respecto a la cuántica, así como el importante desarrollo científico y técnico que supuso la física moderna, sus múltiples aplicaciones, entre las que cabe mencionar la célula fotoeléctrica, el microscopio electrónico, la creación de nuevos materiales, el estado sólido (base de la electrónica y, por tanto, de las telecomunicaciones, robótica, informática), la física nuclear (con bombas, centrales, medicina nuclear), la búsqueda de los componentes últimos —las partículas e interacciones fundamentales— y la astrofísica y cosmología, que han permitido la comprensión de la evolución de las estrellas y el origen del universo. Puesto que la física nuclear será objeto del próximo tema convendría reflexionar sobre las implicaciones sociales de la microelectrónica y sus tecnologías asociadas (opcional).

Distribución temporal

Le podemos asignar unas trece horas.

Evaluación

- Utilizar el principio de conservación de la energía para explicar el efecto fotoeléctrico, la emisión y absorción de los átomos.
- Determinar la longitud de onda de protones, electrones, etc., dada la diferencia de potencial a la que están sometidos o su energía cinética.
- Aplicar las relaciones de indeterminación o de De Broglie para explicar el comportamiento cuántico de los electrones, fotones, etc.
- Señalar los límites de validez de la física clásica que pone de manifiesto la física cuántica.
- Indicar las diferencias más notables entre física clásica y física cuántica.
- Enumerar alguno de los múltiples desarrollos teóricos y prácticos, fruto de la física cuántica.

Física nuclear y de partículas

Objetivos didácticos

- Comprender la necesidad de una nueva interacción para justificar la estabilidad nuclear.
- Aplicar la equivalencia masa-energía a la determinación de energía de ligadura de los núcleos.

- Utilizar las leyes de conservación del número atómico y másico y de la energía a las reacciones nucleares y la radiactividad.
- Valorar la importancia social de temas como la contaminación radiactiva, las bombas y reactores nucleares, los isótopos y sus aplicaciones.
- Comprender algunas implicaciones de los descubrimientos de nuevas partículas: existencia de antimateria, interacciones como intercambio de partículas.

Ideas alternativas

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 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 las ideas extraescolares de los alumnos sobre radiactividad (De Posada y Prieto 1990).

Contenidos. Sugerencias de actividades

El estudio de cualquiera de los dominios señalados al final del tema anterior es interesante, pero optamos por abordar uno de ellos que, por su importancia, ha llegado a denominar el tiempo que estamos viviendo: la física nuclear (era atómica).

Se puede iniciar este estudio con el descubrimiento de la radiactividad, las primeras ideas sobre la composición del núcleo (formado por partículas alfa, por protones y electrones) y el descubrimiento del neutrón que lleva a un nuevo modelo de composición nuclear, al concepto de isótopo, etc.

A partir de este modelo los estudiantes señalan fácilmente la necesidad de una nueva fuerza (la nuclear) que justifique la estabilidad de los núcleos, viendo su corto alcance y gran intensidad, que se puede poner de manifiesto mediante la energía de enlace. Los alumnos la pueden calcular a partir del defecto de masa. La energía de enlace por nucleón tiene gran interés porque su representación gráfica nos permitirá una mayor comprensión de las reacciones nucleares de fisión y fusión.

Se proseguirá con el estudio de los modos de desintegración radiactiva, aplicándoles no sólo las leyes de conservación de la carga y del número de nucleones (leyes de Soddy), sino también la conservación de la energía. Opcionalmente, se puede tratar del período y velocidad de desintegración, subrayando la naturaleza probabilística de dicho fenómeno.

Se puede estudiar a continuación algunas reacciones nucleares de particular interés: la fisión y la fusión. Opcionalmente se pueden analizar otras reacciones como la primera transmutación artificial (la del N-14 al bombardearlo con He-4), en la que Rutherford observó la emisión de protones en 1919 o el bombardeo de Be-9 con He-4 que condujo a Chadwick al descubrimiento del neutrón en 1932.

Una visión de la física nuclear quedaría incompleta si los alumnos no se abordasen sus implicaciones sociales y ambientales mediante cuestiones, de gran interés para ellos, como la contaminación radiactiva, la medida y detección de la radiactividad, las bombas y reactores nucleares, los isótopos y sus aplicaciones, etc.

Finalmente, hay que familiarizar al alumno con algunos descubrimientos de partículas elementales que han originado las ideas básicas de la física: la validez de los principios de conservación de la carga, energía y momentos lineal y angular (neutrino), la interacción como intercambio de partículas (fotón), la existencia de antipartículas (positrón), la inestabilidad de las partículas, la unificación de las interacciones, la estructura de los hadrones para explicar su gran número (idea similar a la utilizada para explicar el sistema periódico). Todos estos aspectos y otros que han supuesto un gran avance en nuestra comprensión de la estructura del Universo, se pueden plantear a los estudiantes como trabajos bibliográficos.

Distribución temporal

Se le pueden asignar unas 15 horas, de las que tres o cuatro se podrían utilizar para un estudio cualitativo de las partículas elementales. Con esto la 3ª parte dispondrá de unas treinta y ocho horas, es decir, el último tercio del tiempo total disponible.

Evaluación

- Calcular energías de enlace (o energías de enlace por nucleón)
- Determinar los nuevos núcleos o nucleones obtenidos en las reacciones nucleares.
- Estimar la energía cinética del producto de una desintegración o si puede producirse una determinada reacción para una energía cinética dada de la partícula incidente.
- Enumerar las principales aplicaciones de los isótopos radiactivos.
- Señalar los efectos de la radiactividad en la materia, en particular, en los organismos.
- Indicar las ventajas e inconvenientes de la energía nuclear sobre otros tipos de energía.
- Comparar la idea de interacción cuántica con la clásica.

Desarrollo de la Unidad didáctica: Interacción gravitatoria

Guía para el profesor

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

Por ello se puede comenzar el tema con el estudio de la evolución de las concepciones del Universo, desde la antigua Grecia hasta las leyes de Kepler. Ello permite comprender la especial importancia de la ley de Newton de la gravitación universal, que terminó con la separación tajante, vigente durante siglos, entre la dinámica terrestre y la celeste, poniendo así fin al proceso de ruptura con la física aristotélico-escolástica iniciado por Galileo, visto en cursos anteriores.

Seguiremos, por ello, el desarrollo que se expone a continuación:

1. La astronomía: desde la antigüedad hasta Kepler.
2. La dinámica del movimiento curvilíneo: momento angular.
3. Ley de la gravitación universal de Newton.
4. El campo gravitatorio.
5. La energía potencial y el potencial gravitatorios.
6. Las consecuencias del trabajo de Newton.

Se trata de un tema muy interesante, en particular, si no se limita a un tratamiento meramente formal. 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 interesan a la gente y, en particular, a los alumnos), en un tema de notable actualidad como es el movimiento de los satélites artificiales.

Por otra parte 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 sucede con la cinemática) realizar un tratamiento histórico, desde las concepciones aristotélico-escolásticas hasta nuestros días.

Sin embargo es un tema en el que aparecen dificultades para el alumno debido a que, como han mostrado investigaciones didácticas recientes (Doménech *et al.* 1989), los alumnos mantienen diferencias entre el comportamiento mecánico de los cuerpos terrestres y celestes, y utilizan preconcepciones sobre fuerza/movimiento y formas de razonamiento espontáneas.

La otra dificultad está centrada 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, el campo y la 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. Ello unido al hecho de que la enseñanza habitual se conforma con realizar definiciones operativas (en la mejor tradición empirista) y manipulaciones cuantitativas (problemas de cálculo), sin profundizar en el significado de los conceptos, sin relacionarlos y compararlos con otros, produce desorientación en el alumno.

Así, recientes investigaciones (ver Solbes y Martín, 1991) muestran que las diferentes magnitudes que describen la interacción entre partículas (fuerzas, campos) se yuxtaponen en la enseñanza habitual, recurriendo a uno u otro sin diferenciación. En particular, no se muestran los límites del concepto de fuerza (interacción a distancia e instantánea) ni las ventajas del concepto de campo, que permite explicar mayor número de fenómenos. Con ello se proporciona una imagen deformada del desarrollo de la ciencia y de la propia metodología científica y, en consecuencia, los alumnos no llegan a comprender el concepto de campo, ni su necesidad, ya que no pasa de ser un mero artificio para explicar las fuerzas y no adquiere significado físico.

La Astronomía: desde la antigüedad hasta Kepler

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

¿Por qué la observación y el estudio del movimiento de los astros han representado un papel tan importante en todas las culturas de Oriente y Occidente?

Comentarios A.1

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»), de tanta importancia no sólo en los viajes, sino sobre todo en la agricultura (determinación de las estaciones, del calendario y, por tanto, del período de siembra, recolección, etc.). También la astronomía jugaba un papel ideológico de justificación de clases sociales, pues sólo las castas sacerdotales tenían acceso a dicho saber.

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

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

Comentarios A.2

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 has podido leer en el

texto de Homero). Esto hará pensar a los alumnos 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.

A.3. El siguiente texto muestra las características esenciales del modelo geocéntrico:

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

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

Comentarios A.3

En primer lugar vemos que el Universo para los antiguos griegos se limita 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 XVII) permitieron ampliar su imagen y tamaño. 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»).

La pervivencia de este modelo durante la Edad Media es una prueba más de las implicaciones de la ideología en la ciencia y la cultura. 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.

El modelo geocéntrico no fue superado fácilmente. Aunque hubo precursores, como Aristarco de Samos (s. III a. C.), el modelo heliocéntrico sólo se pudo consolidar a partir de 1543, fecha en que se publicó el libro de Nicolás Copérnico (1473-1543) «De revolutionibus orbium coelestium». Sin embargo, este modelo fue muy atacado durante más de 100 años.

A.4. Indicar argumentos, tanto ideológicos como científicos, que se utilizaron contra el modelo heliocéntrico.

Comentarios A.4

Entre los argumentos de tipo físico contra el movimiento de la Tierra se pueden señalar los siguientes: los objetos saldrían despedidos, que un objeto dejado caer verticalmente desde una torre chocaría con la pared o se alejaría de ésta, etc., no se observa el paralaje de las estrellas fijas. La replica de Copérnico consistía en afirmar que las estrellas se encuentran a una distancia prácticamente infinita, lo que era absurdo para la época. De hecho en aquella época las observaciones y experiencias conocidas podían explicarse con ambas teorías. Hubo que esperar al descubrimiento de las aberraciones estelares o al experimento del péndulo de Foucault, experiencias «cruciales» que sólo podían ser explicadas con el modelo heliocéntrico.

En cuanto a los motivos de tipo ideológico contra el sistema copernicano, éstos derivan, como ya se ha visto en la actividad A.3, de su oposición a las concepciones e intereses de las clases dominantes, la nobleza y el clero. De hecho, en aquella época en que se tomaba al pie de la letra todo lo que se encontraba en la Biblia se utilizó un fragmento del libro de Josué en favor del geocentrismo «Josué se dirigió a Yavé y dijo a la vista de todo Israel: 'Detente, Sol, en Gabaón, y tú, Luna,

en el valle de Ayalón'. Y el sol se detuvo y la luna se paró» (10, 12-13). Esta interpretación literal de la Biblia ha estado vigente hasta este siglo y se ha utilizado en contra de las teorías científicas sobre la edad de la Tierra o el origen del hombre o incluso para justificar la esclavitud.

A.5. Mencionar científicos que fueron objeto de persecución por su apoyo a dicho modelo.

Comentarios A.5

La oposición del sistema copernicano a las concepciones vigentes hizo que sus defensores fueran sometidos a persecuciones. Aunque Copérnico se libró de ellas al publicar su libro el mismo año de su muerte, Martín Lutero le tachó de loco y hereje y la iglesia católica incluyó las «Revoluciones» en el «Índice de libros prohibidos». Giordano Bruno fue quemado por hereje en 1600. Galileo, pese a su amistad con el Papa y a su edad avanzada, después de publicar los «Diálogos» (1632) en lengua italiana, fue juzgado por la Inquisición, amenazado con tortura, obligado a renunciar a sus ideas (su abjuración fue leída públicamente en todas las iglesias de Italia) y confinado hasta su muerte, en 1642, en una villa de Florencia. Su libro fue incluido en el «Índice», donde permaneció junto al de Copérnico y otro de Kepler hasta 1835. De hecho el Vaticano no anunció hasta 1968 la conveniencia de anular la condenación de las teorías de Galileo, que se hizo efectiva en 1992. Otros científicos eludieron las persecuciones publicando que el sistema heliocéntrico era más eficaz para hacer los cálculos, pero no era un modelo de la realidad.

La contribución de Galileo (1564-1642) al nuevo modelo es doble: por sus observaciones astronómicas y por su obra divulgadora, ampliando los argumentos en favor del sistema copernicano. Publicó estas ideas inicialmente en latín, en el libro «Sidereus Nuncius» (1610), y por ello sólo fue advertido por la Inquisición. Pero cuando las publica en su gran obra «Diálogo sobre los dos grandes sistemas del mundo» (1632), en italiano y en forma de diálogo, es decir, haciéndolos accesibles a la sociedad, divulgándolos, es cuando se inicia la persecución referida en la actividad anterior.

A.6. El telescopio permitió a Galileo observar la existencia de cráteres y montañas en la Luna, descubrir satélites de Júpiter (que denominó estrellas mediceas, para alagar al duque de Toscana Cosme de Médicis), observar que las estrellas fijas siguen siendo puntuales como a simple vista. ¿Por qué estas observaciones supusieron un importante apoyo a la teoría heliocéntrica?

Comentarios A.6

En efecto, los cuerpos celestes no aparecían como perfectos e inmutables, no todos los cuerpos celestes giraban en torno a la Tierra y las estrellas se encuentran muy alejadas. Esto es una prueba de que la técnica no es sólo una aplicación de la ciencia pura. El avance técnico (el telescopio, por ejemplo) determina con frecuencia los progresos científicos (astronómicos en este caso).

Otro partidario del sistema copernicano fue el científico alemán Johannes Kepler (1571-1630), que en 1600 trabajó con el astrónomo danés Tycho Brahe (1546-1601), utilizando sus datos para perfeccionar el sistema heliocéntrico. Encontró que las posiciones de Marte no se ajustaban con las órbitas circulares de Copérnico. Esto le llevó a enunciar, tras años de trabajo, las leyes de Kepler (en 1609 la 1ª y la 2ª y en 1618 la 3ª):

1ª: Todos los planetas se mueven en órbitas elípticas, ocupando el Sol uno de los focos.

2ª: La línea imaginaria que une un planeta con el Sol recorre áreas iguales en tiempos iguales.

3ª: Entre el período T de un planeta dado y el radio medio de su órbita r se cumple la relación $T^2 = k \cdot r^3$

En los 50 años siguientes, otros científicos siguieron abordando estos problemas. El francés Descartes (1596-1650) intentó explicar la gravitación mediante torbellinos de éter, el holandés Huygens (1629-1695) introdujo la fuerza centrípeta en 1673. Los ingleses Hooke (1635-1703), Halley (1656-1742) y Wren (1632-1723), a partir de la fuerza centrípeta y de la 3ª ley de Kepler, pudieron deducir la ley del inverso del cuadrado de la distancia hacia 1679 y, a petición de Halley, Newton (1642-1727) culminó estos trabajos con su libro «Principios Matemáticos de la Filosofía Natural» (1687). Abordaremos la ley de la gravitación universal a continuación, pero previamente, plantearémos el siguiente apartado.

La dinámica del movimiento curvilíneo: momento angular

El estudio del movimiento curvilíneo de un cuerpo se ve facilitado introduciendo nuevas magnitudes. En efecto, como ya vimos el curso anterior, el estudio cinemático del movimiento circular se simplifica utilizando las magnitudes angulares derivadas.

- A.7.** Introducir, a título de hipótesis, una magnitud que produzca la modificación de la velocidad angular de un cuerpo de masa m que describe un movimiento circular en torno a un eje.
- A.8.** Introducir, por analogía con el caso anterior, una magnitud que nos caracterice la cantidad de movimiento angular, o momento angular, de una partícula.

Comentarios A.7 y A.8

Esta magnitud es fácil de establecer a partir de la experiencia cotidiana. De hecho ya era conocida desde la antigüedad, como lo pone de manifiesto la ley de la palanca: «La fuerza por su brazo es igual a la resistencia por el suyo». Se les puede facilitar a los alumnos la resolución de la actividad proponiéndoles el ejemplo de una puerta que se abre o cierra y planteándoles: ¿dónde es más conveniente aplicar la fuerza y con qué ángulo? La aceleración angular que adquiere el cuerpo depende del valor de la fuerza \vec{F} , de la distancia \vec{r} al eje de giro (del «brazo») y del ángulo que forman los vectores \vec{F} y \vec{r} . Concretamente: $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$.

Aunque se trata de una magnitud más abstracta se puede establecer, con la ayuda del profesor y por analogía con el caso anterior, que el momento angular dependerá, además de la masa y de la velocidad del cuerpo (cantidad de movimiento \vec{p}), de su distancia al eje de giro, así como del ángulo que forman \vec{p} y \vec{r} , con lo que la magnitud adecuada resulta ser: $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$.

- A.9.** Recordando la relación entre la fuerza y la cantidad de movimiento, establecer una relación análoga entre el momento de la fuerza y el momento angular introducidos en las actividades anteriores. Comprobar que es correcta.
- A.10.** Determinar en qué condiciones el momento angular permanece constante.

Comentarios A.9 y A.10

Por analogía con la ecuación fundamental de la dinámica de la traslación ($\vec{F} = d\vec{p}/dt$) tendremos la ecuación fundamental de la dinámica de la rotación: $\vec{M} = d\vec{L}/dt$. Esta es una de las opciones posibles: definir el momento de la fuerza y el angular y comprobar fácilmente la relación que existe entre ellos. Otra opción posible es postular el momento angular \vec{L} y la ecuación de la dinámica de la rotación ($\vec{M} = d\vec{L}/dt$) y al derivarlo respecto del tiempo obtenemos $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$. Hemos escogido la primera porque \vec{M} es una magnitud más intuitiva y permite, por analogía, definir \vec{L} . Con esto se completa la introducción de las tres ecuaciones fundamentales de la mecánica: la de la traslación, la de la rotación y la del trabajo o, en otros términos, tres principios de conservación fundamentales e independientes: el de la cantidad de movimiento, el del momento angular y el de la energía (Truesdell, 1975).

El momento angular se conserva ($\vec{L} = \vec{c}te$) cuando $\vec{M} = \vec{0}$. Esto se cumple no sólo cuando el cuerpo está aislado ($\vec{F} = \vec{0}$), sino también cuando las fuerzas son centrales, es decir, \vec{F} es paralelo a \vec{r} .

- A.11.** Llamando v a la rapidez y \vec{r} al radio, cuando el planeta se desplaza un $d\vec{r}$, obtener la relación que existe entre la 2ª ley de Kepler y la conservación del momento angular.

Comentarios A.11

Se pueden encontrar muchas demostraciones en los textos de la relación que existe entre la 2ª ley de Kepler y la conservación del momento angular. Nosotros escogemos la que sigue por su sencillez y elegancia. Como el área definida por $d\vec{r}$ y \vec{r} es $dS = |\vec{r} \times d\vec{r}| / 2$, tendremos que $dS/dt = cte$ (2ª

ley de Kepler). Por otra parte, $dS/dt = |\vec{r} \times \vec{v}| / 2 = L/2m$. Es decir, $L = \text{cte}$ lo que implica, como hemos visto en la actividad anterior, que la fuerza gravitatoria es central. Y precisamente porque existen muchas demostraciones posibles de cada enunciado, creemos que no hay que pedir al alumno que las memorice.

Ley de la gravitación universal de Newton

En el apartado anterior hemos visto que la fuerza que debe estar actuando, por ejemplo, sobre la Luna para que describa su órbita debe ser central.

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

Comentarios A.12

Esta actividad 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. Este es el paso que, hasta Newton, nadie había dado. Newton escribió:

«El que los planetas puedan ser retenidos en sus órbitas es algo que podemos comprender fácilmente si consideramos los movimientos de los proyectiles. En efecto, una piedra arrojada, por su propio peso, se ve forzada a abandonar la trayectoria rectilínea... viéndose obligada a describir una línea curva en el aire, y merced a ese camino torcido se ve finalmente llevada al suelo. Y cuando mayor sea la velocidad con que se proyecta, más lejos va antes de caer a tierra. Podemos suponer por tanto que la velocidad se incrementa de tal modo que describa un arco de (muchas) millas antes de llegar a la tierra, hasta que finalmente, excediendo de los límites de la tierra, pasará totalmente sin tocarla» (citado por Mason, vol. 2, pág. 103).

Este texto conviene leerlo al finalizar la actividad; ayuda a comprender que la diferencia viene determinada únicamente por la velocidad horizontal del movimiento.

Algunos alumnos dicen que la Luna no cae debido a la fuerza centrífuga. Hay que hacerles comprender que las únicas fuerzas que actúan sobre los cuerpos son debidas a las interacciones con otros cuerpos (3ª ley de Newton) y no hay ninguna interacción que produzca la centrífuga. Se puede añadir, si se considera oportuno, que sólo se incluyen fuerzas inerciales en sistemas de referencia acelerados, en los que no son válidas las leyes de Newton. Por ello, en este curso se utilizarán siempre sistemas de referencia inerciales.

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

Comentarios A.13

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

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

subrayando que \vec{u} es el vector unitario que 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, y otras características de los cuerpos, cuyo valor Newton no pudo determinar.

Conviene que el profesor se detenga mostrando los sucesivos pasos que llevaron a esta ley, para no dar una imagen excesivamente simplificadora de la ciencia que olvide las mayores contribuciones de Newton: primero mostró la necesidad de fuerzas; después que las fuerzas deberían ser centrales para que la velocidad aerolar fuese constante (en otras palabras, para que se conservase el momento angular); en tercer lugar, que las fuerzas deberían variar con la inversa del cuadrado de la

distancia para que la trayectoria descrita fuese cónica (elipse, circunferencia, parábola o hipérbola); y, por último, que las fuerzas eran debidas a las masas de los cuerpos. Además, tuvo que probar que la masa extensa de la Tierra producía la misma fuerza de atracción que si toda su masa se hallase concentrada en el centro. Para ello necesitó inventar, independientemente de Leibniz, el cálculo integral y diferencial, que denominó cálculo de fluxiones.

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

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

- A.14.** Considerando circulares, en primera aproximación, las órbitas de los planetas y teniendo en cuenta que la fuerza centrípeta que actúa sobre los mismos sería debida, según Newton, a la atracción gravitacional por parte del Sol, deducir la relación entre el período de un planeta y su distancia al Sol. Compararla con el resultado experimental (3ª ley de Kepler).
- A.15.** Aplicando un método similar al de la actividad anterior, Newton dedujo el período de rotación de la Luna (L) alrededor de la Tierra (T). Los únicos datos de que disponía eran el radio de T (R_T) (unos 6.370 km), la distancia T-L ($60 R_T$) y el valor de g ($9,8 \text{ ms}^{-2}$), que permiten obtener el valor del producto GM_T (cuyos valores respectivos eran desconocidos en la época de Newton). Realizar dicha deducción y comparar el resultado con el experimental.

Comentarios A.14 y A.15

La igualdad $mv^2/r = GMm/r^2$ lleva a los alumnos fácilmente a la 3ª ley de Kepler $T^2/r^3 = 4\pi^2/GM$. 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.

Esto facilita considerablemente la realización de la siguiente actividad. 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 período de la Luna.

A pesar de la debilidad de las fuerzas gravitatorias para cuerpos utilizables en el laboratorio, unos 100 años después, Cavendish (1731-1810) realizó la verificación experimental directa de la ley de Newton y, consiguientemente, determinó la constante universal G .

- A.16.** Sugerir algún montaje experimental para medir directamente la fuerza de atracción gravitatoria entre dos cuerpos.
- A.17.** Una vez conocido G podemos determinar la masa de la Tierra, el Sol o cualquier planeta con satélites. Por ello se dice que Cavendish fue el primer hombre que «pesó» la Tierra.

Determinar la masa de la Tierra y del Sol ($r_{T,S} = 1 \text{ u.a.} = 150 \cdot 10^9 \text{ m}$)

Comentarios A.16. y A.17

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 la masa de la Tierra $M_T = gR^2 / G = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$. Con la 3ª ley de Kepler podemos determinar la masa del Sol (a partir del 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,

$$M = 4\pi^2 r^3 / GT^2 = 19,9 \cdot 10^{29} \text{ kg} = 333000 M_T.$$

El cálculo de la masa de los satélites (incluyendo la Luna) y la de los planetas que no tienen satélites (Mercurio, Venus) no son sencillos.

Otras consecuencias de la ley de gravitación universal, desarrolladas en su mayor parte por el propio Newton, se pueden apreciar en las siguientes actividades.

A.18. Explicar, cualitativamente las mareas oceánicas y el achatamiento en los polos de los planetas.

A.19. Indicar las posibles trayectorias que pueden describir los cometas.

Comentarios A.18 y 19

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

Por último, si los cometas son periódicos, su trayectoria será una elipse muy excéntrica. El más famoso de ellos es el cometa que E. Halley estudió cuando apareció en 1682 y para el que predijo un período de aproximadamente 75 años. Su vuelta en 1756 y 3 veces más desde entonces, tras recorrer una amplia elipse que se extiende más allá del último planeta, fue interpretada como un importante triunfo de la mecánica newtoniana. Si los cometas no son periódicos su trayectoria será abierta, es decir, una hipérbola o una parábola.

El campo gravitatorio

A.20. Newton escribió:

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

La idea newtoniana de fuerzas gravitatorias entre los cuerpos presenta una serie de dificultades que no pasaron desapercibidas al propio Newton, como has podido ver en el fragmento anterior. Indicar alguno de dichos problemas.

A.21. ¿Cómo tendrá lugar la interacción de cuerpos distantes entre sí?

Comentarios A.20 y A.21

Los alumnos pueden mencionar los dos problemas del modelo newtoniano de fuerza: las interacciones son a distancia e instantáneas. Del primero de ellos ya era consciente Newton, como

pueden leer los alumnos en el texto anterior. Esto explica la teoría de los torbellinos de Descartes y que el propio Newton defendiese en su «Óptica» 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 A.21. 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.

A.22. Introducir una magnitud que nos permita medir la intensidad de campo.

A.23. Determinar la intensidad del campo creado por una masa puntual M y por dos masas puntuales.

Comentarios A.22. y A.23

La A.22. parte de la consideración fenomenológica de campo como región del espacio en la que actúan fuerzas sobre las masas, lo que permite definir la intensidad del campo gravitatorio \vec{g} como la fuerza F por unidad de masa, $\vec{g} = \vec{F} / m$.

En la A.23. el alumno encuentra fácilmente que $\vec{g} = GM\vec{u} / r^2$. El profesor debe hacer notar que esta expresión junto con la anterior descomponen el problema de la interacción ente dos masas M y m en 2 problemas. La expresión $\vec{g} = GM\vec{u} / r^2$ establece que la masa M crea alrededor de sí misma un campo $\vec{g}(\vec{r})$. La expresión $\vec{F} = m\vec{g}(\vec{r})$ establece que dicho campo actúa sobre la masa m , situada a la distancia r de M , con una fuerza $m\vec{g}$. En cuanto al campo de aplicación de estas expresiones, la que nos da el campo \vec{g} se utiliza para masas esféricas o puntuales. Sin embargo la expresión $\vec{F} = m\vec{g}$ es válida independientemente de cómo se haya creado el campo \vec{g} . Aquí se refleja la realidad física del concepto de campo. Cuerpos diferentes crean a su alrededor diferentes campos gravitatorios, sin embargo, cada uno de estos campos actúa sobre la masa que en él se introduce de acuerdo con la misma ley (Tarasov y Tarasova 1976).

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

A.24. Trazar las líneas de campo de una masa puntual M .

A.25. Obtener la expresión de la intensidad del campo gravitatorio en la superficie terrestre y a una altura h de la misma.

A.26. Diseñar una experiencia para determinar el campo gravitatorio en la superficie terrestre. Realizarla y analizar los resultados.

A.27. Determinar la intensidad del campo gravitatorio en la superficie de la Luna (Datos: M_L es 81 veces menor que la M_T ; su radio es 3.66 veces menor). Comparar el peso en la Luna de un hombre de 70 kg con el que tendría en la Tierra.

A.28. ¿En qué punto entre la Tierra y la Luna será nulo el campo gravitatorio debido a ambos cuerpos? (Datos: $R_{TL} = 384000$ km; $M_L = 0.012 M_T$).

Comentarios A.24 a A.28

Aunque estos problemas (A.25, 27 y 28) sean sencillos, es conveniente comenzar analizando cualitativamente la situación y emitiendo hipótesis; a continuación, elaborando estrategias de resolución a partir de expresiones conocidas; después analizando los resultados y, por último, sustituyendo por valores numéricos para ver los órdenes de magnitud involucrados. Es decir, conviene que el alumno razone que la intensidad de \vec{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 A.27. el

alumno debe pensar que g en la Luna es menor que en la Tierra (g es aproximadamente $9,8/6$ N/kg, lo que explica la «ligereza» del astronauta Armstrong). Por último, A.28. debe facilitar la comprensión por los alumnos del principio de superposición. Estos sugerirán que el punto se encuentra más próximo de la superficie de la Luna.

En cuanto a la A.26. 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 sencillos se basa en el péndulo simple.

La energía potencial y el potencial gravitatorios

- A.29.** Calcular el trabajo realizado por las fuerzas gravitatorias cuando un cuerpo de masa m se desplaza desde A hasta B, definidos por \vec{r}_1 y \vec{r}_2 , en el campo creado por otra masa M. Dar así mismo la variación de la energía potencial del sistema.

Comentarios A.29

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

$$W_{1,2} = - \int_{r_1}^{r_2} GMm dr / r^2 = -GMm / r_1 - (-GMm / r_2) = -\Delta E_p$$

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 $W_{\text{cons}} \approx -\Delta E_p$. 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, $W_{\text{cons}} = 0$.

- A.30.** Obtener la expresión de la energía potencial gravitatoria en un punto cualquiera del campo creado por M sobre m, tomando como origen de E_p la separación infinita de las masas ($E_p(r=\infty)=0$).

Comentarios A.30

El tomar la $E_p(r=\infty) = 0$, permite definir la energía potencial de un punto del espacio como $E_p = -GMm / r$. Es necesario realizar dos puntualizaciones: el origen de potencial puede ser asignado al punto que se desee. Así, en la conocida expresión $E_p = mgh$, se toma como origen la superficie de la tierra ($E_p(h=0) = 0$). Y esto no influye en los resultados físicos, por ejemplo, en el trabajo, porque lo que calculamos son incrementos de energía potencial. Así, en ambos casos, y esto es lo que verdaderamente importa, cuando alejamos un cuerpo de la Tierra la E_p aumenta.

Por otra parte, la energía potencial no es una propiedad del cuerpo de masa m . En efecto, en la expresión aparece la masa M del cuerpo con quien interacciona. Es decir la energía potencial es debida a la interacción entre las masas, o en otras palabras, al campo gravitatorio. De hecho la E_p se asigna a los puntos del espacio que rodea a M, es decir, al campo creado por M. Es una situación análoga a la de dos cuerpos unidos por un muelle. La E_p elástica se localiza en el muelle. Pero cuando se trata de campos, como se consideran artificios matemáticos y no entes físicos, hay resistencias a localizar en ellos la energía.

- A.31.** Representar gráficamente $E_p(r)$. Señalar cuando dos masas podrán formar un sistema ligado. ¿Cuándo pueden considerarse libres? ¿Qué trayectoria describirán en cada caso?

Comentarios A.31

La interpretación de la representación gráfica de $E_p(r)$ (una hipérbola negativa) 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 $E_c = E - E_p$. Evidentemente, cuando E_p aumenta, E_c disminuye. Por otra parte, si $E < E_p$, entonces la $E_c < 0$, lo cual es imposible; por ello, la región a la derecha de la hipérbola $E_p(r)$ se denomina clásicamente prohibida. Si la $E_c < |E_p|$, entonces la $E < 0$ y tenemos un sistema ligado, ya que m sólo puede moverse desde la superficie hasta r . Se trata en este caso de trayectorias cerradas: elipses, circunferencias. Si la $E_c \geq |E_p|$, entonces la $E \geq 0$ y el sistema es libre, ya que m puede moverse desde la superficie a ∞ . Se trata de trayectorias abiertas: parábolas ($E = 0$) e hipérbolas ($E > 0$).

- A.32.** Mostrar que la expresión que nos da la variación de la energía potencial entre dos puntos $\Delta E_p = -GMm/r_2 + GMm/r_1$ es equivalente a $\Delta E_p = mg\Delta h$ para distancias pequeñas sobre la superficie terrestre, siendo $\Delta h = r_2 - r_1$ y pudiendo considerarse $r_1 = R_T$ y $r_2 \approx R_T$. ¿Dónde estaría en este caso el origen de potenciales?
- A.33.** Introducir una nueva magnitud que juegue desde el punto de vista energético el mismo papel que la intensidad del campo gravitatorio con respecto a las fuerzas. ¿Qué relación tiene esa magnitud con el campo gravitatorio?

Comentarios A.33

Esta actividad debe conducir a un razonamiento del siguiente tipo: si el campo \vec{g} es igual a la fuerza por unidad de masa $\vec{g} = \vec{F}/m$, 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 \vec{g} y ΔV que entre \vec{F} y ΔE_p :

$$\Delta V = -W/m = -\int \vec{g} \cdot d\vec{r}$$

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), no se puede aplicar a múltiples situaciones, etc. De hecho, el concepto de energía potencial fue el único que introdujo Lagrange en 1772, denominándolo función de fuerza.

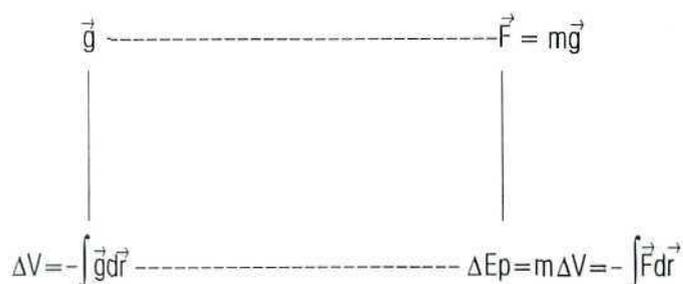
- A.34.** Obtener la expresión del potencial en un punto situado a una distancia r de la masa puntual M creadora del campo.
- A.35.** Representar el campo gravitatorio de una masa puntual M mediante superficies que unan los puntos que se encuentran al mismo potencial (superficies equipotenciales). Mostrar que las líneas de campo han de ser perpendiculares a dichas superficies.
- A.36.** Cuando se consideran pequeñas porciones de la superficie terrestre, el campo gravitatorio puede considerarse prácticamente uniforme. Representar las líneas de dicho campo y algunas superficies equipotenciales.
- A.37.** Elaborar un mapa conceptual de las principales magnitudes y relaciones introducidas para el estudio del campo gravitatorio.

Comentarios A.34 a A.37

En A.34 vemos que si se define un origen de potenciales (ver A.30) tenemos que $V = -GM/r$.

En A.35 vemos que las superficies equipotenciales son esferas concéntricas y, por tanto, perpendiculares a las líneas de campo. Podemos demostrarlo matemáticamente: si deslizamos un $d\vec{r}$ una masa por una superficie equipotencial, $dV = 0$ y, por tanto, $\vec{g} \cdot d\vec{r} = 0$, es decir, \vec{g} y $d\vec{r}$ son perpendiculares. Por otra parte, el sentido del campo es el de los potenciales decrecientes.

Un posible mapa conceptual (A.37) podría ser el siguiente



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

Las consecuencias del trabajo de Newton

A.38. Desde la publicación de los «Principios» de Newton (1686) hasta la actualidad se han producido una serie de descubrimientos astronómicos relacionados con la ley de gravitación universal. Así, por ejemplo, el descubrimiento de nuevos planetas a partir de las perturbaciones que producen en las órbitas de los planetas ya conocidos: las irregularidades en la órbita de Urano, descubierto en 1781 por Herschel, condujeron al descubrimiento de Neptuno en 1846 por Leverrier y Adams; por las perturbaciones que producía en este último fue descubierto Plutón en 1930 por Tombaugh.

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

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

¿Qué ponen de manifiesto estos descubrimientos?

Comentarios A.38

Estos descubrimientos 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, cuyo diámetro actualmente se estima en 10^5 a.l. y su espesor máximo en 10^4 a.l. Se puede plantear a los alumnos cómo lo hizo, haciéndoles reflexionar sobre la Vía Láctea. 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 la galaxia, sino a escalas cósmicas, agrupando las galaxias en cúmulos y supercúmulos.

A.39. Cuando en 1961 el soviético Yuri Gagarin entró durante 1 h 40 m en órbita alrededor de la Tierra se inició otra importante aplicación de la gravitación. El proceso siguió con el primer paseo espacial de Alexéi Leonov en 1965, la llegada de Armstrong y Aldrin a la Luna el 21-Junio-1969 y el primer vuelo del transbordador espacial en 1981, que han permitido denominar este tiempo como era espacial. Son ya millares los satélites en órbita (sin olvidar los restos de cohetes, fragmentos de satélites, etc. situados a unos 2.000 km de altura, de los cuales los radares tienen localizados sólo unos 7.000).

¿Para qué se ponen los satélites en órbita?

- A.40.** Existen satélites, llamados geoestacionarios, cuyo período de rotación alrededor de la Tierra es de 24 horas. ¿Es posible que dicho satélite esté fijo sobre la vertical de un punto cualquiera del globo?

Comentarios A.39 y A.40

Los alumnos pueden mencionar múltiples factores: desarrollo de las telecomunicaciones vía satélite, exigencias militares, información meteorológica, adquisición de nuevos conocimientos científicos, tanto sobre la Tierra (recogen datos sobre las temperaturas superficiales, la capa de ozono, la vegetación, los procesos de desertización, etc.) como sobre el espacio exterior (telescopios sin perturbaciones atmosféricas, etc.). En A.40. dado que la órbita de un satélite está en un plano que pasa por el centro de la Tierra, el satélite no puede estar fijo con respecto a la Tierra más que si su órbita es ecuatorial.

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

- A.41.** ¿Qué energía será necesaria para colocar un satélite en órbita lanzándolo desde la superficie de la Tierra?
- A.42.** ¿Cuál será la velocidad de escape que habrá que comunicar a un satélite? (La velocidad necesaria para que escape del campo gravitatorio, partiendo de la superficie).
- A.43.** Determinar la energía de los satélites geoestacionarios.

Comentarios A.41 a A.43

Estos problemas se pueden abordar como pequeñas investigaciones (Gil y Martínez, 1987). La supresión de los datos obliga a comenzar por el análisis cualitativo de la situación, a modelizarla. Esto les obliga 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 41 necesitamos conocer la energía en la órbita y en la superficie terrestre. Para calcular la primera necesitamos conocer la velocidad, que se puede determinar, si la órbita es una circunferencia, 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 son razonables, si se ajustan a lo que se podría esperar en situaciones sencillas y especiales —los casos límite—. Por último, conviene dar datos reales para que los alumnos puedan estimar órdenes de magnitud, etc. Así, por ejemplo, en el problema 41, $h = 2.000$ km, en el 42, determinar el valor de la velocidad de escape en las superficies de la Tierra y la Luna.

Los alumnos notarán en estos problemas que a mayor velocidad (o menor período) en la órbita, menor altura. Mostrar la coherencia de esto con la 3ª ley de Kepler y con la conservación de la energía (a mayor E_c menor E_p) ya vistos.

- A.44.** ¿Por qué los cohetes se lanzan desde puntos de la superficie terrestre próximos al Ecuador?

Comentarios A.44

Esta actividad 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 del cohete es menor para una órbita ecuatorial que para una polar.

- A.45.** En los medios de comunicación suelen aparecer expresiones como: «Un astronauta en un satélite en órbita terrestre se encuentra en estado de ingravidez, no pesa». Comentar dicha afirmación.
- A.46.** ¿Existen diferencias entre el estado de movimiento de un astronauta en una nave en órbita alrededor de la Tierra y una persona en un ascensor que caiga libremente?

Comentarios A.45 y A.46

Muchos alumnos han visto en la TV, cine, etc., que los astronautas «flotan» (como también se suele decir). Por ello, piensan que la ingravidez se debe a que los objetos «celestes» no se comportan igual que los terrestres, porque se liberan de la atracción terrestre. Pero esto es falso porque se encuentra en órbita debido a la fuerza de atracción gravitatoria, como ya saben los alumnos.

La A.45 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 esto 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 su proximidad, si no actúan 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.

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.

Actividades para el alumno

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

Por ello se puede comenzar el tema con el estudio de la evolución de las concepciones del Universo, desde la antigua Grecia hasta las leyes de Kepler. Ello permite comprender la especial importancia de la ley de Newton de la gravitación universal, que terminó con la separación tajante, vigente durante siglos, entre la dinámica terrestre y la celeste, poniendo así fin al proceso de ruptura con la física aristotélico-escolástica iniciado por Galileo, visto en cursos anteriores.

Seguiremos, por ello, el desarrollo que se expone a continuación:

1. La Astronomía: desde la antigüedad hasta Kepler.
2. La dinámica del movimiento curvilíneo: momento angular.
3. Ley de la gravitación universal de Newton.
4. El campo gravitatorio.
5. La energía potencial y el potencial gravitatorios.
6. Las consecuencias del trabajo de Newton.

La Astronomía: desde la antigüedad hasta Kepler

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

¿Por qué la observación y el estudio del movimiento de los astros han representado un papel tan importante en todas las culturas de Oriente y Occidente?

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

- A.2.** Los antiguos griegos sostenían que la Tierra era el centro inmóvil del Universo y que los astros como el Sol y la Luna, se movían alrededor de ella. Indicar observaciones que parezcan apoyar esa concepción.
- A.3.** El siguiente texto muestra las características esenciales del modelo geocéntrico:

«Ordenaba los cuerpos celestes hacia afuera, desde la Tierra, según sus períodos aparentes de revolución; a saber, la Luna, el Sol, Venus, Mercurio, Marte, Júpiter y Saturno...la esfera externa de las estrellas fijas era movida por el Primum Mobile... Las cosas por debajo de la Luna estaban hechas a base de los cuatro elementos terrestres, tierra, agua, aire y fuego. Los cielos estaban formados por un 5.º elemento más puro, la quintaesencia. Los cuerpos celestes eran incorruptibles y eternos, siéndolo también sus movimientos que eran consiguientemente circulares y uniformes. En la tierra se daba generación y corrupción, por lo que los movimientos terrestres eran rectilíneos y tenían principio y fin» (Mason, vol. 1, pp. 49-50).

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

El modelo geocéntrico no fue superado fácilmente. Aunque hubo precursores, como Aristarco de Samos (siglo III a. C.), el modelo heliocéntrico sólo se pudo consolidar a partir de 1543, fecha en que se publicó el libro de Nicolás Copérnico (1473-1543) «De revolutionibus orbium coelestium». Sin embargo, este modelo fue muy atacado durante más de 100 años.

- A.4.** Indicar argumentos, tanto ideológicos como científicos, que se utilizaron contra el modelo heliocéntrico.
- A.5.** Mencionar científicos que fueron objeto de persecución por su apoyo a dicho modelo.

La contribución de Galileo (1564-1642) al nuevo modelo es doble: por sus observaciones astronómicas y por su obra divulgadora, ampliando los argumentos en favor del sistema copernicano. Publicó estas ideas inicialmente en latín, en el libro «Sidereus Nuncius» (1610), y por ello sólo fue advertido por la Inquisición. Pero cuando las publica en su gran obra «Diálogo sobre los dos grandes sistemas del mundo» (1632), en italiano y en forma de diálogo, es decir, haciéndolos accesibles a la sociedad, divulgándolos, es cuando se inicia la persecución referida en la actividad anterior.

- A.6.** El telescopio permitió a Galileo observar la existencia de cráteres y montañas en la Luna, descubrir satélites de Júpiter (que denominó estrellas mediceas, para halagar al duque de Toscana Cosme de Médicis), observar que las estrellas fijas siguen siendo puntuales como a simple vista. ¿Por qué estas observaciones supusieron un importante apoyo a la teoría heliocéntrica?

Otro partidario del sistema copernicano fue el científico alemán Johannes Kepler (1571–1630), que en 1600 trabajó con el astrónomo danés Tycho Brahe (1546–1601), utilizando sus datos para perfeccionar el sistema heliocéntrico. Encontró que las posiciones de Marte no se ajustaban con las órbitas circulares de Copérnico. Esto le llevó a enunciar, tras años de trabajo, las leyes de Kepler (en 1609 la 1ª y la 2ª y en 1618 la 3ª):

1ª: Todos los planetas se mueven en órbitas elípticas, ocupando el Sol uno de los focos.

2ª: La línea imaginaria que une un planeta con el Sol recorre áreas iguales en tiempos iguales.

3ª: Entre el período T de un planeta dado y el radio medio de su órbita r se cumple la relación $T^2 = k \cdot r^3$

En los 50 años siguientes, otros científicos siguieron abordando estos problemas. El francés Descartes (1596–1650) intentó explicar la gravitación mediante torbellinos de éter, el holandés Huygens (1629–1695) introdujo la fuerza centrípeta en 1673. Los ingleses Hooke (1635–1703), Halley (1656–1742) y Wren (1632–1723), a partir de la fuerza centrípeta y de la 3ª ley de Kepler, pudieron deducir la ley del inverso del cuadrado de la distancia hacia 1679 y, a petición de Halley, Newton (1642–1727) culminó estos trabajos con su libro «Principios Matemáticos de la Filosofía Natural» (1687). Abordaremos la ley de la gravitación universal a continuación, pero previamente, plantearemos el siguiente apartado.

La dinámica del movimiento curvilíneo: momento angular

El estudio del movimiento curvilíneo de un cuerpo se ve facilitado introduciendo nuevas magnitudes. En efecto, como ya vimos el curso anterior, el estudio cinemático del movimiento circular se simplifica utilizando las magnitudes angulares derivadas.

- A.7.** Introducir, a título de hipótesis, una magnitud que produzca la modificación de la velocidad angular de un cuerpo de masa m que describe un movimiento circular en torno a un eje.
- A.8.** Introducir, igualmente, una magnitud que nos caracterice la cantidad de movimiento angular, o momento angular, de una partícula.
- A.9.** Recordando la relación entre la fuerza y la cantidad de movimiento, establecer una relación análoga entre el momento de la fuerza y el momento angular introducidos en las actividades anteriores. Comprobar que es correcta.
- A.10.** Determinar en qué condiciones el momento angular permanece constante.
- A.11.** Llamando v a la rapidez y \vec{r} al radio, cuando el planeta se desplaza un $d\vec{r}$, obtener la relación que existe entre la 2ª ley de Kepler y la conservación del momento angular.

Ley de la gravitación universal de Newton

En el apartado anterior hemos visto que la fuerza que debe estar actuando, por ejemplo, sobre la Luna para que describa su órbita debe ser central.

- A.12.** Representar la fuerza que debe actuar sobre la Luna. Ídem para un proyectil. Representa también las fuerzas de reacción correspondientes. ¿Por qué la Luna no cae sobre la Tierra como el proyectil?
- A.13.** Señalar, a título de hipótesis, de qué depende la fuerza gravitatoria entre dos cuerpos.

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

- A.14.** Considerando circulares, en primera aproximación, las órbitas de los planetas y teniendo en cuenta que la fuerza centrípeta que actúa sobre los mismos sería debida, según Newton, a la atracción gravitacional por parte del Sol, deducir la relación entre el período de un planeta y su distancia al Sol. Compararla con el resultado experimental (3ª ley de Kepler).
- A.15.** Aplicando un método similar al de la actividad anterior, Newton dedujo el período de rotación de la Luna (L) alrededor de la Tierra (T). Los únicos datos de que disponía eran el radio de $T(R_T)$ (unos 6370 km), la distancia T-L ($60 R_T$) y el valor de g ($9,8 \text{ ms}^{-2}$), que permite obtener el valor del producto GM_T (cuyos valores respectivos eran desconocidos en la época de Newton). Realizar dicha deducción y comparar el resultado con el experimental.

A pesar de la debilidad de las fuerzas gravitatorias para cuerpos utilizables en el laboratorio, unos 100 años después, Cavendish (1731-1810) realizó la verificación experimental directa de la ley de Newton y, consiguientemente, determinó la constante universal G .

- A.16.** Sugerir algún montaje experimental para medir directamente la fuerza de atracción gravitatoria entre dos cuerpos.
- A.17.** Una vez conocido G podemos determinar la masa de la Tierra, el Sol o cualquier planeta con satélites. Por ello se dice que Cavendish fue el primer hombre que «pesó» la Tierra.

Determinar la masa de la Tierra y del Sol ($r_{T-S} = 1 \text{ u.a.} = 150 \cdot 10^9 \text{ m}$)

Otras consecuencias de la ley de gravitación universal, desarrolladas en su mayor parte por el propio Newton, se pueden apreciar en las siguientes actividades.

- A.18.** Explicar, cualitativamente las mareas oceánicas y el achatamiento en los polos de los planetas.
- A.19.** Indicar las posibles trayectorias que pueden describir los cometas.

El campo gravitatorio

- A.20.** Newton escribió:

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

La idea newtoniana de fuerzas gravitatorias entre los cuerpos presenta una serie de dificultades que no pasaron desapercibidas al propio Newton, como has podido ver en el fragmento anterior. Indicar alguno de dichos problemas.

- A.21. ¿Cómo tendrá lugar la interacción de cuerpos distantes entre sí?
- A.22. Introducir una magnitud que nos permita medir la intensidad de campo.
- A.23. Determinar la intensidad del campo creado por una masa puntual M y por una distribución de masas puntuales.

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

- A.24. Trazar las líneas de campo de una masa puntual M .
- A.25. Obtener la expresión de la intensidad del campo gravitatorio en la superficie terrestre y a una altura h de la misma.
- A.26. Diseñar una experiencia para determinar el campo gravitatorio en la superficie terrestre. Realizarla y analizar los resultados.
- A.27. Determinar la intensidad del campo gravitatorio en la superficie de la Luna (Datos: M_L es 81 veces menor que la M_T ; su radio es 3.66 veces menor). Comparar el peso en la Luna de un hombre de 70 kg con el que tendría en la Tierra.
- A.28. ¿En qué punto entre la Tierra y la Luna será nulo el campo gravitatorio debido a ambos cuerpos? (Datos: $R_{TL} = 384000$ km; $M_L = 0.012 M_T$).

La energía potencial y el potencial gravitatorios

- A.29. Calcular el trabajo realizado por las fuerzas gravitatorias cuando un cuerpo de masa m se desplaza desde A hasta B, definidos por \vec{r}_1 y \vec{r}_2 en el campo creado por otra masa M . Dar así mismo la variación de la energía potencial del sistema.
- A.30. Obtener la expresión de la energía potencial gravitatoria en un punto cualquiera del campo creado por M sobre m , tomando como origen de E_p la separación infinita de las masas ($E_p(r=\infty)=0$).
- A.31. Representar gráficamente $E_p(r)$. Señalar cuándo dos masas podrán formar un sistema ligado. ¿Cuándo pueden considerarse libres? ¿Qué trayectoria describirán en cada caso?
- A.32. Mostrar que la expresión que nos da la variación de la energía potencial entre dos puntos $\Delta E_p = -GMm/r_2 + GMm/r_1$ es equivalente a $\Delta E_p = mg\Delta h$ para distancias pequeñas sobre la superficie terrestre, siendo $\Delta h = r_2 - r_1$ y pudiendo considerarse $r_1 = R_T$ y $r_2 \approx R_T$. ¿Dónde estaría en este caso el origen de potenciales?
- A.33. Introducir una nueva magnitud que juegue desde el punto de vista energético el mismo papel que la intensidad del campo gravitatorio con respecto a las fuerzas. ¿Qué relación tiene esa magnitud con el campo gravitatorio?
- A.34. Obtener la expresión del potencial en un punto situado a una distancia r de la masa puntual M creadora del campo.

- A.35.** Representar el campo gravitatorio de una masa puntual M mediante superficies que unan los puntos que se encuentran al mismo potencial (superficies equipotenciales). Mostrar que las líneas de campo han de ser perpendiculares a dichas superficies.
- A.36.** Cuando se consideran pequeñas porciones de la superficie terrestre, el campo gravitatorio puede considerarse prácticamente uniforme. Representar las líneas de dicho campo y algunas superficies equipotenciales.
- A.37.** Elaborar un mapa conceptual de las principales magnitudes y relaciones introducidas para el estudio del campo gravitatorio.

Las consecuencias del trabajo de Newton

- A.38.** Desde la publicación de los «Principios» de Newton (1686) hasta la actualidad se han producido una serie de descubrimientos astronómicos relacionados con la ley de gravitación universal. Así, por ejemplo, el descubrimiento de nuevos planetas a partir de las perturbaciones que producen en las órbitas de los planetas ya conocidos: las irregularidades en la órbita de Urano, descubierto en 1781 por Herschel, condujeron al descubrimiento de Neptuno en 1846 por Leverrier y Adams; por las perturbaciones que producía en este último fue descubierto Plutón en 1930 por Tombaugh.

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

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

¿Qué ponen de manifiesto estos descubrimientos?

- A.39.** Cuando en 1961 el soviético Yuri Gagarin entró durante 1 h 40 m en órbita alrededor de la Tierra se inició otra importante aplicación de la gravitación. El proceso siguió con el primer paseo espacial de Alexéi Leonov en 1965, la llegada de Armstrong y Aldrin a la Luna el 21-Junio-1969 y el primer vuelo del transbordador espacial en 1981, que han permitido denominar este tiempo como era espacial. Son ya millares los satélites en órbita (sin olvidar los restos de cohetes, fragmentos de satélites, etc. situados a unos 2.000 km de altura, de los cuales los radares tienen localizados sólo unos 7.000).

¿Para qué se ponen los satélites en órbita?

- A.40.** Existen satélites, llamados geoestacionarios, cuyo período de rotación alrededor de la Tierra es de 24 horas. ¿Es posible que dicho satélite esté fijo sobre la vertical de un punto cualquiera del globo?

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

- A.41.** ¿Qué energía será necesaria para colocar un satélite en órbita lanzándolo desde la superficie de la Tierra?

- A.42.** ¿Cuál será la velocidad de escape que habrá que comunicar a un satélite? (La velocidad necesaria para que escape del campo gravitatorio, partiendo de la superficie).
- A.43.** Determinar la energía de los satélites geoestacionarios.
- A.44.** ¿Por qué los cohetes se lanzan desde puntos de la superficie terrestre próximos al Ecuador?
- A.45.** En los medios de comunicación suelen aparecer expresiones como: «Un astronauta en un satélite en órbita terrestre se encuentra en estado de ingravidez, no pesa». Comentar dicha afirmación.
- A.46.** ¿Existen diferencias entre el estado de movimiento de un astronauta en una nave en órbita alrededor de la Tierra y una persona en un ascensor que caiga libremente?

Bibliografía

Bibliografía citada en el texto

- ALONSO, M., GIL, D. y MARTÍNEZ, J. «Los exámenes de Física en la enseñanza por transmisión y en la enseñanza por investigación». *Enseñanza de las Ciencias*, 10 (1992), 127-139.
- AUSUBEL, D. P. *Psicología educativa. Un punto de vista cognitivo*. México. Trillas. 1976.
- BERNAL, J. D. *Historia social de la ciencia*. Barcelona. Península. 1976.
- BOYER y TIBERGHEN, A. «Las finalidades de la Física y la Química, vistas por los profesores y los alumnos franceses». *Enseñanza de las Ciencias*, 7 (1989), 213-223.
- CARRASCOSA, J. y GIL, D. «La metodología de la superficialidad y el aprendizaje de las ciencias». *Enseñanza de las Ciencias*, 3 (1985), 113-121.
- CARRASCOSA, J. y GIL, D. «Concepciones alternativas en mecánica». *Enseñanza de las Ciencias*, 10 (1992), 314-328.
- CALATAYUD *et al.* *La construcción de las ciencias físico-químicas. Programas-guía de trabajo y comentarios para el profesor*. Valencia. Nau. 1988.
- CIENCIA COMBINADA NUFFIELD. Barcelona. Reverté. 1974.
- DOMÉNECH, J. L., GIL, D. y MARTÍNEZ, J. «La reconstrucción de la síntesis newtoniana como requisito para un cambio conceptual efectivo en mecánica». *Enseñanza de las Ciencias*, nº extra, tomo 1, 1989.
- DE POSADA, J. M. y PRIETO, T. «Exploraciones gráficas de ideas escolares de los alumnos sobre radiactividad». *Enseñanza de las Ciencias*, 8 (1990), 127-133.
- DRIVER, R. «Psicología cognoscitiva y esquemas conceptuales de los alumnos». *Enseñanza de las Ciencias*, 4 (1986), 3-16.
- DRIVER, R. «Un enfoque constructivista para el desarrollo del currículo de ciencias». *Enseñanza de las Ciencias*, 6 (1988), 109-121.
- DRIVER, R., GUESNE, E. y TIBERGHEN, A. *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*. Madrid. Morata y M. E. C. 1989.
- DUSCHL, R. y GITOMER, D. «Epistemological perspectives on conceptual change: implications for educational practice». *Journal of Research in Science Teaching*, 28 (1991), 839-858.
- ECKERT, M. y SCHUBERT. *Cristales, electrones, transistores*. Madrid. Alianza. 1991.

- GARCÍA, A. *La contaminación acústica*. València. Servei Publicacions Universitat de València. 1988.
- GIL, D. «Tres paradigmas básicos en la enseñanza de las ciencias». *Enseñanza de las Ciencias*, 1 (1983), 26-34.
- GIL, D. «El futuro de la enseñanza de las ciencias». *Revista de Educación*, 278 (1986), 27-38.
- GIL, D., CARRASCOSA, J., FURIÓ, C. y MARTÍNEZ, J. *La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria*. Barcelona. Horsori. I. C. E. 1991.
- GIL, D. y CARRASCOSA, J. «Science learning as a conceptual and methodological change». *European Journal of Science Education*, 7 (1985), 231-236.
- GIL, D. y MARTÍNEZ, J. *La resolución de problemas de física. Una didáctica alternativa*. Barcelona. Vicens Vives y MEC. 1987.
- GIL, D. y PAYA, J. «Los trabajos prácticos de Física y Química y la metodología científica». *Revista de Enseñanza de la Física*, 2 (1988), 73-79.
- GIL, D., SENENT, F. y SOLBES, J. «Análisis crítico de la introducción de la Física moderna». *Revista de Enseñanza de la Física*, 2 (1986), 16-21.
- GIL, D., SENENT, F. y SOLBES, J. « $E = mc^2$, la ecuación más famosa de la física: una incomprendida». *Revista Española de Física*, 2 (1988), 53-55.
- GIL, D., SENENT, F. y SOLBES, J. «Física moderna en la enseñanza secundaria: una propuesta fundamentada y unos resultados». *Revista Española de Física*, 3 (1989), 53-58.
- HERNÁNDEZ, J. y SOLBES, J. *Física y química. Materiales didácticos Bachillerato*. Madrid. Ministerio de Educación y Ciencia. 1992.
- HEWSON, P. W. A. «Conceptual change approach to learning science». *European Journal of Science Education*, 3 (1981), 383-396.
- HEWSON, P. W. «A case study of conceptual change in Special Relativity: The influence of prior knowledge in learning». *European Journal of Science Education*, 4 (1982), 61-78.
- HIERREZUELO, J. y MONTERO, M. *La ciencia de los alumnos*. Barcelona. Laia y M. E. C. 1989.
- HOLTON, G. *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Barcelona. Reverté. 1976.
- JIMÉNEZ, M. P., ALBALADEJO, C. y CAAMAÑO, A. *Didáctica de las ciencias de la naturaleza*. Curso de actualización científica y didáctica. Madrid. Ministerio de Educación y Ciencia. 1992.
- MARTÍN-DÍAZ, M. J. y KEMPA, R. F. «Los alumnos prefieren diferentes estrategias didácticas en función de sus características motivacionales». *Enseñanza de las Ciencias*, 9 (1991), 59-69.
- MASON, S. F. *Historia de las ciencias*. Madrid. Alianza. 1986.
- MAURINES, L. «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 (1992), 49-59.
- MEDINA, M. y SANMARTÍN, J. (Eds). *Ciencia, Tecnología y Sociedad*. Barcelona. Anthropos. 1990.
- NOVACK, J. D. *Teoría y práctica de la educación*. Madrid. Alianza. 1982.
- NOVACK, J. D. «Constructivismo humano: un consenso emergente». *Enseñanza de las Ciencias*, 6 (1988), 213-214.

- OTERO, J. «La producción y la comprensión de la ciencia: la elaboración en el aprendizaje de la ciencia escolar». *Enseñanza de las Ciencias*, 7 (1989), 223-229.
- PAYÁ, J., SOLBES, J. y VILCHES, J. *La mecánica: una ruptura con la física preclásica. 4.º ESO*. Valencia. Generalitat Valenciana. 1992.
- PERALES, F. J. y NIEVAS, F. «Nociones de los alumnos sobre conceptos de óptica geométrica». *Enseñanza de las Ciencias*, 6 (1988), 86-88.
- PIAGET, J. *La epistemología genética*. Barcelona. Redondo. 1970.
- PLON (*Physics Curriculum Development Project*). Utrecht. State University. 1984.
- POPE, M. y GILBERT, J. «Personal experience and the construction of knowledge in science». *Science Education*, 67 (1983), 193-203.
- POSNER, G. S., STRIKE, K. A., HEWSON, P. W., y GERTZOG, W. A. «Accommodation of scientific conception: towards a theory of conceptual change». *Science Education*, 66 (1982), 221-227.
- POZO, J. I. *Psicología de la comprensión y el aprendizaje de las ciencias*. Curso de actualización científica y didáctica. Madrid. Ministerio de Educación y Ciencia. 1992.
- SALTIEL, E. y VIENNOT, L. «¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes?». *Enseñanza de las Ciencias*, 3 (1985), 137-145.
- SÁNCHEZ RON, J. M. *El poder de la ciencia*. Madrid. Alianza. 1992.
- SATIS (*Science & Technology in Society*). Herts. A. S. E. 1986.
- SOLBES, J. *La introducción de los conceptos básicos de física moderna*. Tesis doctoral. Universitat de València. 1986.
- SOLBES, J. «Nuevas áreas curriculares. Las actitudes». *Cuadernos de pedagogía*, 180 (1990), 34-36.
- SOLBES, J. *Física cuántica. Recursos y elementos de actualización científica*. Curso de actualización científica y didáctica. Madrid. Ministerio de Educación y Ciencia. 1992.
- SOLBES, J., BERNABEU, J., NAVARRO, J. y VENTO, V. «Dificultades en la enseñanza /aprendizaje de la física cuántica». *Revista Española de Física*, 2 (1988), 22-27.
- SOLBES, J., CALATAYUD, M. L., CLIMENT, J. B. y NAVARRO, J. «Errores conceptuales en los modelos atómicos cuánticos». *Enseñanza de las Ciencias*, 5 (1987), 189-196.
- SOLBES, J. y MARTÍN, J. «Análisis de la introducción del concepto de campo». *Revista Española de Física*, 5 (1991), 34-40.
- SOLBES, J. y VILCHES, A. «Interacciones ciencia/ técnica/ sociedad (CTS): un instrumento de cambio actitudinal». *Enseñanza de las Ciencias*, 7 (1989), 14-20.
- SOLBES, J. y VILCHES, A. «El modelo constructivista y las relaciones ciencia/ técnica/ sociedad». *Enseñanza de las Ciencias*, 10 (1992), 181-187.
- SOLBES, J. y ZACARES, J. «¿Qué sucede con la enseñanza de la óptica?». *Revista Española de Física*, 7 (1993), pendiente de publicación.
- SOLIS, R. «Ideas intuitivas y aprendizaje de las ciencias». *Enseñanza de las Ciencias*, 2 (1984), 83-91.
- TARASOV, L. y TARASOVA. *Preguntas y problemas de Física*. Moscú. Mir, 1976.
- THE PROJECT PHYSICS COURSE. New York. Holt, Rinehart & Winston, 1970.

TRUESDELL, C. *Ensayos de historia de la mecánica*. Madrid. Tecnos. 1975.

VIENNOT, L. *Le raisonnement spontanée en dynamique élémentaire*. Tesis doctoral. Université Paris 7, 1976 (Publicada en 1979 por Herman, Paris)

VIENNOT, L. «La didáctica en la enseñanza superior ¿para qué?». *Enseñanza de las Ciencias*, 7 (1989), 3-14.

WARREN, J. W. «The mystery of mass-energy». *Physics Education*, 11 (1976), 52-54.

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

Bibliografía comentada

Textos

▣ GIANCOLI, D. C. *Física. Principios y aplicaciones*. Barcelona. Reverté. 1985.

Un texto que se ajusta bastante al nivel de este curso. Da una visión completa de los conceptos básicos de física y con una amplia gama de ejemplos que muestran las múltiples aplicaciones de la física en la vida cotidiana y diversos campos (medicina, arquitectura, tecnología, medio ambiente, etc.). En él se utiliza el álgebra y la trigonometría elemental, pero no el cálculo infinitesimal. En el capítulo 3 trata de gravitación, en el 11 y 12 de vibraciones y ondas y sonido, en el 13 y 14 de electricidad, en el 17 de magnetismo, en el 18 de inducción, en el 20 de ondas electromagnéticas y del 24 al 30 trata los siguientes aspectos de la física moderna: relatividad, teoría cuántica primitiva, modelos atómicos y mecánica cuántica, teoría cuántica de átomos y moléculas, núcleo atómico y radiactividad, reacciones nucleares y energía nuclear y partículas elementales.

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

Un texto clásico que también se ajusta al nivel de este curso. 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 en los capítulos 1, 2, 4 y 5, de la ley de gravitación de Newton en el 11, de la luz y el electromagnetismo en los capítulos 23, 24 y 25. En los capítulos 26 a 30 se trata la teoría cuántica de la luz, la radiactividad y el átomo nuclear, el modelo atómico de Bohr, la mecánica cuántica y la relatividad. Recomendamos así mismo la lectura de los capítulos 3, 12, 13 y 14 sobre la estructura y el método de la ciencias.

▣ FEYNMAN, R. P., LEIGHTON, R.B. y SANDS, M. *Física*. Panamá. Fondo Educativo Interamericano. 1971.

Este curso de Física no corresponde al nivel de este curso ni siquiera de un primer curso universitario. Se trata de unas lecciones cargadas de reflexión y pensamiento, que muestran la importancia de los resultados experimentales, de las situaciones del mundo real, de los nuevos problemas asociados a dichos temas, etc. Por ello se constituyeron en un texto clásico que influyó en la renovación de la enseñanza de la física general. Aquí se recomiendan como unas lecturas de física para el profesor que quiera descubrir ideas interesantes. A título de ejemplo recomendamos del volumen 1 los capítulos: 7 sobre gravitación, 15, 16 y 17 sobre la relatividad y el 37 y 38 donde introduce las ideas básicas de la cuántica, que han influido mucho en el punto de vista actual (son los capítulos 1 y 2 del volumen 3). Del volumen 2 los capítulos 1 y 16 presentan ideas cualitativas de electromagnetismo.

Libros con actividades

- ☐ SOLBES, J. *Física cuántica. Recursos y elementos de actualización científica*. Madrid. Ministerio de Educación y Ciencia. 1992.

Se trata de un tema planteado a un nivel de 2º de Bachillerato y primer curso de universidad, para que no sólo contribuya a la formación permanente del profesorado, sino para que el profesor pueda adaptar estos materiales para sus alumnos. Se desarrolla el tema en torno a un conjunto de actividades para el profesor, precedidas por breves introducciones de contenido informativo, y seguidas de respuestas, comentarios didácticos, etc. Contiene una amplia bibliografía sobre cuántica.

- ☐ SOLBES, J. y NAVARRO, J. *Física moderna*. Valencia. Conselleria de Cultura. Educació i Ciència. 1989.

Se introducen ideas básicas de relatividad y cuántica, y sus aplicaciones al estudio de los átomos y sus enlaces, los sólidos (teoría de bandas), el núcleo atómico y las partículas elementales, para alumnos de 2º de Bachillerato. Estos materiales se organizan en torno a una serie de actividades para el alumno, acompañadas de respuestas, sugerencias, etc. Al final de cada tema se incluyen comentarios para el profesor sobre aspectos didácticos, bibliográficos, etc.

- ☐ CALATAYUD, M. L. *et al. La construcción de las ciencias físico-químicas*. Valencia. NAU. 1988.

Estos libros (del alumno y del profesor) corresponden a niveles inferiores a éste. El libro del profesor ofrece las bases didácticas, metodológicas, etc, que fundamentan esta propuesta y comentarios que describen los resultados previsibles de las actividades propuestas, justifican el hilo conductor, etc. El libro del alumno ofrece materiales destinados a favorecer un trabajo colectivo de equipos 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.

Historia de la ciencia e interacciones CTS

- ☐ BERNAL, J. D. *Historia social de la ciencia*. Barcelona. Península. 1976.

Un texto clásico, como lo prueban sus múltiples ediciones desde 1954 hasta la actualidad. Trata sobre las interacciones Ciencia-Tecnología-Sociedad a lo largo de la historia y muestra como los descubrimientos científicos y técnicos están condicionados por la realidad social y, a su vez, actúan sobre ella. Los capítulos 12 y 13 sobre las ciencias sociales son lo más flojo de la obra.

- ☐ ECKERT, M. y SCHUBERT. *Cristales, electrones, transistores*. Madrid. Alianza. 1991.

Un buen libro cuyo subtítulo, «Del gabinete del sabio a la investigación industrial», resulta más iluminador del contenido. Se inicia con la institucionalización de la física en el XIX y muestra la gran influencia en el desarrollo tecnológico y la enorme importancia social de una rama de la física, el estado sólido y la microelectrónica, menos divulgada y conocida por el público que otras como la relatividad o la física nuclear y de partículas. Aporta información hasta 1985.

- ☐ MASON, S. F. *Historia de las ciencias*. Madrid. Alianza. 1984 a 1986.

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.

- ☐ PACEY, A. *El laberinto del ingenio. Ideas e idealismo en el desarrollo de la tecnología*. Barna. Gustavo Gili. 1980.

Se trata de una historia no determinista de la tecnología que muestra la complejidad de su desarrollo, la pluralidad de sus objetivos desde los más conocidos como el aumento de la producción y reducción de costes o el poder y control social que supone la organización de la tecnología, a los objetivos simbólicos (prestigio nacional, sentimientos religiosos, etc.), humanitarios y sociales (alivio de las necesidades humanas, hacer menos oneroso el trabajo, etc.), intelectuales (tecnología más lógica y precisa), etc. Abarca desde la construcción medieval de catedrales (1100-1200) a principios del siglo XX (la segunda revolución industrial).

- ☐ SÁNCHEZ RON, J. M. *El poder de la ciencia*. Madrid. Alianza. 1992.

Un libro excelente que muestra la institucionalización de la física y la química en el siglo XIX en el primer capítulo, en el 2º y 3º presenta las grandes revoluciones de la física del siglo XX, la cuántica y la relatividad, mostrando aplicaciones de la primera (estado sólido, química cuántica, etc.) y el fenómeno social que supuso la relatividad y en los restantes capítulos 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. *La fuerza del conocimiento*. Madrid. Alianza. 1980.

Se trata de un curso desarrollado en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Bristol desde 1971 para introducir a los estudiantes de ciencias en el tema de las relaciones sociales de la ciencia y la tecnología. 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 divulgación

- ☐ EINSTEIN, A. *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Madrid. Alianza. 1986.

Los científicos no son siempre los mejores divulgadores de su obra, pero este libro, escrito en 1916, está reconocido como una de las mejores obras para «dar una idea lo más exacta posible de la teoría de la relatividad, pensando en aquellos que, sin dominar el aparato matemático de la física teórica, tengan interés por la teoría desde el punto de vista científico o filosófico general», en palabras de su autor.

- ☐ CLOSE, F. *La cebolla cósmica*. Barcelona. Crítica. 1988.

- ☐ FRITZSCH, H. *Los quarks, la materia prima de nuestro universo*. Madrid. Alianza. 1984.

- ☐ WEINBERG, S. *Los tres primeros minutos del universo*. Madrid. Alianza. 1980.

Tres buenos libros para asomarnos al tema de las partículas e interacciones fundamentales y sus implicaciones en nuestra visión actual sobre el origen y evolución del Universo.

- ☐ DELIGEORGES, S. *et al. El mundo cuántico*. Madrid. Alianza. 1990.

- ☐ HAN, M. Y. *La vida secreta de los cuantos*. Madrid. McGraw Hill. 1992.

El primero de los mencionados es una traducción del número especial 46 de la revista «Sciences & Avenir» que contiene artículos interesantes, en particular, los de Levy Leblond. En cuanto al segundo, se centra en las nuevas tecnologías vinculadas a la cuántica: semiconductores, ordenadores, láser, superconductores, etc.

Anexo: Currículo oficial (*)

Introducción

El objetivo principal de la física, como el de todas las ciencias de la naturaleza, es comprender ésta, poner orden en el amplio campo de los fenómenos tal y como aparecen ante la observación humana. Dentro de esta comprensión de la naturaleza, la física se ha centrado en la interpretación del espacio y el tiempo, y el estudio de la materia.

En el Bachillerato, la Física puede estructurarse en tres grandes bloques: mecánica, electromagnetismo y física moderna. En esta materia se completan los conocimientos relativos a la física clásica, en particular a la mecánica como primera ciencia moderna, mediante la introducción de la teoría de la gravitación universal. Asimismo se estudia el movimiento ondulatorio para completar la imagen mecánica del comportamiento de la materia, y la óptica, para mostrar posteriormente su integración en el electromagnetismo, que se convierte, junto con la mecánica, en el pilar fundamental de la física clásica. La asignatura ha de presentar también cómo la gran concepción del mundo de la física clásica no pudo explicar una serie de fenómenos, originándose así el surgimiento de la física moderna, algunas de cuyas ideas (relatividad, física cuántica y sus aplicaciones) son introducidas en los contenidos.

Su papel educativo en el Bachillerato, aparte de profundizar en los conocimientos físicos adquiridos en cursos anteriores, es el de presentar a los alumnos la importancia que tienen los intentos de construir imágenes de la realidad para el desarrollo de la física, y reflexionar sobre el papel desempeñado por las diferentes teorías y paradigmas físicos.

El carácter formativo del bachillerato, por otro lado, hace necesario que también esta materia contribuya a la formación de ciudadanos críticos y, por ello, debe incluir aspectos de formación cultural, como las complejas interacciones, ciencia-tecnología-sociedad, o la forma de trabajar del científico. En el Bachillerato, la Física acentúa su carácter orientador y preparatorio en orden a estudios posteriores.

En la mayoría de las materias relacionadas con las ciencias de la naturaleza, los dos primeros núcleos de contenidos recogen contenidos comunes a todos los demás. Presentan principalmente contenidos procedimentales y actitudinales, que se refieren a una primera aproximación formal al trabajo científico, y a la naturaleza de la ciencia, en sí misma y en sus relaciones con la sociedad y con la tecnología.

Objetivos generales

El desarrollo de esta materia ha de contribuir a que las alumnas y los alumnos adquieran las siguientes capacidades:

1. Comprender los principales conceptos de la física y su articulación en leyes, teorías y modelos, valorando el papel que desempeñan en su desarrollo.

(*) Real Decreto 1.179/1992, de 2 de octubre, por el que se establece el currículo de Bachillerato. («B. O. E.», n.º 253 de 21 de octubre de 1992).

2. Resolver problemas que se les planteen en la vida cotidiana, seleccionando y aplicando los conocimientos físicos relevantes.
3. Utilizar con autonomía las estrategias características de la investigación científica (plantear problemas, formular y contrastar hipótesis, planificar diseños experimentales, etcétera) y los procedimientos propios de la física, para realizar pequeñas investigaciones y, en general, explorar situaciones y fenómenos desconocidos para ellos.
4. Comprender la naturaleza de la física y sus limitaciones, así como sus complejas interacciones con la tecnología y la sociedad, valorando la necesidad de preservar el medio ambiente y de trabajar para lograr una mejora de las condiciones de vida actuales.
5. Valorar la información proveniente de diferentes fuentes para formarse una opinión propia, que les permita expresarse críticamente sobre problemas actuales relacionados con la física.
6. Comprender que el desarrollo de la física supone un proceso cambiante y dinámico, mostrando una actitud flexible y abierta frente a opiniones diversas.

Contenidos

Aproximación al trabajo científico

- Procedimientos que constituyen la base del trabajo científico: planteamiento de problemas, formulación y contrastación de hipótesis, diseño y desarrollo de experimentos, interpretación de resultados, comunicación científica, estimación de la incertidumbre de la medida, utilización de fuentes de información.
- Importancia de las teorías y modelos dentro de los cuales se lleva a cabo la investigación.
- Actitudes en el trabajo científico: cuestionamiento de lo obvio, necesidad de comprobación, de rigor y de precisión, apertura ante nuevas ideas.
- Hábitos de trabajo e indagación intelectual.

Física, tecnología y sociedad

- Análisis de la naturaleza de la física: sus logros y limitaciones, su carácter tentativo y de continua búsqueda, su evolución, la interpretación de la realidad a través de modelos.
- Relaciones con la tecnología y las implicaciones de ambas en la sociedad: consecuencias en las condiciones de la vida humana y en el medio ambiente. Valoración crítica.
- Influencias mutuas entre la sociedad, la física y la tecnología. Valoración crítica.

Interacción gravitatoria

- La teoría de la gravitación universal: una revolución científica que modificó la visión del mundo.
- Ecuación fundamental de la dinámica de la rotación. Conservación del momento angular. De las leyes de Kepler a la ley de Newton.
- El trabajo de las fuerzas conservativas. Energía potencial.
- Bases conceptuales para el estudio de las interacciones a distancia. El campo gravitatorio. Magnitudes físicas que lo caracterizan: intensidad y potencial gravitatorio.
- Aplicaciones al estudio de la gravedad terrestre y del movimiento de los satélites y los planetas.

Vibraciones y ondas

- Movimiento oscilatorio: el movimiento vibratorio armónico simple.
- Movimiento ondulatorio. Magnitudes y características de las ondas. Estudio fenomenológico de la influencia del medio en la velocidad de propagación. Ecuación de las ondas armónicas. Aplicaciones.
- Estudio cualitativo de algunas propiedades de las ondas: reflexión, refracción, difracción e interferencias. Principio de Huygens. Ondas estacionarias.
- Contaminación sonora, sus fuentes y efectos.

Óptica

- Controversia sobre la naturaleza de la luz: análisis de los modelos corpuscular y ondulatorio e influencia de los factores extracientíficos en su aceptación por la comunidad científica.
- Dependencia de la velocidad de la luz con el medio. Algunos fenómenos producidos con el cambio de medio: reflexión, refracción, absorción y dispersión.
- Óptica geométrica: comprensión de la visión y formación de imágenes en espejos y lentes delgadas. Aplicación al estudio de algún sistema óptico.
- Estudio cualitativo y experimental de los fenómenos de difracción, interferencias, dispersión y espectro visible. Aplicaciones: visión del color y espectroscopia.

Interacción electromagnética

- Campo eléctrico. Magnitudes que lo caracterizan: intensidad de campo y potencial eléctrico. Relación entre ellas.
- Creación de campos magnéticos por cargas en movimiento. Estudio experimental de algunos casos concretos: campos creados por una corriente rectilínea indefinida y por un solenoide en su interior. Explicación del magnetismo natural.
- Fuerzas sobre cargas móviles situadas en campos magnéticos: Ley de Lorentz. Aplicación al estudio del movimiento de cargas eléctricas en campos magnéticos uniformes. Definición internacional de amperio.
- Flujo magnético. Producción de corrientes alternas mediante variaciones del flujo magnético: inducción electromagnética. Importancia de su producción e impacto medioambiental.
- Aproximación histórica a la unificación de la electricidad, el magnetismo y la óptica: síntesis electromagnética.
- Analogías y diferencias entre distintos campos conservativos (gravitatorio y eléctrico), y entre conservativos y no conservativos (eléctrico y magnético).

Introducción a la física moderna

- Fenómenos que no se explican con la física clásica. Postulados de la relatividad especial.
- El efecto fotoeléctrico y los espectros discontinuos: Insuficiencia de la física clásica para explicarlos.

- Teoría de Planck. Hipótesis de De Broglie. Comportamiento cuántico de las partículas (fotones, electrones, etc.). Relaciones de indeterminación. Desarrollo científico y tecnológico que supuso la física moderna.
- Aplicaciones de la física moderna: física nuclear. Radioactividad. Interacción nuclear fuerte. Energía de enlace. Fusión y fisión, sus aplicaciones y sus riesgos. Introducción al estudio de las partículas elementales.

Criterios de evaluación

1. *Utilizar los procedimientos propios de la resolución de problemas para abordar situaciones en las que se aplique la ley de la gravitación universal.*

Este criterio pretende constatar si los alumnos y las alumnas son capaces de acotar claramente los problemas haciendo explícitas las condiciones que se van a considerar, si aplican los distintos conceptos que describen la interacción gravitatoria (campo, energía y fuerza) a casos de interés, como son: la determinación de masas de cuerpos celestes, el tratamiento de la gravedad terrestre y el estudio de los movimientos de planetas y satélites, y si analizan los resultados obtenidos.

2. *Valorar la importancia histórica de determinados modelos y teorías que supusieron un cambio en la interpretación de la naturaleza, y poner de manifiesto las razones que llevaron a su aceptación, así como las presiones que, por razones ajenas a la ciencia, se originaron en su desarrollo.*

Se pretende comprobar que el alumnado conoce y valora logros de la física como son: la sustitución de las teorías escolásticas sobre el papel y la naturaleza de la Tierra dentro del universo, por las teorías newtonianas de la gravitación, la evolución en la concepción de la naturaleza de la luz o la introducción de la física moderna para superar las limitaciones de la física clásica. También se trata de conocer si el alumnado es capaz de dar razones fundadas de los cambios producidos en ellas a la luz de los hallazgos experimentales y de poner de manifiesto las presiones sociales a las que fueron sometidas, en algunos casos, las personas que colaboraron en la elaboración de las nuevas concepciones.

3. *Deducir a partir de la ecuación de ondas las magnitudes que las caracterizan y asociar dichas características a su percepción sensorial.*

Se pretende comprobar que los alumnos y alumnas saben deducir los valores de la amplitud, velocidad, longitud de onda, período y frecuencia a partir de una ecuación de ondas dada. Se pretende, además, conocer si saben asociar frecuencias bajas y altas a sonidos graves o agudos o a la existencia de grandes o pequeñas distancias entre las contracciones y dilataciones en un muelle, relacionar la amplitud de la onda con su intensidad, etc. Se trata en suma, de comprobar que los alumnos también asocian lo que perciben por los sentidos con aquello que estudian teóricamente.

4. *Justificar algunos fenómenos ópticos sencillos de formación de imágenes, y reproducir alguno de ellos.*

Se trata de comprobar que los alumnos son capaces de explicar fenómenos cotidianos como son: la formación de imágenes en una cámara fotográfica, las distintas imágenes que vemos con una lupa según sea la distancia del objeto, la visión a través de un microscopio, en espejos planos o curvos, etc. y que pueden reproducir alguno, como por ejemplo, construyendo algunos aparatos sencillos tales como un telescopio rudimentario, una cámara oscura, etc.

5. *Utilizar el concepto de campo para superar las dificultades que plantea la interacción a distancia, calcular los campos creados por cargas y corrientes y las fuerzas que actúan sobre cargas y corrientes en el seno de campos uniformes, y justificar el fundamento de algunas aplicaciones prácticas.*

Con este criterio se pretende comprobar si los alumnos son capaces de determinar los campos eléctricos o magnéticos producidos en situaciones simples (una o dos cargas, corrientes eléctricas, solenoides, etc.) y las fuerzas que ejercen los campos sobre otras cargas o corrientes en su seno, en particular, estudiar los movimientos de cargas en campos eléctricos o magnéticos uniformes. Asimismo se pretende conocer si saben explicar el fundamento de aplicaciones como los electroimanes, motores, movimiento del chorro de electrones del tubo de televisión, instrumentos de medida como el galvanómetro, etc.

6. *Identificar en los generadores de diferentes tipos de centrales eléctricas el fundamento de la producción de la corriente y de su distribución.*

Se trata de comprobar que los alumnos y alumnas identifican en un esquema de cualquier central eléctrica su fundamento, siendo capaces de comprender que la única diferencia entre la utilización de energía nuclear, de carbón, de gas, hidroeléctrica, eólica, etc., se encuentra en la forma en que se hace girar el eje del alternador para provocar las variaciones de flujo en los circuitos generadores de corriente. También se pretende saber si son capaces de identificar la generación de corrientes inducidas en los transformadores que adecuan la corriente para su transporte y uso, y si justifican por qué se distribuye de esta manera.

7. *Valorar críticamente las mejoras que producen algunas aplicaciones relevantes de los conocimientos científicos y los costes medioambientales que conllevan.*

Se pretende con este criterio conocer si el alumnado sabe argumentar (ayudándose de hechos, recurriendo a un número de datos adecuado, buscando los pros y los contras, atendiendo a las razones de otros, etc.), sobre las mejoras y los problemas que se producen en las aplicaciones de los conocimientos científicos como son: la utilización de distintas fuentes para obtener energía eléctrica, el empleo de las sustancias radioactivas en medicina, en la conservación de alimentos, la energía de fisión y de fusión en la fabricación de armas, etc.

8. *Explicar con las leyes cuánticas una serie de experiencias de las que no pudo dar respuesta la física clásica como el efecto fotoeléctrico y los espectros discontinuos.*

Este criterio intenta evaluar si se comprende que estas experiencias muestran que los fotones, electrones, etc., no son ni ondas ni partículas según la noción clásica, sino que son objetos nuevos con un comportamiento nuevo, el comportamiento cuántico, y que para describirlo, hacen falta nuevas leyes, como la ecuación de la energía de Planck, el momento de De Broglie o las relaciones de indeterminación.

9. *Aplicar la existencia de las interacciones fuertes y la equivalencia masa-energía a la justificación de: la energía de ligadura de los núcleos, el principio de conservación de la energía, las reacciones nucleares, la radiactividad y las aplicaciones de estos fenómenos.*

Este criterio trata de comprobar si el alumnado comprende la necesidad de una nueva interacción para justificar la estabilidad de los núcleos a partir de las energías de enlace, y los procesos energéticos vinculados con la radiactividad y las reacciones nucleares. Y si son capaces de aplicar estos conocimientos a temas de interés, como la contaminación radiactiva, las bombas y reactores nucleares, y los isótopos y sus aplicaciones.



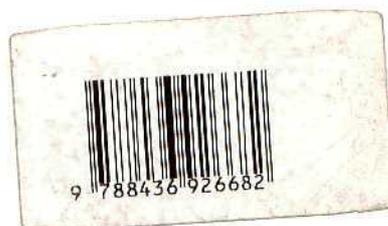








CENTRO DE DESARROLLO CURRICULAR



DIRECCIÓN GENERAL DE RENOVACIÓN PEDAGÓGICA

CENTRO DE DESARROLLO CURRICULAR