

Dificultades en la enseñanza/aprendizaje de la Física Cuántica

J. Solbes

I. B. Camp de Morvedie, Valencia

J. Bernnabeu, J. Navarro y V. Vento

Facultat de Física, Universitat de Valencia

(Recibido el 15 de septiembre de 1987)

Resumen

Se ha elaborado un cuestionario sobre una selección de conceptos básicos de Física Moderna, mediante el cual se ha analizado su grado de comprensión por estudiantes antes de abordar la asignatura de Física Cuántica del 3^{er} curso de Licenciatura. Se ha seguido la evolución de la comprensión de los conceptos anteriormente erróneos después de haber completado esos estudios. Si bien se detecta una considerable mejora con una enseñanza que tiene en cuenta los errores previos típicos, persiste un remanente apreciable de algunos errores conceptuales adquiridos durante la enseñanza no universitaria.

Abstract

We have elaborated a questionnaire about some selected basic concepts on Modern Physics. We have then analysed the students comprehension level on Quantum Physics before they follow this matter in the 3^{er} year of Physics studies. Once this course has been completed, the evolution of the previous misconceptions is studied. We conclude that a teaching which considers previous misconceptions results in a sensitive improvement. However, we also detect the persistence of a few misconceptions acquired during the non-university teaching.

I. Introducción

En muchos países, incluidos los de mayor tradición científica, el contenido de la Física moderna en los distintos niveles de enseñanza, sigue siendo muy escaso, a pesar de los más de sesenta años transcurridos desde su surgimiento y su rápido desarrollo. Esto contrasta con lo que sucede en otras materias, como la Química o la Biología, en donde las nuevas teorías sustituyen a las anteriores en gran parte. Este no es el caso de la Física, pues las concepciones clásica y cuántica coexisten, aunque el dominio de esta última contenga al de la primera. En España desde los años 60 se han introducido en los diversos niveles de enseñanza hechos y conceptos de la Física surgida en este siglo XX. Por ejemplo, se introducen conceptos de Física moderna en la enseñanza secundaria e, incluso algunos elementos del modelo cuántico del átomo en el ciclo superior de la EGB. O bien, la asignatura de Física cuántica ha aparecido explícitamente en el tercer curso de los

planes de estudio de la licenciatura en Ciencias Físicas vigentes desde la década de los 70. Esto plantea el problema de determinar cuál será la mejor forma de introducir el nuevo paradigma: bien como contraposición a las ideas clásicas, siguiendo así el proceso histórico; o bien, por el contrario, presentando resultados ya establecidos, dejando la confrontación para una etapa posterior cuando la formación adquirida esté más consolidada.

En este sentido, hay que tener en cuenta las recientes aportaciones de la investigación didáctica, que han probado suficientemente la existencia de ideas y esquemas conceptuales previos en los alumnos, así como la necesidad de tenerlos en cuenta si se quiere desarrollar una enseñanza consecuente que favorezca en los alumnos un aprendizaje significativo de las ciencias /1,2,3/.

Esto tiene particular interés porque en otros trabajos /4,5,6,7/, se ha puesto de manifiesto cómo la introducción de los conceptos de la Física Moderna en las EEMM y del modelo cuántico del átomo desde 80 de EGB a 10 de Facultad es, en muchos casos, una introducción lineal y desestructurada en la que simplemente se yuxtaponen (o incluso se mezclan) las concepciones clásicas y modernas, sin mostrar la existencia de una ruptura entre ambas. En efecto, ni los textos ni los profesores; suelen aclarar la existencia de los problemas que originaron la crisis de la Física clásica, ni tampoco suelen mostrar las diferencias entre la visión clásica y la moderna sobre el comportamiento de la materia, ni los límites de validez de la clásica, perjudicando, por tanto, la correcta comprensión de ambas. Incluso suelen incurrir en errores conceptuales e interpretaciones incorrectas en torno a los conceptos clave de la Física moderna.

(1) I.B. Camp de Morvedre y Coordinador de la Reforma de las EEMM, / Valencia.

(2) Facultat de Física, Universitat de Valencia.

El primer objetivo que abordaremos en este trabajo es analizar el grado de comprensión que alcanzan los al...menos, antes de abordar la asignatura de Física Cuántica en el 30 de Físicas, sobre algunos conceptos básicos tanto clásicos -en particular, aquellos de uso más frecuente en cuántica- como cuánticos y tratar de detectar los errores conceptuales con que llegan. Dado que esta investigación se aplica a alumnos que han finalizado el 20 curso de Físicas, con un formación básica en Física Clásica y divulgativa en Física Moderna. esperamos que alcancen una comprensión aceptable de los conceptos clásicos básicos y más deficiente en lo que respecta a los conceptos de la Física Moderna. Por otra parte, puesto que la existencia de errores conceptuales en los distintos dominios científicos es un fenómeno perfectamente verificado por la didáctica de las ciencias, esperamos lógicamente

encontrar que los alumnos incurran en una serie de errores conceptuales no sólo en lo que concierne a algunas ideas cuánticas, sino también en ideas clásicas.

Estas consideraciones permiten avanzar una respuesta a nuestro problema inicial de determinar cuál será la mejor forma de introducir las nuevas ideas. En efecto, en el estudio de la Física Cuántica el alumno se enfrenta, por primera vez, de una forma sistemática, con las ideas clásicas que hasta entonces han formado la base de su conocimiento e intuición (por ejemplo, debe abandonar el determinismo, tan ligado a su forma usual de razonamiento en el nivel macroscópico). Es necesario, creemos, plantear una enseñanza que tenga en cuenta tanto los conceptos y errores previos de los alumnos como sus tendencias metodológicas habituales, para producir en ellos cambios conceptuales y metodológicos /2, 8/.

Tabla I

Selección de ítems del cuestionario

1. Un electrón colisiona con otro que está en reposo, y lo pone en movimiento.
 - a) Este proceso no tiene sentido, pues los electrones son muy pequeños.
 - b) Los electrones se comportan como corpúsculos en este proceso.
 - c) Los electrones se comportan como ondas en este proceso.
 - d) Este proceso no es posible, pues no se conserva la energía.
5. Si aceptamos el principio de incertidumbre:
 - a) No se puede medir sin error.
 - b) No se puede medir.
 - c) Cambia el concepto de medida, pues determinadas magnitudes no se pueden medir simultáneamente sin incertidumbre.
 - d) Cambia el concepto de magnitud física, pues por ejemplo, la posición y el momento ya no lo son.
6. Cuando se habla de orbitales electrónicos en los átomos, debe entenderse que:
 - a) Los átomos están constituidos por un núcleo y orbitales, que pueden estar ocupados o no por electrones.
 - b) Los orbitales son zonas del espacio alrededor del núcleo, que los electrones pueden ocupar.
 - c) Los orbitales están asociados a propiedades de los electrones, y no tienen existencia independiente de los mismos.
 - d) Las curvas envolventes de los orbitales representan las posibles trayectorias de electrón en el átomo.
7. Las velocidades típicas del electrón en el átomo de hidrógeno son del orden de $10^7 c$, siendo c la velocidad de la luz.
 - a) Un tratamiento relativista carece de sentido.
 - b) Un tratamiento relativista dará una descripción inadecuada.
 - c) Un cálculo no relativista dará una descripción bastante adecuada.
 - d) El tratamiento a seguir no depende de la velocidad de los electrones.
9. Un cuerpo cae hacia la Tierra bajo la acción de la gravedad.
 - a) Desde cualquier sistema de referencia inercial se observará la misma trayectoria.
 - b) La trayectoria depende del sistema de referencia en que se observe.
 - c) Se puede encontrar un sistema de referencia inercial en el que la partícula esté en reposo.
 - d) Las fuerzas que actúan sobre el cuerpo determinan unívocamente su trayectoria.
10. Al observar el espectro del átomo de hidrógeno, ¿veremos lo mismo desde cualquier sistema de referencia?
 - a) Sí, pues el espectro es una propiedad característica de los átomos.
 - b) No, pues las frecuencias de las bandas espectrales cambian de un sistema de referencia a otro.
 - c) No, porque el espectro no se deriva de las leyes de Newton.
 - d) Sí, porque la física no cambia de un sistema a otro.
12. Una partícula cargada en un campo magnético:
 - a) Se ve sometida a una fuerza.
 - b) No se ve sometida a una fuerza.
 - c) Si la partícula está en movimiento, se ve sometida a una fuerza.
 - d) Como no existen cargas magnéticas (monopolos), aunque esté en movimiento no se verá sometida a una fuerza.
14. ¿Es posible tener sistemas físicos que se comporten como onda y, como corpúsculo en experiencias diferentes?
 - a) No, porque así sólo se comportarán en la misma experiencia.
 - b) No, pues lo prohíbe el principio de incertidumbre.
 - c) Sí, y las experiencias se llaman complementarias.
 - d) Sólo si los sistemas en cuestión son microscópicos.
16. Un electrón se lanza contra un obstáculo impenetrable, lo rodea y aparece detrás de él.
 - a) Este efecto no es posible, pues el electrón es un corpúsculo y no rodeará el obstáculo.
 - b) Este electrón se comporta en esta experiencia como una onda.
 - c) La difracción es un fenómeno exclusivo de la luz, y por ello este efecto no se producirá nunca.
 - d) El electrón es una onda, y por ello se observa el fenómeno de difracción.
19. Un electrón choca contra una pantalla de televisión.
 - a) Su momento puede ser determinado teniendo en cuenta que conocemos su posición en un instante.
 - b) Su momento no puede ser determinado teniendo en cuenta que conocemos su posición en un instante.
 - c) No podemos medir su carga, pues conocemos su posición en un instante.
 - d) No podemos saber si se trata de un electrón, pues conocemos su posición en un instante.
21. El principio de incertidumbre de Heisenberg implica que es imposible determinar simultáneamente y con toda precisión la posición y el momento de una partícula.
 - a) La experiencia cotidiana demuestra que el principio de incertidumbre no es siempre aplicable.
 - b) El principio de incertidumbre sólo es aplicable en el mundo microscópico.
 - c) El principio de incertidumbre implica la pérdida de validez del concepto de trayectoria.
 - d) El principio de incertidumbre implica que la posición y el momento de una partícula no son buenos observables.

Por ello, el segundo objetivo de este trabajo es analizar la evolución de la comprensión de los conceptos antes erróneos cuando los estudiantes hayan completado el curso de Física Cuántica de 3º, impartido según esos criterios. En principio, cabe esperar que se produzcan sensibles mejoras en los estudiantes, aunque no es evidente que se produzca la desaparición de los errores conceptuales. En efecto, los estudiantes pueden muy bien adquirir un dominio razonable de las técnicas operativas de la Física Cuántica y al mismo tiempo persistir en determinados errores conceptuales, algo perfectamente verificado por la didáctica de las ciencias.

II. Diseño experimental

Como objeto de contrastar nuestra hipótesis se ha elaborado un cuestionario siguiendo las técnicas habituales: redacción de un primer borrador de 50 ítems sometido a expertos para su revisión, realización de un ensayo piloto del cuestionario con estudiantes de 5º curso de Físicas, elaboración del cuestionario definitivo, que consta de 22 ítems de elección, múltiple y una cuestión abierta. Es importante recalcar la sencillez del cuestionario, por el carácter básico de los conceptos analizados. En la Tabla I se presentan algunos de los ítems. Tal vez los ítems seleccionados no pongan de manifiesto esta sencillez, dado que su elección se ha hecho por los errores conceptuales que revelan y que serán comentados más adelante.

La distribución en los ítems de las contestaciones correctas y los distractores fue realizada aleatoriamente por ordenador. La validez interna se asegura por la existencia de varios ítems que versan sobre distintos aspectos del mismo concepto, así como la presencia del mismo distractor en varios ítems, para poder constatar la coherencia de las respuestas. Por último, para evitar la aleatoriedad en la elección de los distractores, se advirtió previamente a los estudiantes que podían contestar en blanco. Asimismo, previamente se explicó a los estudiantes la motivación de la encuesta y su carácter voluntario, se les indicó que no se trataba de ningún examen y que no existía límite de tiempo (encontrándose que en ningún caso se superó la hora de plazo), y se les pidió que escribiesen los comentarios y/o sugerencias que creyesen oportunos.

Siete de las cuestiones versan sobre conceptos básicos curso de Física Cuántica, como por ejemplo: sistema de referencia inercial, características de las interacciones, interferencias, origen de energías, etc. El resto trata de conceptos elementales de Física Moderna: límite relativista, espectros atómicos, modelo de Bohr, efecto fotoeléctrico, dualidad onda-corpúsculo, relaciones de indeterminación, valencia, orbitales atómicos, etc.

Para detectar los errores conceptuales que creemos más frecuentes, se han introducido éstos como distractores de los ítems. Se refieren, por ejemplo, a la dualidad onda-corpúsculo (reducirla a un aspecto meramente corpuscular u ondulatorios), el principio de indeterminación (considerar que impide medir con precisión o que la posición y la cantidad de movimiento no son buenos observables o que, al igual que la dualidad, es exclusivo del mundo microscópico), los orbitales atómicos (considerados como

como zonas del espacio independientes de los electrones y que, consecuentemente pueden o no estar ocupados por éstos o como envolventes de las posibles trayectorias del electrón en el átomo),

El cuestionario se aplicó a dos grupos independientes, con objeto de constatar si las tendencias que muestran los resultados son coincidentes en uno y otro, lo que indudablemente reforzaría el valor de los mismos. El cuestionario se pasó en Mayo de 1985 a 63 estudiantes del 2º curso de Físicas de la Universitat de València, a los que denominaremos grupo 1 y en Octubre de 1986 a 96 alumnos del 3º curso de Físicas ($n = 96$), que llamaremos grupo 2. Esto asegura que no hay prácticamente repetidores al haber un curso entre ellos. Finalmente, el cuestionario se pasó en Mayo de 1987 a 58 alumnos del 3º curso de Física; tras series impartida la asignatura de Física cuántica, a los que denominaremos grupo 3. Se trata éste de un subgrupo del grupo 2. La disminución del número de estudiantes se debe, por una parte, a la inveterada costumbre de nuestros estudiantes de abandonar la asistencia a las clases en las cercanías de exámenes parciales y, por otra parte, a que no se pudo pasar la encuesta a uno de los dos grupos en que está dividido el 3º curso de Físicas en la Facultad de Valencia.

III. Análisis de resultados

3.1. Resultados de los grupos 1 y 2

En la Tabla 2 se muestran los porcentajes de respuesta para cada una de las contestaciones posibles con sus correspondientes desviaciones estándar (p , se refiere al grupo 1 y P_2 , al 2). Una simple observación cualitativa de dicha tabla pone de manifiesto que, no hay diferencias importantes en los resultados de ambos grupos, por lo que se pueden considerar como pertenecientes a la misma población, como era de esperar. Se puede realizar una comprobación más rigurosa de este extremo con el análisis estadístico, mediante dos pruebas - cálculo de la χ^2 y de la t de Student- cuyos resultados, también mostrados en la tabla 2, confirman plenamente la idea de que ambos grupos de alumnos pertenecen a la misma población.

En efecto, t de Student obtenida comparando los porcentajes de respuestas correctas de los grupos 1 y 2 en cada ítem, pone de manifiesto que no existen diferencias significativas entre los grupos 1 y 2, ni siquiera aceptando un riesgo superior al 5% de que las diferencias sean debidas a causas aleatorias, ya que, las t calculadas para cada ítem son inferiores al 1.98 exigido para 158 grados de libertad y un porcentaje del 5%, salvo en dos de los ítems. Esto se puede confirmar también mediante la χ^2 , que nos permite comparar los porcentajes de respuesta en cada una de las contestaciones posibles. Así, la columna χ^2 muestra que no existen diferencias significativas entre los grupos 1 y 2 incluso suponiendo un riesgo superior al 5% de que las diferencias sean debidas al azar, ya que las χ^2 calculadas para cada ítem son inferiores al 9.49 para 4 grados de libertad y un porcentaje del 5%.

Una vez establecido que ambos grupos constituyen una misma población, consideramos sus resultados conjuntamente en la Tabla 3. bajo la columna 1 + 2.

Seguidamente, podemos analizar el número de contestaciones correctas para las cuestiones clásicas y cuánticas, observándose, como cabía esperar, que los porcentajes en el primer caso son sensiblemente superiores al segundo. Sin ánimo de ser exhaustivos, por salirse del objetivo del presente de trabajo,

podemos mencionar algunos errores conceptuales de los estudiantes referentes a cuestiones clásicas. Así, un 25% estima que la velocidad de los electrones no influye en el tratamiento (relativista o no) a seguir (ítem 7).

Tabla II

Resultados obtenidos por los grupos 1 y 2

Item	P ₁	(S ₁)	P ₂	(S ₂)	t	X ²
1.a	6.3	(3.1)	2.1	(1.4)	1.52	5.08
b	68.3	(5.9)	79.2	(4.1)		
c	3.2	(2.2)	3.1	(1.7)		
d	12.7	(4.2)	5.2	(2.3)		
o	9.5	(3.7)	10.4	(3.1)		
5.a	20.6	(5.1)	10.4	(3.1)	2.08	10.79
b	3.2	(2.2)	0.0	(0.0)		
c	71.1	(5.7)	85.4	(3.6)		
d	0.0	(0.0)	3.1	(1.7)		
o	4.8	(2.7)	1.1	(1.0)		
6.a	9.5	(3.7)	5.2	(2.3)	0.47	4.41
b	46.0	(6.3)	56.3	(5.1)		
c	23.8	(5.4)	27.1	(4.5)		
d	12.7	(4.2)	8.3	(2.8)		
o	7.9	(3.4)	1.7	(1.7)		
7.a	3.2	(2.2)	4.2	(2.0)	0.00	2.12
b	3.2	(2.2)	5.2	(2.3)		
c	50.8	(6.3)	51.0	(5.1)		
d	27.0	(5.6)	18.8	(4.0)		
o	15.9	(4.6)	20.8	(4.1)		
9.a	11.1	(3.9)	6.3	(2.5)	1.74	7.71
b	76.2	(5.4)	63.5	(4.9)		
c	3.2	(2.2)	8.3	(2.8)		
d	9.5	(3.7)	18.8	(4.0)		
o	0.0	(0.0)	3.1	(1.7)		
10.a	33.3	(5.9)	10.4	(3.1)	0.69	8.61
b	47.6	(6.3)	53.1	(5.1)		
c	4.8	(2.7)	3.1	(1.8)		
d	3.2	(2.2)	8.3	(2.8)		
o	0.0	(0.0)	3.1	(1.7)		
12.a	9.0	(5.0)	18.8	(4.0)	0.00	1.58
b	0.0	(0.0)	2.1	(1.5)		
c	76.2	(5.4)	76.0	(4.4)		
d	1.6	(1.6)	1.0	(1.0)		
o	3.2	(2.2)	2.1	(1.5)		
14.a	3.2	(2.2)	2.1	(1.5)	0.84	3.21
b	0.0	(0.0)	2.1	(1.5)		
c	61.9	(6.2)	55.2	(5.1)		
d	27.0	(5.6)	26.0	(4.5)		
o	7.9	(3.4)	14.6	(3.6)		
16.a	14.3	(4.4)	7.3	(2.7)	0.83	6.95
b	69.8	(5.8)	63.5	(4.9)		
c	4.8	(2.7)	4.1	(1.8)		
d	3.2	(2.2)	11.5	(3.2)		
o	7.9	(3.4)	14.6	(3.6)		
19.a	7.9	(3.4)	7.3	(2.7)	0.67	2.71
b	74.6	(5.5)	69.8	(4.7)		
c	0.0	(0.0)	1.0	(1.0)		
d	1.6	(1.6)	0.0	(0.0)		
o	15.9	(4.6)	19.8	(4.1)		
21.a	0.0	(0.0)	2.1	(1.5)	1.14	3.42
b	47.6	(6.3)	36.5	(4.9)		
c	22.2	(5.2)	30.2	(4.7)		
d	15.9	(4.6)	15.6	(3.7)		
o	14.3	(4.4)	15.6	(3.7)		

Tabla III

Resultados obtenidos por los grupos 1 + 2 y 3

Item	P _{1,2}	(S _{1,2})	P ₃	(S ₃)	t	X ²
1.a	3.8	(1.5)	0.0	(0.0)	2.42	11.79
b	74.8	(3.4)	87.9	(4.2)		
c	3.1	(2.1)	5.2	(2.9)		
d	8.2	(2.1)	5.2	(2.9)		
o	10.0	(2.3)	1.7	(1.6)		
5.a	14.5	(2.7)	0.0	(0.0)	3.51	11.92
b	1.3	(0.8)	0.0	(0.0)		
c	79.9	(3.1)	94.8	(2.9)		
d	1.9	(1.0)	5.2	(2.9)		
o	2.5	(1.2)	0.0	(0.0)		
6.a	6.9	(2.0)	15.5	(4.7)	3.06	17.28
b	52.2	(3.9)	29.3	(5.9)		
c	25.8	(3.4)	48.3	(6.5)		
d	10.1	(2.3)	5.2	(2.9)		
o	5.0	(1.7)	1.7	(1.6)		
7.a	3.8	(1.5)	1.7	(1.6)	6.45	27.50
b	4.4	(1.6)	1.7	(1.6)		
c	50.9	(3.9)	87.9	(4.2)		
d	22.0	(3.2)	6.9	(3.3)		
o	18.9	(3.1)	1.7	(1.6)		
9.a	8.2	(2.1)	13.8	(4.5)	0.05	5.64
b	68.6	(3.6)	69.0	(6.0)		
c	6.3	(1.9)	10.3	(3.9)		
d	15.1	(1.0)	0.0	(0.0)		
o	1.9	(1.0)	0.0	(0.0)		
10.a	19.5	(3.1)	34.5	(6.2)	0.56	7.21
b	50.9	(3.9)	55.2	(6.5)		
c	3.8	(1.5)	0.0	(0.0)		
d	2.5	(1.2)	5.2	(2.9)		
o	10.1	(2.3)	5.2	(2.9)		
12.a	18.9	(3.1)	12.1	(4.2)	2.20	4.44
b	1.3	(0.8)	0.0	(0.0)		
c	76.1	(3.3)	87.9	(4.2)		
d	1.3	(1.2)	0.0	(0.0)		
o	2.5	(1.2)	0.0	(0.0)		
14.a	2.5	(1.2)	0.0	(0.0)	3.97	13.24
b	1.3	(0.8)	0.0	(0.0)		
c	57.9	(3.9)	82.8	(4.9)		
d	26.4	(3.4)	15.5	(4.7)		
o	11.9	(2.5)	1.7	(1.6)		
16.a	10.1	(2.3)	1.7	(1.6)	3.09	11.40
b	66.0	(3.7)	84.5	(4.7)		
c	3.8	(1.5)	0.0	(0.0)		
d	8.2	(2.1)	10.3	(3.9)		
o	11.9	(2.5)	0.0	(0.0)		
19.a	8.8	(2.2)	3.4	(2.3)	4.44	11.41
b	71.7	(3.5)	93.1	(3.3)		
c	0.6	(0.6)	0.0	(0.0)		
d	0.6	(0.6)	0.0	(0.0)		
o	18.2	(3.0)	3.4	(2.3)		
21.a	1.3	(0.8)	1.7	(1.6)	7.40	36.03
b	40.9	(3.8)	15.5	(4.7)		
c	27.0	(3.5)	75.9	(5.6)		
d	15.7	(2.8)	3.4	(2.3)		
o	15.1	(2.8)	3.4	(2.3)		

Un 30%. aproximadamente, no tiene las ideas claras sobre los sistemas de referencia inerciales (ítem 9). Un 18.9% afirma que las partículas cargadas, colocadas en un campo magnético se ven sometidas a una fuerza, independientemente de su estado de movimiento (ítem 12).

En lo que concierne a los errores conceptuales en cuántica, encontramos, como cabía esperar, que incurren en ellos porcentajes considerables de alumnos (que llegan, en algunos ítems, a abarcar prácticamente la mitad del grupo). Por ejemplo:

-En cuanto a los espectros atómicos, un 19.5% cree que no cambian de un sistema de referencia a otro, por ser una propiedad característica de los átomos (ítem 10). Esto debe relacionarse sin duda con la no comprensión de los sistemas inerciales antes mencionada.

-Respecto a la dualidad onda-corpúsculo, un 10.1% considera que la difracción de electrones no es posible, pues el electrón es un corpúsculo y no rodeará el obstáculo (ítem 16). Es mucho menor el porcentaje, 3.1%, de los que incurren en el error contrario de considerar al electrón sólo como onda (ítem 1), lo que evidencia que la reducción al aspecto corpuscular está más extendida en el caso del electrón. Finalmente, un 26.4% responde que la dualidad es una propiedad exclusiva de los sistemas microscópicos (ítem 14).

-El principio de indeterminación implica, para un 14.5%, que no se puede medir sin error (ítem 5). En conexión con esto, un 15.7% tiene la idea de que la posición y la cantidad de movimiento no son buenos observables (ítem 21). Un 8.8% cree que se puede determinar el movimiento del electrón, si se conoce su posición (ítem 19). Posiblemente en este porcentaje haya que considerar la lectura superficial de los distractores, de la que hablaremos más adelante. Finalmente, para el 40.9%, el principio de indeterminación, sólo es aplicable al mundo microscópico, lo que es coherente con lo mencionado anteriormente (ítem 21).

-Para terminar, comentaremos el ítem 6., referente a los orbitales atómicos. Un 59.1% les atribuye una existencia independiente de los propios electrones. Un 10.1% llega incluso a afirmar que los orbitales son las envolventes de las posibles trayectorias del electrón en el átomo, lo que pone de manifiesto la idea clásica del electrón-partícula que recorre trayectorias.

Para evaluar la validez del cuestionario se ha representado la distribución de respuestas acertadas en el grupo 1 + 2, encontrándose que es prácticamente normal, con una media sensiblemente superior a 11.5, que constituye la mitad del cuestionario. Esto nos permite, además, calcular los índices de dificultad (i_d) y discriminación (ID) /9/. Encontramos que de los 22 ítems objetivos, la mayor parte (14) tienen un i_d \geq 0.7, es decir, son fáciles de acuerdo con nuestro planteamiento inicial de realizar un cuestionario sencillo. Sólo 3 ítems tienen un i_d \sim 0.4, es decir, se pueden considerar difíciles (son los más explícitamente referidos a errores conceptuales, como la idea de orbital y el principio de indeterminación).

El ID refleja hasta qué punto un determinado ítem

tiende a ser acertado por los alumnos que han obtenido la puntuación global mejor. Sólo 3 ítems tienen un $i_d < 0.2$, es decir, son escasamente discriminativos. Para 5 ítems es $i_d > 0.4$ y no coinciden con los más fáciles, sino con aquellos en los que era necesaria una lectura más cuidadosa. Esto, junto con el escaso tiempo dedicado al cuestionario, es una muestra más de lo profundamente arraigada que se encuentra lo que se ha dado en llamar "metodología de la superficialidad", caracterizada por respuestas seguras y rápidas, no sometidas a ningún tipo de análisis /10/.

3.2. Resultados del grupo 3

En la Tabla 3 se incluyen los porcentajes de respuesta para cada una de las contestaciones posibles con sus correspondientes desviaciones estándar para los grupos 1 + 2 y 3. La comparación de los resultados obtenidos por ambos evidencia que existen sensibles diferencias entre ellos, manifestándose mejoras en el porcentaje de respuestas correctas del grupo 3. Además, mientras en el grupo 1 + 2 las respuestas en blanco llegan a suponer hasta un 18% en algunos ítems, en el grupo 3 no aparecen prácticamente respuestas en blanco. Evidentemente esto debe relacionarse con el hecho de que el grupo 3 ha seguido un curso de Física Cuántica y a los estudiantes les resultan familiares los conceptos y las preguntas del cuestionario.

En la tabla 3 se comparan los porcentajes de respuestas correctas en cada ítem entre los grupos 1 + 2 y 3. Puede verse que una buena parte de las t de Student calculadas ponen de manifiesto la existencia de diferencias significativas entre los grupos con una probabilidad de que esas diferencias sean debidas al azar inferior al 1% (véase los casos en que la t calculada es mayor que el 2.61, exigido para grados de libertad y un porcentaje de aleatoriedad del 1%). La XI confirma lo anterior. En efecto, buena parte de las XI calculadas son superiores al 11.14 exigido para 4 grados de libertad y un porcentaje de aleatoriedad inferior al 2.5%.

Finalmente, en lo que respecta a los errores conceptuales encontramos una notable disminución de éstos en la mayor parte de los casos, salvo en los que comentamos seguidamente. El error de los orbitales electrónicos como algo independiente de los electrones y que pueden ser ocupados o no por éstos, sólo disminuye del 59.1% al 48.8%, lo que evidencia la persistencia de los errores conceptuales introducidos desde 80 de EGB en relación con el llenado de capa. Observamos también cómo persiste la idea de que la dualidad onda/corpúsculo (ítem 14) o el principio de indeterminación se aplican únicamente al mundo microscópico, reduciéndose sólo del 26.4% al 15.5% y del 40.9% al 15.5%, respectivamente. También persiste un 34.5% que considera que los espectros atómicos se observan idénticos desde cualquier sistema de referencia (ítem 10). Además de lo comentado más arriba, creemos que esto debe relacionarse con la idea de que los espectros atómicos son las "huellas dactilares" de los átomos. Este tipo de afirmación, muy repetido en los primeros niveles de enseñanza, hace que los estudiantes olviden que tales "huellas" pueden variar de un sistema a otro sin que por ello se pierda la posibilidad de identificar el átomo en cuestión.

IV. Conclusiones

Hemos visto que los estudiantes que inician el tercer curso de la licenciatura en Físicas tienen una comprensión aceptable en lo que se refiere a conceptos clásicos, y más bien deficiente en los conceptos cuánticos. Hemos detectado, además, la existencia de errores conceptuales en las ideas cuánticas y también en las clásicas, algunos de los cuales persisten tras un curso de Física Cuántica.

Dichos errores conceptuales, algunos de los cuales han sido ya puestos de manifiesto en anteriores trabajos /4,5,6,7/, tienen su origen en la introducción directa o explícita de los errores por los textos y profesores, transmitiéndose de unos a otros por un mecanismo de "reacción en cadena" a causa de la aceptación acrítica de lo incluido en textos anteriores /11,12/. También se originan en lo que denominamos introducción implícita por falta de un tratamiento didáctico clarificador que muestre cómo las nuevas ideas -en este caso las cuánticas, introducidas en 30 de BUP, COU, Física General, etc.- entran en conflicto con las clásicas y, por tanto, con la estructura conceptual de los alumnos, con lo que las posibilidades de cambio conceptual en éstos son prácticamente nulas.

Posiblemente la introducción explícita de errores tenga su origen en el deseo de presentar sencillamente algunos conceptos y fenómenos nuevos, sobre los que carecemos de una previa experiencia sensible y cotidiana que nos proporcione una "intuición" (o "prejuicio"), sin utilizar un bagaje matemático fuera del alcance de nuestros alumnos. Este afán simplificador conduce, en numerosas ocasiones, a utilizar conceptos clásicos (que se suponen adquiridos por los alumnos) para explicar fenómenos que precisamente obligaron a abandonar las concepciones clásicas y, en la mayoría de estos casos, los nuevos aspectos se presentan sin dejar de dar como "real" la imagen clásica. Por ejemplo, parece que la idea subyacente en muchos textos es que el electrón no deja de ser una partícula, por muchas interferencias que pueda producir.

Estas consideraciones nos permiten avanzar una respuesta a nuestro problema inicial de determinar cuál será la mejor forma de introducir las nuevas ideas. Creemos que es necesario plantear una enseñanza de la Física

Cuántica en el 3º curso de Físicas (y, en general, de cualquier disciplina) que tenga en cuenta los conceptos y errores previos de los alumnos. Por ello, la Física Cuántica debe introducirse como contraposición con las ideas clásicas e incluir junto con la formación matemática, allá donde sea posible, la discusión de las ricas y provocadoras ideas de la Física Cuántica. Lo que permitirá desarrollar un nuevo sentido físico, una nueva intuición, es decir, pensar de forma cuántica, dándose cuenta, por ejemplo, de que los electrones y fotones no son ni ondas ni partículas clásicas, sino objetos de nuevo tipo con un comportamiento nuevo, el comportamiento cuántico (que algunos denominan cuantones). No es casualidad que los textos sobre Física Cuántica que suponen una ruptura respecto a la mayoría /13, 14, 15/, sigan estos criterios. Aplicándolos hemos visto en este trabajo cómo es relativamente fácil conseguir sensibles mejoras en los estudiantes, favoreciendo que el enfrentamiento entre las ideas clásicas y cuánticas sea positivo, de modo que estas últimas sean necesarias para interpretar la Física del siglo XX.

Referencias bibliográficas

- (1) Ausubel, D. P.: *Psicología educativa. Un punto de vista cognoscitivo*. Ed. Trillas, 1978, México.
- (2) Posner, G.S., Strike K.A., Hewson P.W y Gertzog W.A.: *Science Education* 66 (1982; 2!!).
- (3) Driver R.: *Enseñanza de las Ciencias* 4 (1986) 3.
- (4) Solbes J.: Tesis doctoral, U. de Valencia, 1986.
- (5) Gil D., Senent F. y Solbes J.: *Revista de Enseñanza de la Física*, 1986, aceptado para su publicación.
- (6) Solbes J., Calatayud M.L., Climent J.B. y Navarro J.: *Modelo cuántico del átomo*. Ed. Servel de Formació Permanent U. de Valencia, 1987, Valencia.
- (7) Solbes J., Calatayud M.L., Climent J.B. y Navarro J.: *Enseñanza de las Ciencias* 5 (1987) 189.
- (8) Gil D. Y Carrascosa J.: *European Journal of Science Education* 7 (1985) 231.
- (9) Fernández E.: *Estructura y didáctica de las Ciencias*. Ed. Servicio de Publicaciones MEC, 1979, Madrid.
- (10) Carrascosa J. y Gil D.: *Enseñanza de las Ciencias* 3 (1985) 113. (11) Warren J.W.: *Physics Education* 11 (1976) 52.
- (12) Lehrman R.I.: *The Physics Teacher* 20 (1982) 519.
- (13) Ferynman R.P.: *Física*, vol. 111, Ed. Fondo Educativo Interamericano, 1971, Panamá.
- (14) Wichman E.H.: *Física Cuántica (Berkeley Physics Course, vol. IV)*. Ed. Reverté, 1971, Barcelona.
- (15) Levy-Leblond J.M. y Balibar F. : *Quantique. Rudiments*. Ed. Interéditions, 1984, París.