

DETERMINISMO VS PROBABILIDAD EN LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

Jordi Solbes

Catedrático de IES "J. Rodrigo Botet". Valencia

Abstract: Time to teach physics is nowadays reduced. On account of it selection of contents by importance and interes for the students is essential. Ideas such as determinism, reversibility and probabilmism combine both characteristics. In this paper it is shown how to introduce them at baccalaureate physics.

1.- INTRODUCCIÓN

Matthews, uno de los autores de un informe nacional sobre la situación de la enseñanza de las ciencias en los EEUU, señala que pocos alumnos aprenden Física y que muchos la abandonan en la primera oportunidad que se les presenta. En consecuencia, en los países avanzados (EEUU, Reino Unido, Holanda, Francia, etc.) se está produciendo una disminución en los alumnos que eligen la Física en la Secundaria y, en consecuencia, de los licenciados en física y de los futuros profesores de esta materia en secundaria (Editorial REF 1991). Incluso en el Reino Unido han llegado a cerrar Facultades de Físicas.

En nuestro país estamos muy tranquilos porque parece suceder todo lo contrario. Hay muchos alumnos en Físicas, hay licenciados en paro, etc. Por ello no somos conscientes de que los problemas de los otros países han quedado enmascarados en el nuestro porque esta llegando la generación del "boom" de la natalidad a la Universidad y porque en BUP y COU los estudiantes, al tener pocas opciones, siguen eligiendo la Física. Pero en la LOGSE la Física y Química es optativa en 4º de Enseñanza Secundaria Obligatoria con lo cual es escogida por menos alumnos que en 2º de BUP y de Formación Profesional I, donde era obligatoria. También, aunque en COU es mayoritaria la opción de Ciencias, en LOGSE ha disminuido el número de alumnos que escogen el Bachillerato de ciencias de la naturaleza y de la salud (un 35.9% en la Comunidad Valenciana), frente al 54.2% que eligen el Bachillerato de humanidades y ciencias sociales (tres cuartas partes de ellos en la opción B relacionada con Económicas, Empresariales). Los otros dos bachilleratos, el tecnológico con un 7% y el artístico con un 2.9% son minoritarios. Por último, en el 2º curso del Bachillerato de ciencias también ha disminuido el número de alumnos que esco-

gen Física (un 64.1% en la Cdad. Valenciana, frente al 90.7% que escogen Química o el 81.7% Biología) (Solbes, Calvo y Pomer 1994). En resumen, cuando en el 2002 se haya implantado completamente la LOGSE y haya pasado la generación del "boom" veremos qué sucede con la enseñanza de la Física en nuestro país.

¿Qué soluciones se están planteando al respecto en los países avanzados? En un número monográfico reciente, la revista *Physics Education* (VV.AA. 1996) analiza el informe Dearing para la reforma del curriculum de la Física en secundaria, criticando su academicismo y la inclusión de nuevos contenidos. Propone, por el contrario, introducir aspectos atractivos, de actualidad, entre los que se menciona la física moderna, la naturaleza de la física y sus relaciones con la tecnología y la sociedad.

El prof. Alonso (1992) realiza la misma propuesta para los cursos universitarios de Física, actualizar contenidos. Pero el tiempo para impartirlos permanece constante o disminuye (como en el caso de la LOGSE o de los nuevos Planes de estudio universitarios). Esto implica que no se pueden conservar los contenidos anteriores e introducir los nuevos, por más que nos duela a los profesores de Física. En efecto, el aprendizaje significativo requiere tiempo, tratamiento en profundidad y, por ello, es necesario *seleccionar los contenidos* teniendo en cuenta el número de horas disponibles.

¿Y qué soluciones se proponen en nuestro país? La Física del Bachillerato LOGSE ha realizado una selección de contenidos respecto a los inabordables temarios de Física de 3º de BUP y COU. Aunque no olvidemos que eran tan extensos porque en el planteamiento inicial la Física y Química de 3º de BUP estaban concebidas como dos asignaturas diferentes. Y aunque no se ha conseguido que la Física y Química de 1º de Bachillerato estén separadas, como en todos los países de nuestro entorno europeo, si se ha procurado ajustar el temario al tiempo disponible. Para ello, se han introducido únicamente los conceptos más básicos y generales, es decir, aquellos que reflejan problemas fundamentales de la materia, capaces de integrar los nuevos conocimientos y de gran aplicabilidad en distintos contextos. Por último, se ha procurado actualizar la Física y hacerla más interesante para los estudiantes y profesores mediante la inclusión de los temas transversales "Aproximación al trabajo científico", "Física, Tecnología y Sociedad (FTS)" y un tema de "Introducción a la Física moderna", que incluye ideas de relatividad, cuántica y física nuclear (Real Decreto sobre el currículo de Bachillerato, 1992). Sin embargo, esto es la legislación. La práctica está muy condicionada por las pruebas de acceso y, aunque en ellas sea difícil generalizar dada la variedad de currículos autonómicos y de distritos universitarios, en las Pruebas de Acceso a la Universidad (PAU) se comprueba que se están primando los contenidos más clásicos en detrimento de los trabajos prácticos, las relaciones FTS e incluso la Física moderna (la relatividad prácticamente no aparece, hay autonomías como Cataluña que no incluyen tópicos sobre Física moderna).

Y aunque cada uno de los temas mencionados merecería un artículo, nos limitaremos a recordar que recientemente la revista de didáctica de las ciencias experimentales *Alambique* ha dedicado sendos números monográficos "La educación Ciencia-Tecnología-Sociedad" (VV.AA., 1995) y a "Avances de la ciencia en el currículum" (VV.AA. 1996). Aquí nos centraremos en la introducción de ideas importantes (determinismo y probabilidad), que además de ser interesantes para el estudiante, pueden aumentar su comprensión del tema "Introducción de la Física moderna" y también de la Física clásica.

2.- LA ENSEÑANZA DEL DETERMINISMO Y LA PROBABILIDAD EN LA FÍSICA DEL BACHILLERATO

Las principales características de la Física clásica son la legalidad, el determinismo y la reversibilidad (Prigogine 1990). Sin embargo, en la Física del Bachillerato sólo se introduce claramente la legalidad. Los estudiantes ven constantemente que los fenómenos naturales son descritos por leyes cuantitativas. Posiblemente es una de las pocas cosas que les queda claras. Claridad que puede degenerar en una patología, el "formulismo", es decir, reducir el cuerpo vivo de la física a: "Profesor, ¿qué fórmula aplico?".

Por el contrario, aunque constantemente se esten usando leyes físicas, apenas se menciona explícitamente su carácter determinista y reversible. Y no sería nada costoso hacerlo. Bastaría ver como las ecuaciones de movimiento (Movimiento Rectilíneo Uniforme, Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado, etc.) y el estado inicial determinan el estado del sistema en cualquier otro instante. En ello reside la base del determinismo clásico, doctrina que afirma que si se conoce el estado presente de un sistema y su ley de fuerzas es posible predecir con exactitud el resultado de cualquier medida sobre el mismo (Calatayud M.L. et al 1995).

Respecto a la reversibilidad, no es objeto de este trabajo, pero se pueden sugerir algunas pistas para introducirla. Habría que decir en el tema sobre "La energía y su transferencia: trabajo y calor", que la mecánica define como equivalentes las transformaciones en las que se invierte el sentido de recorrido del tiempo (o, lo que es equivalente, la inversión de velocidades). Pero en la naturaleza hay procesos que evolucionan en un sólo sentido que se denominan procesos irreversibles. Si los vemos en una película en sentido contrario (por ej., una copa rota en el suelo que se reconstruye y asciende), sabemos que la evolución se está produciendo hacia atrás en el tiempo. Esto permite señalar que dichos procesos se realizan en el sentido en que se degrada la energía, estableciendo así la imposibilidad de transformar completamente calor en trabajo (Calatayud M.L. et al 1995) y, en consecuencia, una flecha del tiempo. En otras palabras, esto permite introducir el 2º principio de la Termodinámica aunque no aparezca en el Real Decreto (1992), y hacerlo además sin mencionar la entropía.

En lo que concierne a las leyes de tipo probabilista no se introducen en el Bachillerato, aunque en la Física aparecen tres rupturas con el determinismo, que enunciaremos brevemente siguiendo a Fdez-Rañada et al (1993):

- En primer lugar, en la teoría cinética y la mecánica estadística, donde las leyes probabilistas se consideran "un método conveniente de cálculo... para reducir a proporciones manejables de datos que, a nivel fundamental, siguen leyes deterministas"
- En 2º, en la teoría cuántica "que gobierna el mundo de los átomos, las moléculas y los núcleos, cuyas leyes básicas son intrínsecamente probabilistas"
- En 3º, en el movimiento caótico, donde hay sensibilidad fuerte a las condiciones iniciales por lo que cuando el sistema evoluciona "las variables que caracterizan su estado cambian de modo complejo y errático... Como los errores aumentan, llega un momento en que cualquier predicción deja de ser fiable".

La física del Bachillerato no introduce ni la teoría cinética ni el movimiento caótico, con lo cual el único tema en el que se pueden tratar las leyes probabilistas es de "Introducción a la Física Moderna". Pero, según hemos podido observar en los nuevos libros de texto para el Bachillerato, esta introducción se hace de una forma muy axiomática, a partir del postulado de Born. Por ello, vamos a proponer un procedimiento para introducir el probabilismo en el tema de física moderna que favorezca su comprensión por parte del alumnado. En concreto, es muy conveniente introducirlo en todas las ocasiones en que esto sea posible, lo que permitiría entender (y no sólo memorizar) la interpretación probabilista de Born.

3.- INTRODUCCIÓN DE LAS IDEAS BÁSICAS DE FÍSICA CUÁNTICA

Para ello, conviene comenzar mostrando el hilo conductor del tema de Física cuántica en el que se enmarca la propuesta (Gil y Solbes 1993, Solbes y Tarín 1996). Y esto por dos razones. En primer lugar, para evidenciar que no es tan difícil introducir en el bachillerato una teoría que dentro de muy poco va a celebrar su centenario y, por ello, resulta difícil comprender que aún se siga cuestionando su introducción, como hemos podido ver en el primer apartado de este trabajo (la relatividad prácticamente no aparece en las PAU, hay autonómicas que no incluyen tópicos sobre física moderna).

En 2º lugar, porque conviene hacer notar como las ideas introducidas en el Bachillerato a partir de observaciones y experimentos, la cuantización, el comportamiento cuántico de los fotones, electrones, etc. y el probabilismo, constituyen las principales ideas de la física cuántica y permiten dar respuesta a sus

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

Por ello proponemos iniciar el estudio de los fenómenos cuánticos con dos de los problemas que originaron la crisis de la física clásica: el efecto fotoeléctrico y la existencia de espectros atómicos.

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

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

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

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

4.- EL COMPORTAMIENTO PROBABILISTA EN FÍSICA CUÁNTICA

La idea de cuantización puede que resulte más evidente para los alumnos. Se introduce reiteradamente en la física: la cuantización de la materia y de la radiación, el carácter discontinuo de magnitudes como la energía y el momento angular al estudiar el modelo de Bohr. Pero como hemos señalado anteriormente, la existencia de leyes probabilistas es menos evidente. Por ello, en este apartado vamos a mostrar una serie de ocasiones que en el tema de "Introducción a la física moderna" nos permiten introducir el comportamiento probabi-

lista, así como una serie de prerequisites que hay que introducir en otros temas (Solbes y Tarín 1996).

Entre estos prerequisites mencionaremos los siguientes: en el tema de "Movimiento ondulatorio" mostraremos que la intensidad de la onda es proporcional al cuadrado de su amplitud y en el tema de "Óptica", la ley de Malus al estudiar la polarización y que la intensidad de la radiación es proporcional a la amplitud al cuadrado del campo eléctrico.

4.1.- Efecto fotoeléctrico

Einstein los explica suponiendo que la radiación está constituida por fotones o cuantos de energía $h\nu$ y, por ello, la intensidad luminosa es $I = nh\nu$, siendo n el número de fotones incidentes por unidad de tiempo y de superficie. Con esta nueva hipótesis puede darse una fácil explicación a los diferentes resultados experimentales, explicación que no puede proporcionar la física clásica que supone distribuida uniformemente la energía en el frente de ondas. También es interesante comprobar el gran número de fotones (por m^2 y s) que constituyen la radiación electromagnética, lo que explica su apariencia continua.

4.2.- Relaciones de indeterminación de Heisenberg

Como ya hemos visto, la Mecánica clásica permite, si conocemos la ecuación de movimiento $r=r(t)$ y el estado del sistema en un instante dado determinar el estado en cualquier otro instante (determinismo clásico).

A continuación hay que mostrar cualitativamente, a partir del carácter ondulatorio del electrón, que no es posible determinar simultáneamente su posición x y su cantidad de movimiento p_x en cualquier instante, es decir, su movimiento a lo largo de una trayectoria. El razonamiento anterior debe dejar claro que el problema no es determinar con precisión la posición del electrón, dado que nada prohíbe un estado de movimiento para el que la posición se conoce con altísima precisión, sino la imposibilidad de determinar simultáneamente con precisión absoluta la posición x y la cantidad de movimiento p_x del electrón, señalando que los límites de dicha precisión vienen dados por las relaciones de indeterminación de Heisenberg.

Un aspecto de las relaciones de indeterminación menos conocido en el Bachillerato es que se pueden preparar los sistemas de forma que se puede medir simultáneamente p_x y p_y con una imprecisión tan pequeña como se quiera para ambos. Su importancia reside en que nos permiten averiguar el conjunto de todas las magnitudes compatibles que caracterizan el estado de un sistema, es decir, todas aquellas que se pueden determinar simultáneamente. Así, por ejemplo un electrón libre vendrá caracterizado por (P_x, P_y, P_z, S_z) , un electrón ligado en un átomo hidrogenoide por (E, L^2, L_z, S_z) , como se puede ver al estudiar orbitales atómicos.

Es conveniente realizar algún ejercicio numérico para mostrar que la indeterminación para los objetos macroscópicos es absolutamente despreciable frente al tamaño del objeto, al contrario de lo que sucede en los microscópicos, como el electrón, donde la indeterminación de x es billones de veces superior al tamaño atribuido experimentalmente. La razón de esto es la pequeñez de h , que hace que los resultados del principio de indeterminación quedan fuera de los límites de nuestras experiencias ordinarias (aunque hay fenómenos macroscópicos, como el láser, dispositivos microelectrónicos, superconductores, etc., a los que se aplica la cuántica). Es decir, las relaciones de indeterminación establecen los límites más allá de los cuales no se pueden aplicar los conceptos de la Física clásica. En este tipo de actividades, algunos textos, tratan las relaciones de Heisenberg como una ecuación entre magnitudes, olvidando que se trata de unas relaciones entre las indeterminaciones de las magnitudes.

También hay que comentar que la indeterminación no puede considerarse fruto de la imprecisión de los instrumentos y técnicas de medida utilizados y no es subsanable en la medida en que dichos instrumentos y técnicas se perfeccionan.

En resumen, las implicaciones de las relaciones de indeterminación son:

- La imposibilidad del conocimiento simultáneo de x y p .
- Consecuentemente, el concepto de trayectoria deja de tener sentido.
- El establecimiento de los límites de validez de la Física clásica.

4.3.- La función de ondas y la interpretación probabilista

En la Mecánica clásica el estado de movimiento de una partícula en un instante determinado queda descrito por su posición r y su velocidad v (o cantidad de movimiento p) y, en cualquier instante, por su ecuación de movimiento $r=r(t)$. Análogamente, el estado en un instante determinado de una onda viene dado por su amplitud, su longitud de onda y su frecuencia y, en cualquier instante, por su ecuación de onda $E=E(r,t)$ (p.e., una onda armónica plana). Pero como los fotones, los electrones, etc., no son ni simplemente ondas ni simplemente partículas, se necesita un modelo más general para describir su comportamiento. Así como la ecuación de un movimiento se obtiene a partir de la ecuación de Newton, para obtener la función de ondas o de estado desconocida, debe resolverse una ecuación, denominada ecuación de Schrödinger. Esta función planteó el problema de determinar su significado, que fue resuelto por Born en 1926 apoyándose en consideraciones análogas a las siguientes. Como hemos visto en temas anteriores, la intensidad de una onda luminosa es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico $I \propto E^2$ y que según Einstein es proporcional al número de fotones por unidad de tiempo y de superficie $I \propto n$, en consecuencia, $E^2 \propto n$, es decir, el cuadrado de la amplitud es proporcional al número de fotones. Si tratamos con haces luminosos pocos inten-

sos, con un solo fotón, es evidente que E^2 constituye una medida de la probabilidad de que haya un fotón. Donde E^2 sea grande, habrá una gran probabilidad de que se encuentre el fotón.

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

También podemos pedirles a los estudiantes que interpreten fotografías de diagramas de interferencia, con diferentes tiempos de exposición, en las que se observa la construcción progresiva de franjas de interferencia de apariencia continua a partir de impactos discretos. Esto pone de manifiesto el carácter corpuscular de los fotones y, por otra parte, su comportamiento probabilista, dado que donde la intensidad sea grande, habrá una gran probabilidad de que incidan fotones.

4.4.- Periodo y velocidad de semidesintegración

Este es un ejemplo más del carácter probabilista de los fenómenos cuánticos. En una muestra de isótopos radiactivos no podemos predecir cuando se desintegrará un núcleo dado. Sólo podemos determinar la probabilidad por unidad de tiempo de que se desintegre un núcleo cualquiera. Esta probabilidad viene dada por el cociente entre el número de átomos que se desintegran dN y el n° de átomos presentes N .

5.- CONCLUSIONES

En estos momentos de reducción del tiempo para enseñar física en todos los niveles (secundaria y universidad) es muy importante seleccionar contenidos. Un buen criterio es que los contenidos sean importantes para la propia disciplina, pero otro es que esos contenidos puedan ser interesantes para los alumnos. Las ideas mencionadas de reversibilidad, determinismo, probabilismo, etc., pensamos que reúnen ambas características. Pero si un concepto, ley, etc. merece ser seleccionado, merece ser bien enseñado y, por ello, es conveniente que se use más de una vez y, a ser posible, en diferentes contextos. Esto es lo que hemos intentado realizar con el comportamiento probabilista característi-

co de la cuántica. Sólo así se puede conseguir un aprendizaje significativo de las relaciones de indeterminación y de la interpretación probabilista. Si nos limitamos a enunciarlos sólo conseguiremos un aprendizaje meramente memorístico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, M., Actualizando el curso de física general, *Revista Española de Física*, 6(3), p. 32-35.
- CALATAYUD, M.L. et al, 1995, *Física y Química 1º Bachillerato*, Octaedro: Barcelona.
- EDITORIAL, 1991, La profesión del físico, *Revista española de Física*, 5(3), 3.
- FDEZ-RAÑADA, A., et al, 1993 y 1997, *Física básica 1 y 2*, Alianza: Madrid.
- GIL, D. & SOLBES, J., 1993. The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. *International Journal of Science Education*, 15 (3), 255-260.
- PRIGOGINE Y STENGERS, I., 1990, *La nueva alianza*, Alianza: Madrid.
- REAL DECRETO 1179/1992, de 2 de Octubre, por el que se establece el currículo de Bachillerato (BOE nº 253 de 21 de Octubre de 1992).
- SOLBES J., CALVO A. Y POMPER, F., 1994, El futuro de la enseñanza de la física, *Revista española de Física*, 8(4), 45-49.
- SOLBES J. Y TARIN F., 1996, *Física 2º Bachillerato*, Octaedro: Barcelona.
- VV.AA., 1996, Rethinking post-16 physics, *Physics Education*, 5, 265-309.
- VV.AA., 1995, La educación Ciencia-Tecnología-Sociedad, *Alambique*, nº 3, 3-73.
- VV.AA. 1996, Avances de la ciencia en el currículum, *Alambique*, nº 10, 7-89.