
ANÁLISIS CRÍTICO DE LA INTRODUCCIÓN DE LA FÍSICA MODERNA EN LA ENSEÑANZA MEDIA

D. GIL PEREZ*, F. SENENT** y J. SOLBES*

* Instituto de Ciencias de la Educación. Universidad de Valencia.

** Departamento de Física Fundamental. Universidad de Valencia.

SUMMARY: *This paper deals with the introduction of Modern Physics in high school curricula, trying to answer to these questions:*

— *How are Modern Physics concepts introduced?*

— *Do pupils get a correct understanding of these concepts?*

Some results are given which show the need of a deep change in the way Modern Physics concepts are usually taught.

El desarrollo científico contemporáneo, implica que los currículos de Física y Química, tanto en el primer ciclo universitario como en la enseñanza media, incluyan —como es lógico a fines ya del siglo XX— temas que suponen el manejo de ideas y conceptos propios de lo que se conoce como Física moderna —la que requiere para su interpretación de la Física relativista y/o cuántica (Laloe 1984).

Este manejo plantea serias dificultades y constituye un punto claramente problemático de la enseñanza de la Física (International Commission of Physics Education of IUPAP 1981).

En relación con ello el presente trabajo aborda las siguientes cuestiones: ¿hasta qué punto las ideas y conceptos básicos de la Física moderna son introducidos correctamente en la Enseñanza media?, y ¿alcanzan los alumnos una comprensión aceptable de dichas ideas y conceptos?

Hipótesis y fundamentación de las mismas

Una de las líneas de investigación que se ha mostrado más fecunda en estos últimos años es la relativa a las dificultades que aparecen en

el aprendizaje de los conceptos clave de las ciencias (Carrascosa 1983). Estas dificultades aparecen asociadas a la existencia de preconceptos que muestran una extraordinaria resistencia a ser desplazados por las ideas científicas que el profesor intenta enseñar. Los estudios realizados señalan como una causa importante de la persistencia de los preconceptos el hecho de que la enseñanza habitual de las ciencias no los tiene en cuenta, o dicho de otro modo, no plantea el aprendizaje como cambio conceptual, como ruptura con las concepciones del “sentido común” que la experiencia cotidiana, el lenguaje, etc. han originado y afianzado (Posner et al., 1982).

Cabe así considerar que las dificultades encontradas por los alumnos en el aprendizaje de, por ejemplo, la Mecánica, son paralelas a las que históricamente se produjeron en el paso del paradigma aristotélico-escolástico a las concepciones clásicas. Como es bien sabido ello exigió un verdadero cambio conceptual y metodológico que sería necesario provocar también en los alumnos a través de un aprendizaje acorde con las características del trabajo científico (Gil y Carrascosa 1985).

Centrándonos ahora en la cuestión que nos ocupa de la introducción de la Física moderna, idénticas consideraciones permiten suponer que sólo la presentación de las nuevas concepciones como ruptura con las clásicas (a partir de la imposibilidad de estas para dar solución a determinados problemas) y siguiendo planteamientos acordes con la metodología científica, haría posible un aprendizaje significativo.

Nuestra hipótesis sin embargo es que también en este campo se plantea la simple transmisión verbal de conocimientos ya elaborados con todas sus consecuencias inhibitorias de un aprendizaje significativo (Gil, 1983).

Dicho de otro modo, según dicha hipótesis:

1. La introducción de la Física moderna se plantea sin tomar como punto de partida las dificultades insuperables que originaron la crisis de la Física clásica, los límites de validez de ésta, ni intentar mostrar las diferencias entre la visión clásica y la moderna sobre el comportamiento de la materia. En definitiva, la enseñanza de la Física moderna viene caracterizada por una introducción desestructurada que simplemente yuxtapone (o incluso mezcla) las concepciones clásicas y las modernas, perjudicando por tanto la correcta comprensión de ambas y proporcionando una imagen deformada (muy lineal) de cómo se desarrolla la ciencia y de la propia metodología científica.
2. En consecuencia, dicha presentación dificulta que los alumnos alcancen una mínima comprensión, ni siquiera cualitativa, de las ideas y conceptos fundamentales del nuevo paradigma.
3. Cabe incluso esperar que dicha presentación, por su propia orientación que enmascara la ruptura conceptual que supone la Física moderna, vaya acompañada de la introducción, en los mismos textos, de errores en torno a los conceptos clave.

Diseño Experimental

Con objeto de contrastar la hipótesis emitida se ha planteado, básicamente, el siguiente diseño experimental:

- El análisis de textos utilizados en la Enseñanza media.
- Cuestionarios dirigidos al profesorado de Física y Química.
- Cuestionarios dirigidos a alumnos de Enseñanza media.

Para el análisis de textos se han elaborado dos cuestionarios (Brattin et al., 1982). El primero de ellos está dirigido a constatar si, como prevé la hipótesis enunciada, la mayoría de los textos realizan una introducción desestructu-

rada de la Física moderna. Más concretamente, ello supone ver si los textos:

- Realizan o no una síntesis de la Física clásica.
- Explicitan o no la visión del comportamiento de la materia que proporciona la Física clásica.
- Se refieren o no a la crisis de la Física clásica y sus causas.
- Señalan o no los límites de validez de la Física clásica.
- Explicitan o no que la Física moderna constituye un nuevo cuerpo de conocimientos en ruptura con la visión clásica y proporciona una imagen diferente del comportamiento de la materia.
- Hacen referencia o no al importante desarrollo científico y tecnológico que facilitó la nueva Física.

El segundo cuestionario está centrado en el análisis de graves errores detectados por diversos autores en los textos en torno a cuatro aspectos clave de la nueva Física. Concretamente la incorrecta comprensión de:

- Las relaciones masa/energía.
- La dualidad onda/corpusculo.
- Las relaciones de indeterminación.
- La idea de partícula elemental.

El análisis intenta constatar:

- La introducción directa de errores por interpretaciones incorrectas que a menudo coinciden con las que se cometieron en la génesis de la Física moderna y en desacuerdo con las concepciones actualmente vigentes (Warren 1976). Como señala Lehrman (1982) algunos de dichos errores aparecen hoy en los textos por un mecanismo de transmisión debido a la aceptación acrítica de lo incluido en textos anteriores.
- La falta de tratamiento clarificador, lo que equivale a provocar el error al no mostrar cómo las ideas introducidas entran en conflicto con las clásicas (y con la estructura conceptual de los alumnos), con lo que las posibilidades de cambio conceptual son prácticamente nulas.

Este análisis se ha realizado independientemente por dos investigadores —con objeto de comprobar la fiabilidad de los resultados obte-

nidos— con una amplia muestra de textos de Física y Química de 2º y 3º de BUP y de Física de COU¹.

Por otra parte y con objeto de constatar hasta qué punto el profesorado no se plantea una introducción de la Física moderna como ruptura con la Física clásica, ni tiene en cuenta las dificultades y errores que la introducción habitual comporta, se ha procedido en primer lugar a plantear, durante los cursos de formación del profesorado, la siguiente cuestión abierta:

“Indicar, justificando brevemente, qué aspectos de la Física moderna convendría introducir en un curriculum de Física y Química de Enseñanza media. Precisar en cada caso si se propone una introducción cualitativa o cuantitativa y establecer el orden en que convendría introducir los distintos aspectos”.

Por otra parte, y tras cumplimentar la cuestión anterior se ha proporcionado a los mismos profesores en formación las partes de los temarios oficiales de Física y Química de 3º de BUP y de COU relacionados con la Física moderna con objeto de solicitar su análisis crítico y juzgar su validez para introducir la nueva Física en la Enseñanza media.

También aquí la hipótesis de partida ha sido que, pese al carácter absolutamente desestructurado de los temarios oficiales², el profesorado, mayoritariamente, no señalaría los inconvenientes de esta forma de introducción.

Por último se ha elaborado un cuestionario (en tres partes que han sido pasadas sucesiva-

mente para evitar contaminación en las respuestas) con el que se intenta contrastar la hipótesis de que los alumnos, debido a la enseñanza recibida:

- No conocen siquiera la existencia de crisis fundamentales en el desarrollo de la Física.
- No asocian el surgimiento de la Física moderna a la existencia de algunos problemas que no encontraron solución en el marco de la Física clásica.
- No llegan ni a indicar algunas diferencias clave en las visiones que la Física clásica y la Moderna proporcionan del comportamiento de la materia.
- Incurren en graves errores de interpretación de aspectos clave en la Física moderna como: la variación de la masa con la velocidad y el carácter límite de la velocidad de la luz c , la dualidad onda/corpusculo y la indeterminación en el comportamiento de las partículas.

Análisis de resultados

El análisis de textos se ha realizado con una muestra de 42 textos (14 de 2º de BUP, 15 de 3º y 13 de COU). La tabla I recoge los porcentajes de textos en los que no aparecen ni siquiera un breve párrafo que haga referencia a los aspectos indicados en el cuestionario. La simple lectura de los porcentajes muestra que la mayoría de los textos dan una visión desestructurada que yuxtapone o incluso mezcla las concepciones clásicas y modernas sin hacer referencia a la existencia de una neta ruptura entre ambas.

TABLA I

Porcentajes de textos que no incluyen ni siquiera breves referencias a los aspectos que se indican.
(N = 42 textos: 14 de 2º de BUP, 15 de 3º y 13 de FÍSICA de COU)

ASPECTO ANALIZADO	% de textos que no hacen referencias a dichos aspectos	
	%	Sd
1º ¿Se sintetizan en algún momento las principales conquistas de la Física clásica, tanto científicas como técnicas?	95.2	3.3
2º ¿Se hace referencia a la imagen del comportamiento de la materia que proporciona la Física clásica, así como a sus hipótesis subyacentes?	95.2	3.3
3º ¿Aparece tratada la crisis de la Física clásica?	83.3	5.8
4º ¿Se hace referencia en algún momento a los límites de validez de la Física clásica?	90.5	4.5
5º ¿Aparece la Física moderna como un nuevo cuerpo de conocimientos que rompe con la visión clásica, dando una imagen diferente del comportamiento de la materia?	90.5	4.5
6º ¿Se hace referencia explícita al importante desarrollo científico y tecnológico que facilitó la nueva Física?	95.2	3.3

La tabla II muestra los porcentajes de textos que no tratan debidamente cuatro aspectos clave de la nueva Física. Los resultados se han obtenido a partir de textos de 3º y COU únicamente (dado que en 2º no aparecen en el temario dichas cuestiones). Los resultados se han obtenido sumando, por las razones expuestas en el diseño, los textos en que se presentan errores explícitos con los que ni siquiera intentan clarificar la cuestión.

Además de señalar los elevados porcentajes de textos en que no se presenta un tratamiento correcto (que oscilan en todas las cuestiones alrededor del 70%) indicaremos que los errores más frecuentes se refieren a:

- La afirmación de supuestas transformaciones de masa/energía. Conviene precisar que este mismo error ha sido detectado incluso en abundantes textos estadounidenses de nivel universitario (Lehrman 1982) pese a que en la literatura se ha denunciado el error que ello supone (Warren 1976).
- La reducción de la dualidad onda/corpusculo a sólo el aspecto ondulatorio o sólo al aspecto corpuscular (Wheaton 1984).
- La interpretación de la indeterminación cuántica como falta de precisión de los instrumentos o como pura aleatoriedad (Chevalley 1984).
- La interpretación mecanicista de las partículas elementales como componentes "últimos" sin estructura interna (Rydnik 1978).

TABLA II

Porcentajes de textos que no tratan debidamente los aspectos que se indican.

(N = 28 textos: 15 de 3º de BUP y 13 de COU)

ASPECTO ANALIZADO	% de textos que no tratan debidamente dicho aspecto:	
	%	Sd
1º Relaciones masa/energía	78.6	7.8
2º Dualidad onda/corpusculo	67.9	8.8
3º Relaciones de indeterminación	71.6	8.5
4º Idea de partícula "elemental"	78.6	7.8

En cuanto a los resultados obtenidos en la cuestión abierta que fue planteada a los profesores en formación —sobre qué aspectos de la Física moderna convendría introducir en la enseñanza media y por qué razones—, evidencian una casi total falta de criterios para el establecimiento del correspondiente curriculum. De hecho tan sólo un 12.3% (sd = 4.1) citó alguna razón justificativa o alguna observación relativa a la necesidad de mostrar la crisis de la Física clásica o las diferencias entre ésta y la Física moderna.

Similares resultados se obtienen con la propuesta de análisis crítico de los temarios oficiales: el 78.5% no señalaba ningún inconveniente ni se refería a carencia alguna.

La tabla III recoge los porcentajes de alumnos (de un total de 536 de los que 189 eran de 2º de BUP, 202 de 3º y 145 de COU) que:

- Desconocían la existencia de la crisis de la Física clásica.
- No citan ninguno de los problemas que provocaron dicha crisis.
- No mencionan ninguna de las diferencias entre Física clásica y Física moderna.

TABLA III

Porcentajes de alumnos que contestan incorrectamente las cuestiones que se indican.

(N = 536 alumnos: 189 de 2º de BUP, 202 de 3º y 145 de COU)

QUESTIONARIO PARA ALUMNOS (1º parte)

- 1º El desarrollo de los conocimientos científicos, concretamente en el campo de la física, no ha sido un proceso puramente acumulativo de "más y más conocimientos", sino que estos se han estructurado en grandes cuerpos teóricos claramente diferenciados y el paso de uno a otro ha significado auténticas crisis. Indicar muy brevemente las crisis que se han producido en el desarrollo de la física.

QUESTIONARIO PARA ALUMNOS (2º parte)

- 1º Hacia 1860, los físicos creían que la física había alcanzado su máximo desarrollo y que sólo eran posibles pequeños cambios y avances secundarios. Pero a comienzos del siglo XX se descubrieron una serie de hechos que no encontraron justificación en el marco de la física clásica y que provocaron una crisis que se tradujo en el surgimiento de un nuevo marco teórico (la física moderna). Cita, como mínimo, 3 de esos hechos.
- 2º La física clásica da una visión del comportamiento de la materia distinta de la visión que proporciona la física moderna. Cita, como mínimo, 3 de esas diferencias.

Estos porcentajes oscilan en todos los casos entre el 80 y el 94%.

Finalmente, la tabla IV recoge el cuestionario planteado a los alumnos (202 de 3° y 145 de COU) sobre aspectos clave del comportamiento de la materia así como los porcentajes de respuestas incorrectas desde el punto de vista de la Física moderna. Dichos porcentajes (que oscilan entre el 82.7 y el 93.1 %) verifican claramente que los alumnos no saben interpretar correctamente la variación de la masa con la velocidad y el carácter límite de c , el comportamiento ondulatorio de los electrones y son incapaces de argumentar, a la luz del comportamiento cuántico de la materia, contra la existencia de órbitas prevista en el modelo de Bohr-Sommerfeld.

Conclusiones y perspectivas

Los resultados del presente trabajo permiten avanzar las siguientes conclusiones:

1. Tanto el profesorado como los libros de texto realizan una introducción desestructurada de la Física moderna, que no pone de manifiesto su ruptura con la Física clásica y la existencia de diferencias entre ambas y que introduce errores conceptuales en las ideas básicas de Física moderna.
2. Esto provoca que los alumnos alcancen una escasa comprensión no sólo de la Física moderna, sino también de la clásica, al no tener claros sus límites o las diferencias entre ambos paradigmas.

Surge así la necesidad de proporcionar una visión clara y elemental de la Física moderna que parta de la crisis de las concepciones clásicas y muestre cualitativamente las características del nuevo paradigma. Actualmente estamos ensayando materiales didácticos que han sido elaborados con este fin en una perspectiva de aprendizaje como cambio conceptual y metodológico (Gil y Carrascosa 1985).

Porcentaje de respuestas incorrectas

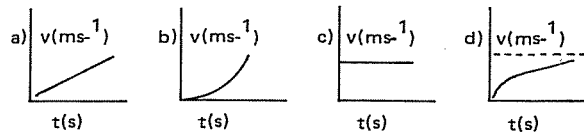
	2° BUP		3° BUP		COU	
	%	Sd	%	Sd	%	Sd
Cuestión 1.1	93.6	(1.8)	85.1	(2.5)	86.9	(2.8)
Cuestión 2.1	91.5	(2.0)	84.6	(2.5)	79.9	(3.3)
Cuestión 2.2	94.1	(1.7)	88.5	(2.2)	84.8	(3.0)

TABLA IV

Porcentajes de alumnos que contestan incorrectamente las cuestiones que se indican.
(N = 347 alumnos: 282 de 3° de BUP y 145 de COU)

CUESTIONARIOS PARA ALUMNOS (3° parte)

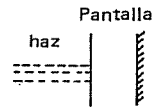
- 1• Supongamos un cuerpo sobre el cual actúa una fuerza constante.
Indicar qué gráfica representaría mejor la variación de la velocidad que experimenta ese cuerpo según la física clásica y según la física moderna.



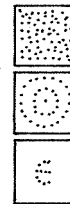
- El comportamiento clásico se representa mejor por la gráfica:
- a —
 - b —
 - c —
 - d —
 - No sé —

- El comportamiento según la física moderna se representa mejor por la gráfica:
- a —
 - b —
 - c —
 - d —
 - No sé —

- 2• Supongamos que pudiéramos hacer pasar un haz de electrones a través de un estrecho orificio frente al cual se encuentra una pantalla (constituida por una placa fotográfica).
Indicar qué imagen se formaría en la pantalla según la física moderna.



- a) Aparece impresionada toda la placa de forma regular.
- b) Aparecen zonas circulares concéntricas impresionadas y no impresionadas.
- c) Aparece impresionada la zona que enfrenta con el orificio.



- La concepción clásica se ajusta al esquema:
Explicar.
- a —
 - b —
 - c —
 - No sé —

- La concepción moderna se ajusta al esquema:
Explicar.
- a —
 - b —
 - c —
 - No sé —

- 3• Indica, para interpretar la estructura electrónica del átomo, qué razones existen desde el punto de vista de la física moderna en contra de las órbitas de Bohr-Sommerfeld.

Porcentaje de respuestas incorrectas

	3° BUP		COU	
	%	Sd	%	Sd
Cuestión 3.1.	93.1	(1.8)	89.7	(2.5)
Cuestión 3.2.	93.1	(1.8)	92.4	(2.2)
Cuestión 3.3.	82.7	(2.7)	84.1	(3.0)

Posponemos para otro artículo la publicación de esta segunda parte del trabajo que exige un ensayo reiterado realizado por distintos profesores a lo largo de varios cursos académicos. Sin embargo, los resultados obtenidos hasta aquí con grupos distintos de alumnos muestran tanto una reducción drástica de errores conceptuales como una visión más correcta de la Física moderna y, en definitiva, una significativa mejora en el aprendizaje.

NOTAS

1. BUP: Bachillerato Unificado Polivalente (de 14 a 17 años). COU: Curso de Orientación Universitaria (de 17 a 18 años).
2. El programa oficial de Física y Química de 3º de BUP relacionado con la Física moderna es: Partículas fundamentales. Núcleo atómico. Radioactividad. / Espectros atómicos. Espectros de rayos X. / Efecto fotoeléctrico. Dualidad onda corpúsculo. / Estructura atómica. Sistema periódico. / Análogamente, el de Física de COU es: Electrónica. Ondas electromagnéticas. / Naturaleza de la luz. Dualidad onda corpúsculo. / Física nuclear de baja y alta energía. Energía nuclear. /

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. BRATTIN et al., 1982: "Physics texts: An evaluative review", *The Physics teacher*, Vol. 7, pp. 508-518.
2. CARRASCOSA, J., 1983: "Errores conceptuales en la enseñanza de las ciencias: Una revisión bibliográfica", *Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 1, pp. 63-65.
3. CHEVALLEY, C., 1984: "Une nouvelle science", *Sciences et Avenir*, N° 46, pp. 18-25.
4. GIL, D., 1983: "Tres paradigmas básicos en la enseñanza de las Ciencias", *Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 1, pp. 26-33.
5. INTERNATIONAL COMMISSION OF PHYSICS EDUCATION OF IUPAP, 1981: *Quantum Mechanics in the School*, Roland Eötvös University, Budapest.
6. GIL, D. y CARRASCOSA, J., 1985: "Science Learning as a conceptual and methodological change", *European Journal of Sciences Education*, Vol. 7, pp.
7. LALOE, 1984: "Le demi-siècle de fidélité d'une grande dame", *Sciences et Avenir*, N° 46, pp. 75-76.
8. LEHRMAN, R.L., 1982: "Confused physics: A tutorial critique", *The Physics teacher*, 20, pp. 519-23.
9. POSNER, G. J.; STRIKE, K. A.; HEWSON, P. W. y GERTZOG, W. A.; 1982: "Accommodation of a scientific conception: Towards a theory of conceptual change", *Science Education*, Vol. 66, pp. 7-10.
10. RYDNIK, 1978: *Leyes del mundo atómico*, Mir, Moscú.
11. WARREN, J. W., 1976: "The mystery of mass-energy", *Physics Education*, Vol. 11, pp. 52-54.
12. WHEATON, B. R., 1984: "Le duc dans la Mécanique ondulatoire", *Sciences et Avenir*, N° 46, pp. 42-47.