

Reflexiones sobre la enseñanza de la Física en el siglo XXI

Marcelo Alonso

Quiero en primer lugar agradecer a la Dirección de la *Revista Española de Física* por la gentil invitación para contribuir con algunas reflexiones sobre la enseñanza de la física al número especial conmemorativo del centenario de la fundación de la Real Sociedad Española de Física. Así mismo, felicito en tan fausta ocasión a la RSEF por haber contribuido tan eficazmente al desarrollo de la física en España y por la colaboración que ha establecido con los países de Iberoamérica.

Un objetivo general de la enseñanza de ciencias debe ser estimular en los alumnos un espíritu crítico y desarrollar su capacidad de observación y análisis.

Actualizar la enseñanza de la física a todos los niveles, rompiendo ciertos cánones establecidos hace cien años es un importante esfuerzo que nos preocupa a muchos. Los eventos nacionales e internacionales sobre este tema son innumerables y en muchos países existen programas nacionales orientados a la actualización de la enseñanza de las ciencias. Yo he participado en muchos de ellos y, en particular, expresé algunas ideas sobre el tema en la reunión de RSEF en 1998, que fueron recogidas en una publicación de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria, y más recientemente en dos importantes seminarios, uno en Avila, organizado por profesores de la UNED con el auspicio del Ministerio de Educación, y el otro en Salamanca, patrocinado por la Fundación Duques de Soria. Debo señalar que aunque el proceso de actualización es lento, porque requiere cambiar ciertas tradiciones, se han conseguido algunos logros puntuales. Por tanto, es muy difícil decir algo nuevo y solo trataré de hacer algunas consideraciones generales, orientadas a cómo creo que se deben armonizar las descripciones del mundo físico a los niveles micro, meso y macro.

Es importante reconocer que no es lo mismo actualizar la enseñanza de ciencias al nivel primario, al secundario o al terciario o universidad, y esto se aplica



en particular a la física, pero hay muchos elementos comunes. Un objetivo general de la enseñanza de ciencias debe ser estimular en los alumnos un espíritu crítico y desarrollar su capacidad de observación y análisis, cosa que con frecuencia se olvida. Para lograr ese objetivo el profesor tiene que jugar un papel no solo informador sino también orientador, cuyo desempeño depende de su preparación, y por eso los cursos de actualización del profesorado son muy importantes. Al nivel de posgrado la actualización es casi automática dado el grado de especialización de los cursos. Por eso las reflexiones que hago a continuación están orientadas hacia los cursos básicos de física de nivel terciario o universitario.

En primer lugar es fundamental que los estudiantes reconozcan que la física es una ciencia basada en la observación, la experimentación y la medición, las cuales tienen sus limitaciones, determinadas por las técnicas usadas y sus grados de resolución y precisión. Así mismo los estudiantes deben entender que el propósito general de la física (así como el de otras ciencias) es analizar las correlaciones observadas en los eventos y fenómenos, expresarlas en forma cuantitativa, formulando modelos, conceptos operacionales, principios generales, leyes de conservación y ciertas reglas que se aplican a casos específicos, que en lo posible deben tener valor predictivo además de explicativo. En consecuencia la física es una ciencia que cambia y avanza según mejoran los métodos de observación, experimentación y medición y surgen nuevas ideas, lo cual requiere a su vez revisar conceptos y leyes ya establecidos. En consecuencia se hace necesario ajustar con cierta regularidad los contenidos y la didáctica de los cursos de física.

Pero ¿por qué es tan necesario actualizar la enseñanza de la física cuando se pueden hacer ajustes puntuales? La razón es muy simple. Durante el siglo XX se

produjo una extraordinaria revolución conceptual, concertada con un progreso en los métodos de observación, experimentación y medición, producto en parte de los avances científicos y sus aplicaciones tecnológicas. Esta revolución alteró profundamente nuestra concepción del universo, y nos llevó a un modelo holístico e integrado del mundo físico (y también del biológico) basado en un modelo microscópico de la materia y la radiación. Este modelo es muy diferente del que existía en el siglo XIX, asociado con nuestras impresiones sensoriales, que son de carácter macroscópico y no muy interconectadas. No obstante el modelo del siglo XIX es aún la base para la estructura de los cursos generales de física, que en términos generales tienen un enfoque macroscópico. Por tanto el reto es cómo poner la orientación y el contenido de los cursos básicos de física en el siglo XXI en consonancia con el modelo del mundo físico desarrollado en el siglo XX, lo que requiere mucho más que ajustes puntuales. Esto a su vez permitirá una mayor integración con los cursos de química y biología, en los que también se han hecho esfuerzos de actualización, en cierta medida bajo la influencia de la física del siglo XX.

¿Por qué es tan necesario actualizar la enseñanza de la física cuando se pueden hacer ajustes puntuales? La razón es muy simple. Durante el siglo XX se produjo una extraordinaria revolución conceptual.

El modelo del mundo físico desarrollado durante el siglo XX, que culminó con la formulación del llamado Modelo Estandar, constituyó una extraordinaria síntesis y unificación del mundo físico al nivel fundamental o micro, en contraste con la diversidad y la complejidad que percibimos al nivel macro. Aunque el modelo es bien conocido, a riesgo de una gran simplificación se puede resumir en los siguientes puntos: (1) el universo está compuesto por unidades distinguibles o "partículas", con propiedades bien definidas (masa, carga eléctrica, espín, etc), que al nivel fundamental son simples (leptones y quarks) o combinaciones (moléculas, átomos, núcleos, hadrones). (2) el universo es dinámico y todo lo que ocurre es consecuencia de las interacciones entre las "partículas" (que suponemos son fuerte, electro-débil y gravitación), que se describen en términos de "campos". (3) estas interacciones permiten que existan agregados o "sistemas" de partículas, que pueden consistir desde

unas pocas partículas hasta los sistemas macroscópicos o cuerpos que observamos directamente a nuestro alrededor o con telescopios (planetas, galaxias, etc). (4) la metodología de análisis de un sistema o de un fenómeno depende del nivel de resolución o desagregación a que se hace el análisis (micro, meso, o macro) pero la fenomenología a todos los niveles está relacionada necesariamente.

Se debe evitar seguir hablando de física clásica y moderna, reemplazando la visión fragmentada o compartimentalizada que suelen ofrecer los cursos introductorios.

Por supuesto la modalidad de presentación del modelo del universo físico que acabo de resumir depende del nivel de los alumnos, pero en todo caso es necesario que a lo largo del curso los alumnos internalicen el modelo y adquieran una visión coherente, que integre los distintos niveles de resolución a que aludimos antes. O sea, se debe evitar seguir hablando de física clásica y moderna, reemplazando la visión fragmentada o compartimentalizada que suelen ofrecer los cursos introductorios, en los que la física aparece dividida en las secciones tradicionales, por una visión que integre la física a los niveles micro, meso y macro, cada uno de los cuales requiere una metodología diferente. Varios esfuerzos importantes se han hecho en esa dirección.

Conviene tener presente que los estudiantes, a través de revistas, libros, juegos de video y televisión, están familiarizados con muchas ideas y terminología de la física del siglo XX, que además las estudian en química y en biología, aunque no las entiendan con precisión: moléculas, átomos, núcleos, electrones, fotones, aun quarks. Por ello una regla general de actualización es introducir a lo largo del curso de física, según sea apropiado, ejemplos al nivel micro, relacionados con la estructura atómica de la materia, pero siempre tratando de relacionarlos con la fenomenología al nivel macro. Esto se puede hacer sin dificultad en dinámica, termodinámica y electromagnetismo, en los que tradicionalmente se han ignorado esos temas, que quedan relegados al final del curso. (Los profesores no debemos olvidar que los alumnos están conscientes que vivimos en el mundo de los lasers, los transistores, los chips, las cámaras digitales, la energía nuclear, etc).

La revolución conceptual en física en el siglo XX a que me referí al comienzo tuvo tres componentes principales que

están muy relacionados y por ello no se deben enseñar como capítulos separados: la teoría de la relatividad, el modelo nuclear del átomo, y la mecánica cuántica. Obviamente el estudio a fondo de estas tres grandes ideas no corresponde a un curso introductorio pero es necesario familiarizar a los alumnos con ciertos aspectos fundamentales, tratando en alguna forma temas relacionados con relatividad y procesos a altas energías, con mecánica cuántica, con física del estado sólido (conductores, semiconductores, aisladores), y con física nuclear. El modelo nuclear del átomo y sus implicaciones en relación con la estructura de la materia, deben aparecer a lo largo de todo el curso, aunque algunas se releguen al final del curso al tratar de propiedades específicas de los núcleos, como son la radiactividad y la fisión nuclear (tener presente que el modelo nuclear es fundamental en química y biología).

Uno de esos temas que todavía no se ha incorporado en los cursos introductorios es el de los procesos no lineales, que se manifiestan principalmente en dinámica y electromagnetismo.

En el caso de la relatividad, se pueden introducir algunas ideas en dinámica al tratar problemas de grandes velocidades y energías, lo que da a entender a los alumnos que el formalismo para analizar el movimiento depende de la velocidad y la energía de la partícula. Al hablar del movimiento relativo y la transformación de Galileo, se puede explicar también la transformación de Lorentz, que muestra la conexión entre el espacio y el tiempo (incidentalmente los nombres los inventó Einstein), porque ambas transformaciones ilustran un principio de invarianza, lo que es muy importante en física. Algo se puede decir en relación con la teoría general de la relatividad; es posible señalar que el campo gravitatorio producido por un cuerpo afecta la métrica del espacio-tiempo con las consecuencias que sabemos (desviación de un rayo luminoso, medida del tiempo usando satélites, comunicaciones usando el "Global Positioning System" o GPS), que con frecuencia se mencionan en los medios de información y que ahora son un tema popular en astronomía y astrofísica.

En relación con la mecánica cuántica, que es el formalismo de la micro-física, considero se deben introducir algunos temas básicos (cuantificación del *momentum* angular y de la energía, niveles de energía, etc) a lo largo del curso, a lo que añado que recomiendo evitar a este nivel consideraciones de carácter filosó-

fico. Tampoco los alumnos deben tener la impresión que la mecánica cuántica reemplaza a la dinámica formulada por Newton ya que los dos formalismos son complementarios, cada uno con su rango de aplicación. Ese es el caso, por ejemplo, de un haz de electrones en un tubo de televisión o de partículas cargadas en un acelerador, usando las leyes del movimiento de Newton para la aceleración de las partículas y la mecánica cuántica cuando las partículas interactúan con el blanco.

Una regla general de actualización es introducir a lo largo del curso de física, según sea apropiado, ejemplos al nivel micro, relacionados con la estructura atómica de la materia.

La actualización requiere no solo una revisión conceptual sino también incorporar temas nuevos que han adquirido importancia especial. Uno de esos temas que todavía no se ha incorporado en los cursos introductorios y que es muy importante porque corresponde a la realidad física es el de los procesos no lineales, que se manifiestan principalmente en dinámica y electromagnetismo. Los voy a examinar brevemente sin entrar en detalles. Es importante que los alumnos entiendan que en general una partícula está sometida a múltiples acciones que no se pueden expresar en una forma sencilla, aunque una pueda ser dominante (gravitación, electromagnética). En estos casos se puede explicar que hay que añadir en la ecuación del movimiento, $md^2x/dt^2 = F$, donde F es la fuerza dominante, términos empíricos relacionados con el desplazamiento o la velocidad, y que por ello la ecuación del movimiento se expresa en la forma empírica general

$$md^2x/dt^2 = F + \sum_n a_n x^n + \sum_n' b_n' (dx/dt)^{n'} + \sum_{nm} c_{nm} x^n (dx/dt)^{n'}$$

donde F es la fuerza dominante y los coeficientes a, b, c se obtienen experimentalmente aunque en algunos casos es posible calcularlos a partir de primeros principios (eg, ley de Stokes). La expresión anterior no es tan compleja como puede parecer y los estudiantes la entienden cuando va acompañada de una explicación motivadora del profesor, señalando que la primera suma corresponde a una fuerza "conservativa" y las otras dos a fuerzas "disipativas". La ecuación sirve para que los estudiantes comprendan que en el mundo real los movimientos son bastante complejos, a veces inestables, con el resultado de que la ecuación del movimiento no es lineal, como es el caso de un péndulo o el de las vibraciones

moleculares cuando la amplitud es grande, y su solución requiere usar técnicas de computación. (Lamentablemente esta situación ha dado lugar a ciertas consideraciones que resultan confusas a los estudiantes, como es el llamado "caos" dinámico).

La otra situación de no linealidad que se debe presentar a los alumnos porque ilustra la conexión entre los niveles micro y macro, y por su importancia y sus implicaciones tecnológicas con el advenimiento de lasers intensos y la transmisión de señales por fibras ópticas, es la acción de un campo eléctrico sobre un material. Lo tradicional ha sido expresar la polarización eléctrica P , que es la respuesta de un material a un campo eléctrico E , como $P = \epsilon_0 \chi E$, y suponer que la susceptibilidad eléctrica χ , que es un coeficiente macroscópico, es independiente de la magnitud de E . En la práctica no es así y se debe explicar a los estudiantes que la acción de un campo eléctrico no solo produce una orientación de los dipolos eléctricos permanentes e inducidos, sino que afecta la dinámica de los electrones en los átomos o moléculas en forma que depende de la intensidad del campo eléctrico, como es muy fácil de demostrar, y por tanto $\chi = \chi_0 + \chi_1 E + \chi_2 E^2 + \dots E^n$ consecuencia se debe aclarar que la permitividad o "constante"

dieléctrica $\epsilon = \epsilon_0(1+\chi)$ y el índice de refracción $n^2 = 1 + \chi$ también dependen de E , lo que afecta la propagación de una señal EM, dando lugar a varios efectos no lineales bien conocidos (Pockels, Kerr, birrefringencia no lineal, deformación de pulsos, etc.), algunos con importancia práctica. Lo esencial, repito, es que los estudiantes reconozcan que la respuesta de un medio a un campo eléctrico no es lineal porque afecta la dinámica de los electrones en las moléculas del medio y que esto se manifiesta en las propiedades macroscópicas del medio.

Un punto final a considerar es que no solo es necesario actualizar los cursos de física armonizando el análisis de sistemas a los niveles micro-, meso- y macro-, sino que es necesario establecer nexos entre física, química y biología, que son ciencias muy ligadas. Por supuesto es responsabilidad de cada profesor decidir cómo puede hacerlo. Pero esto lleva a otros retos a los que no es fácil hacerles frente. Por un lado los estudiantes tienen una capacidad limitada para absorber nuevos conocimientos, a lo que hay que añadir que muchas veces llegan a la universidad sin una preparación adecuada. Por el otro, la física cada vez tiene mas importancia en otras ciencias y en la ingeniería, lo que exige preparar los alumnos para esa eventualidad sin abru-

marlos con detalles técnicos. Finalmente el profesor dispone de tiempo limitado para desarrollar el curso, de modo que no se pueden añadir nuevos temas sin eliminar otros, al mismo tiempo que se mantiene una coherencia lógica y se enfatizan los aspectos fundamentales.

Obviamente la actualización tiene que comenzar en los cursos de ciencias generales a nivel primario y continuar en los cursos a nivel secundario, hasta llegar al curso de tercer nivel, manteniendo a lo largo una estructura conceptual y una terminología coherentes, lo que requiere una preparación adecuada de los maestros y de material de enseñanza escrito y de laboratorio para esos niveles, teniendo en cuenta no solo la física sino también la química y la biología. O sea hay que hacer una actualización de la enseñanza en sentido "holístico" o integral. Esta es un área en la que pienso que la RSEF y la REF pueden seguir haciendo contribuciones significativas.

Reconozco que en esta exposición no he dicho nada novedoso, pero me sentiré satisfecho si ha servido de motivación para seguir pensando en este tema y buscar soluciones según sea necesario.

Marcelo Alonso

Florida Institute of Technology

Olimpiada Científica Europea

Las Reales Sociedades de Física, de Química, y ANQUE, convocan a todos los Centros de Educación Secundaria, a participar en la Olimpiada Científica Europea 2004 (EUSO 2004).

¿Qué es la EUSO?

Una competición europea entre equipos de alumnos de *Primero de Bachillerato* sobre trabajos experimentales de Física, Química y Biología. Véase <http://www.euso.dcu.ie>

¿Quién puede participar? Todos los alumnos de primero de bachillerato (nacidos en 1987) en grupos de tres, preparados por un profesor del área de ciencias, con interés en las experiencias científicas de laboratorio (Física, Química y Biología).

¿Cómo registrarse? La edición del 2004 requiere la inscripción de los equipos en <http://marquesdesuanes.digital-brain.com>

Los equipos registrados recibirán instrucciones del tipo de pruebas a realizar en el laboratorio de su centro.

El informe de los resultados debe ser remitido por correo antes del 10 de Enero 2004.

¿Quién gana? Un jurado multidisciplinar seleccionará 10 equipos con los mejores resultados. Cada uno de estos equipos obtendrá tres premios de 380 € cada uno (uno por alumno) dotado por el MECyD, un diploma acreditativo y derecho a participar, junto con su profesor, en una segunda fase nacional en la Universidad de Murcia entre el 25 y 28 de febrero 2004.

¿Quién representará a España en la EUSO 2004? La competición de los 10 equipos ganadores permitirá seleccionar los 3 equipos de 3 alumnos cada uno que representarán a España en la EUSO 2004 que ha de celebrarse del 2-9 Mayo 2004, en Groningen, Holanda. Estos tres equipos recibirán un premio adicional de 750 € por alumno y los gastos de desplazamiento a la competición europea. Cada equipo de tres alumnos podrá ser acompañado a la competición europea por su profesor preparador, en calidad de mentor (Véase artículo 5.5 del reglamento: www.euso.dcu.ie/constitution.html). El profesor-mentor tendrá cubiertos los gastos de desplazamiento.