

ERRORES CONCEPTUALES EN LOS MODELOS ATOMICOS CUANTICOS

SOLBES, J.⁽¹⁾; CALATAYUD, M.⁽²⁾; CLIMENT, J.⁽³⁾ y NAVARRO, J.⁽⁴⁾

(1) IB de Segorbe, (2) IB Sorolla, (3) CP Padre Manjón, (4) Facultad de Ciencias Físicas, Valencia.

SUMMARY

We analyze how the basic concepts about atomic models are introduced into the Spanish educational system. We considered the textbooks most currently used in the educational levels from 8th EGB to the 1st University level. We finally discuss the possible sources of misconceptions.

1. INTRODUCCION

Los modelos cuánticos del átomo son necesarios para comprender la estructura electrónica de los átomos —justificando su ordenación en el sistema periódico— y los enlaces de las moléculas, de donde deriva el impresionante desarrollo de la Química. También lo son para explicar las propiedades eléctricas, magnéticas y en general, la naturaleza de los sólidos, base de la moderna electrónica. Esto hace que los currícula de Física y Química de los niveles de enseñanza, comprendidos entre el ciclo superior de la EGB y el 1º de Universidad incluyan ideas y conceptos de dichos modelos, reservadas hace unos 20 años al 2º y 3º ciclo de la Universidad (Balibar y Levy-Leblond 1984).

Ahora bien, la gran dificultad que tiene la introducción cualitativa de conceptos asociados a un aparato matemático muy complejo hace que la enseñanza y el aprendizaje de los conceptos básicos de los modelos cuánticos tenga un carácter problemático para los profesores y los alumnos respectivamente. Esto es apoyado por los resultados de investigaciones didácticas recientes. Así, por lo que respecta a la enseñanza secundaria, se ha encontrado que los libros de textos de 3º de BUP y COU no tratan correctamente e introducen graves errores conceptuales en algunos aspectos básicos de la Física moderna, lo que hace que los alumnos de estos niveles desconozcan el comportamiento dual del electrón y no sean capaces de dar ninguna razón, tanto teórica como experimental contra las órbitas de Bohr-Sommerfeld (Gil, Senent y Solbes 1986). Además, los alumnos universitarios (2º curso de Físicas) aún mantienen graves errores conceptuales sobre el modelo cuántico del átomo considerando, por ejemplo, que los orbitales son independientes de los electrones y que por tanto, pueden o no estar ocupados por éstos. O que los orbitales son las envolventes de las posibles trayectorias del electrón en el átomo (Bernabéu et al 1985).

Esto nos lleva a plantearnos la siguiente cuestión: ¿Hasta qué punto los modelos cuánticos del átomo son introducidos correctamente en los diversos niveles de la enseñanza (8º de EGB, 2º y 3º de BUP, COU y 1º curso de la Universidad)?

2. HIPOTESIS Y SU FUNDAMENTACION

Muchos autores (Ausubel 1978, Hodson 1985, Giordan 1981, Yager y Penich 1983) han mostrado que la enseñanza de las ciencias ha venido proporcionando una imagen incorrecta de lo que es el trabajo científico y debido a:

- El peso del empirismo (los conocimientos científicos se forman por inducción a partir de los «datos puros»).
- El peso del formalismo (desarrollo del aparato matemático olvidando aspectos fundamentales como el planteamiento de problemas, la emisión de hipótesis, etc.).
- La imagen lineal y acumulativa del desarrollo científico, para no mostrar la existencia de «rupturas conceptuales con las ideas aceptadas durante generaciones de científicos, que se traducen en la aparición de nuevos paradigmas» (Toulmin 1977).

Esto es debido al retraso —de unos 20 años— de la visión del profesorado respecto a las aportaciones de Kuhn, Feyerabend, Lakatos y Toulmin, entre otros, a la epistemología.

Por otra parte, una de las líneas de investigación didáctica que se ha desarrollado más estos últimos 10 años, muestra la existencia de graves errores conceptuales que presentan gran resistencia a ser desplazados

por las ideas científicas correctas. Una causa importante de la persistencia de los errores conceptuales es el hecho de que los modelos didácticos utilizados habitualmente por el profesorado —transmisión verbal de conocimientos ya elaborados o descubrimiento inductivo y autónomo (Gil 1983)— no tengan en cuenta las estructuras conceptuales previas de los alumnos en las que los nuevos conocimientos han de integrarse o, a menudo, contra las que han de construirse (Driver 1986, Posner et al 1982), ni tampoco sus tendencias metodológicas habituales (Gil y Carrascosa 1985, Gil 1986).

Esto se traduce, y esta es nuestra hipótesis, en que la introducción de los modelos cuánticos en 8º de EGB, en la enseñanza secundaria y también en el 1er curso de la Universidad sea, en general, incorrecta y confusa, porque:

1. Se trata de una introducción puramente lineal y desestructurada donde simplemente se yuxtaponen (o incluso se mezclan) las concepciones clásicas (modelos atómicos de Thomson, Rutherford), las de la antigua teoría de los cuanta (modelos de Bohr, Sommerfeld), las cuánticas (Schrödinger, Heisenberg).

2. Es una introducción con grandes errores conceptuales mezclados con ideas correctas. Nos referimos más explícitamente a:

— la introducción directa o explícita de errores, por interpretaciones incorrectas que en parte coinciden con las que se cometieron en la génesis de la Física moderna y en desacuerdo con las concepciones actualmente vigentes (Warren 1976).

— la introducción implícita de errores por falta de un tratamiento clarificador que muestre cómo las ideas introducidas entran en conflicto con las clásicas (y con la estructura conceptual de los alumnos), cosa con la que las posibilidades de cambio conceptual son prácticamente nulas.

Como señala Lehrman (1982) algunos de esos errores aparecen hoy en textos por un mecanismo de «reacción en cadena» a causa de la aceptación acrítica de lo incluido en textos anteriores.

3. DISEÑO EXPERIMENTAL

Con el objeto de contrastar nuestra hipótesis hemos elaborado un cuestionario para el análisis de textos que se adjunta seguidamente (ver cuadro 1). Trata, como se puede ver, de comprobar qué conceptos se introducen en los textos y cómo son introducidos y, además, de ver qué errores conceptuales se detectan.

La muestra a analizar de acuerdo con el objetivo de este trabajo será: textos de Ciencias de la Naturaleza de 8º de EGB (donde se introducen nociones de Química y, por tanto, modelos atómicos), textos de 2º y 3º de BUP, textos de Química de COU (los de Física no se han analizado porque aunque introducen con

ceptos de Física cuántica no los aplican al átomo) y textos universitarios de Química general y Física general (ya que un cierto número de ellos tratan los modelos atómicos).

Dicho cuestionario se ha utilizado en todos los niveles, ya que también puede cubrir aspectos básicos de EGB y 2º de BUP si se aplica en un sentido cualitativo amplio. El análisis de los textos se ha hecho independientemente por dos investigadores para comprobar así la fiabilidad de los resultados. En caso de desacuerdos o de dudas se han tenido discusiones con todo el equipo para resolverlas.

4. PRESENTACION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Hemos analizado un total de 56 libros, pertenecientes los de EGB, BUP y COU al vigente plan de estudios, que dividimos en tres grupos a efectos de su análisis:

- Elemental (E) con 9 de EGB y 11 de 2º de BUP.
- Medio (M) con 11 de 3º de BUP y 8 de COU.
- Superior (S) con 8 de Física y 9 de Química correspondientes al 1er curso de Facultades.

En la tabla I presentamos los resultados. El número de textos en cada ítem puede no coincidir con el total N, bien por defecto, porque no tratan el aspecto analizado, bien por exceso, ya que hay opciones no excluyentes. Comentaremos a continuación de forma cualitativa cada uno de los ítems.

1. El efecto fotoeléctrico, los espectros, etc. Los E no lo consideran, la mayoría de los M los menciona sin mostrar su ruptura con la Física clásica, y todos los S lo consideran, pero 1/3 no habla de ruptura.

2. Modelo atómico. En los E la situación es confusa, porque aparecen todos los modelos mezclados, la gran mayoría de los M y S llegan a hablar o a mostrar la ecuación de Schrödinger, aunque unos pocos M se quedan en el modelo de Bohr.

3. Carácter clásico, precuántico y cuántico. Los E no distinguen, lo que sigue en la línea de confusión anterior (hay una única excepción). Menos de la mitad de los M y S los distinguen.

4. Necesidad del Modelo Cuántico. Los E no la plantean (con la excepción mencionada), la mitad de los M habla de esta necesidad, bien porque el concepto de órbita pierde sentido, bien porque hay una nueva concepción del comportamiento de la materia, la mayoría de los S sí, basándose en esa nueva concepción.

5. Errores en la imagen del electrón. La mayoría de los E habla de partícula; algunos hablan de una onda de manera poco clara, la mayoría de los M habla de la dualidad onda-corpúsculo, sin dar detalles (algún libro sólo habla de partícula), todos los S hablan de la dualidad onda-corpúsculo, que es más o menos expli-

Cuadro 1. Cuestionario para el análisis de los textos

1. Cómo introduce el efecto fotoeléctrico, los espectros atómicos, etc.
 - a) No los trata.
 - b) Los trata sin mostrar su ruptura con la FC.
 - c) Los trata como problemas que no pudieron ser explicados por la FC y originaron su crisis, dando lugar a la FQ.
 - d) Otros
2. A qué modelo llega en la introducción del concepto de átomo: Dalton-Thomson-Rutherford-Bohr-Sommerfeld-Schrödinger
3. Se diferencia claramente que los modelos de:
 - Thomson y Rutherford son clásicos.
 - Bohr y Sommerfeld son precuánticos.
 - Schrödinger es cuántico.
4. ¿Se justifica la necesidad de introducir el modelo cuántico?
 - a) No se justifica.
 - b) Sí, pero no se puede hablar de órbitas.
 - c) Sí, porque hay una serie de conceptos posteriores a los modelos de órbitas que plantean una nueva visión del átomo.
5. ¿Qué imagen se da del electrón?
 - a) Se interpreta como una partícula.
 - b) Se interpreta como una onda.
 - c) Se interpreta como una partícula a caballo sobre una onda.
 - d) Habla de dualidad onda-corpúsculo
 - e) Se interpreta como un objeto de tipo nuevo que exige una nueva descripción.
 - f) Otros.
6. ¿Cómo se introducen los niveles de energía?
 - a) Como capas electrónicas (regiones del espacio).
 - b) A partir de los espectros atómicos.
 - c) A partir del modelo de Bohr.
 - d) Como solución de la ecuación de Schrödinger.
 - e) A partir de la experiencia de Franck-Hertz.
 - f) Otros.
7. ¿Cómo se introducen los números cuánticos n, l, m ?
 - a) Como medio de identificar los niveles de energía.
 - b) Mediante el modelo de Sommerfeld.
 - c) En las soluciones de la ecuación de Schrödinger.
 - d) Otros.
8. Significado de los números cuánticos.

n	<ol style="list-style-type: none"> a) Determina la energía del electrón. b) Determina el tamaño de los orbitales. c) Determina el tamaño de las órbitas.
l	<ol style="list-style-type: none"> a) Determina L. b) Determina la forma de la órbita. c) Determina la forma del orbital. d) Determina el número de subniveles dentro de un nivel.
m	<ol style="list-style-type: none"> a) Determina L_z. b) Determina la orientación de la órbita. c) Determina el desdoblamiento de los niveles bajo un campo magnético. d) Determina la orientación del orbital respecto a una dirección dada.
9. ¿Cómo introduce el concepto de orbital?
 - a) Es la función de ondas o de estado.
 - b) Es ψ^2 , es decir, la región del espacio en la que hay cierta probabilidad de encontrar al electrón.
 - c) Otros.
10. Hablando de los orbitales da a entender que:
 - a) Los orbitales están asociados a propiedades de los electrones y no tienen existencia independiente.
 - b) Los orbitales existen independientemente de los electrones, y pueden o no ser ocupados por éstos.
 - c) Otros.
11. ¿Cómo se introduce la interpretación probabilística?
 - a) ψ^2 es la densidad de probabilidad electrónica y ψ es la densidad de probabilidad electrónica y $\psi^2 dV$ es la probabilidad de encontrar al electrón en un elemento de volumen dV .
 - b) ψ^2 es la densidad de carga (el electrón se distribuye).
 - c) Es la probabilidad de encontrar al electrón en un punto (nubes de carga, fotografías, etc).
 - d) Otros.
12. ¿Qué representación se da del orbital?
 - a) Se representa ψ (el orbital) mediante $R(r)$ y $Y(\theta, \phi)$.
 - b) Se presenta ψ^2 (sin decir que se trata del orbital), mediante cualquiera de las múltiples posibles opciones:
 - diagrama de puntos.
 - contornos de densidad de probabilidad constante.
 - superficies límites.
 - parte radial y parte angular al cuadrado.
 - c) Se presenta ψ^2 afirmando que se trata del orbital.
 - d) Se confunde la representación del cuadrado de la parte angular con las superficies límites.
 - e) Utiliza los diagramas de puntos (el número de puntos es proporcional a la densidad de probabilidad).
 - f) Otros.
13. ¿Cómo introduce el espín?
 - a) Relacionado con la rotación del electrón (imagen clásica).
 - b) Como un complicado movimiento espiral oscilatorio.
 - c) Como un momento angular intrínseco.
 - d) Como un nuevo número cuántico para explicar la experiencia configuraciones electrónicas, efecto Stern-Gerlach...).
 - e) Otros.
14. Cuando habla del cuarto número cuántico dice que es:
 - a) Es espín S.
 - b) La tercera componente M_s del espín.
 - c) El espín S con signo + y -.
15. ¿Cómo explica la estructura electrónica de los átomos polielectrónicos?
 - a) Postula la ordenación de orbitales, que después se ocupan.
 - b) A partir de los espectros.
 - c) A partir de las energías de ionización.
 - d) Otros.

Tabla I
 Resultados del análisis de textos

ASPECTO ANALIZADO (ver tabla 1)	nº de textos que hacen referencia a ese aspecto			
	Elemental N=20	Medio N=19	Superior N=17	Total N=56
1.a	19	1	1	21
b	1	10	5	16
c	0	6	10	16
d	0	2	1	3
2.Bohr	8	2	4	14
Somme.	5	0	0	5
Schro.	6	17	13	36
3.Si dif.	2	7	9	18
No dif	18	12	8	38
4.a	17	9	3	29
b	1	4	1	6
c	2	6	13	21
5.a	15	4	1	20
b	2	2	0	4
c	1	4	1	6
d	0	12	12	24
e	0	0	2	2
f	0	1	1	2
6.a	6	1	1	8
b	1	2	2	4
c	5	15	8	28
d	0	2	1	3
e	0	0	2	2
f	2	2	1	5
7.a	3	2	2	7
b	1	9	5	15
c	0	11	5	16
d	2	2	4	8
8.a.a	2	15	13	30
b	1	6	3	10
c	1	6	6	10
1.a	0	3	4	7
b	2	9	5	16
c	2	6	4	12
d	1	6	1	8
m.a	0	1	3	4
b	0	1	3	4
c	1	6	4	11
d	2	7	4	13
9.a	0	6	6	12
b	7	9	4	20
c	3	6	0	9
10.a	0	0	1	1
b	12	14	7	33
c	0	1	0	1
11.a	0	4	4	10
b	0	5	5	10
c	5	14	7	26
d	0	1	0	1
12.a	0	4	6	10
b	1	6	6	15
c	3	4	2	9
d	0	0	1	1
e	1	2	0	3
f	3	4	1	8
13.a	6	16	7	29
b	0	0	0	0
c	0	1	2	3
d	0	2	4	6
e	0	3	2	5
14.a	1	0	0	1
b	0	4	9	13
c	2	13	3	18
15.a	8	18	8	32
b	0	0	3	3
c	0	0	1	1
d	2	0	0	2

cada, y sólo algunos dan la imagen correcta, señalando que no es una onda ni una partícula sino un objeto de tipo nuevo (ver Feynman 1971, Balibar y Levy-Leblond 1984).

6. Niveles de energía. Los E los introducen mediante el modelo de Bohr o las capas electrónicas (órbitas con 2,8 etc. electrones), los M con el modelo de Bohr, la mitad de los S utiliza el modelo de Bohr, los otros, espectros atómicos, ecuación de Schrödinger o experiencia de Franck-Hertz.

7. Sólo unos pocos M y S introducen los números cuánticos correctamente, es decir, en la solución de la ecuación de Schrödinger, dado que los números cuánticos introducidos por Sommerfeld no son correctos. En efecto la introducción de los números cuánticos correctos mediante el modelo de Sommerfeld es errónea dado que no pueden existir órbitas con momento angular nulo. Los pocos E que los introducen lo hacen como etiquetas para distinguir niveles.

8. Significado de los números cuánticos. Un número elevado de M y S señalan que los números cuánticos determinan el tamaño, la forma y la orientación de la órbita. Un grupo de tamaño similar los relacionan con análogas características de los orbitales. Sólo algunos explican la relación de 1 con el momento angular, de m con la 3ª componente del momento angular.

9. Concepto de orbital. La mayoría de los E no habla de orbital, todos los M lo introducen y de los S, solamente los de Química lo hacen. Un pequeño número introduce correctamente el concepto de orbital como función de ondas o como estado (Levine 1977, Cartmell y Fowles 1979). Mayoritariamente se introduce como ψ^2 o como región del espacio con probabilidad de encontrar el electrón.

10. Idea sugerida de orbital. La segunda opción del ítem anterior suele estar acompañada en todos los niveles por el grave error conceptual de considerar que el orbital es una zona del espacio que los electrones pueden ocupar, o que el átomo está constituido por un núcleo y orbitales que pueden estar ocupados o no por electrones, es decir, la idea del orbital estantería que existe independientemente de los electrones, y que puede ser ocupado por estos. Un solo texto S dice explícitamente que el orbital es una propiedad relacionada con el electrón ligado.

11. Interpretación probabilística. Sólo unos M y S introducen correctamente la interpretación probabilista. El mismo número tienen el error inicial de Schrödinger de considerar ψ^2 , como una densidad de carga (es decir, de pensar que el electrón se distribuye). La gran mayoría la introducen como la probabilidad de encontrar el electrón en un punto. Algunos de ellos conectan la idea anterior con el modelo de la nube de carga obtenido por superposición de fotografías y que, por tanto conserva la idea de electrón como una partícula puntual clásica. Se puede caer en estos errores aunque

no se utilice explícitamente la ψ .

12. Aproximadamente una tercera parte representa la densidad de probabilidad (aunque no hable de ψ^2) sin decir que es el orbital. Solo uno representa ψ mediante sus partes radial y angular. En cuanto a opciones incorrectas, encontramos un cierto número de textos que representan ψ^2 afirmando que se trata del orbital y otros que interpretan los diagramas de puntos como nubes de carga, superposiciones de fotografías del electrón, etc.

13. El espín. Sólo unos pocos E lo mencionan, dando la imagen clásica incorrecta (rotación del electrón sobre sí mismo). La mayoría de los M da imagen clásica. La mitad de los S da la imagen clásica; la otra habla de momento angular intrínseco o de un nuevo número cuántico (algunos M también siguen estas opciones).

14. Cuarto número cuántico. La mayoría de los M dice que es el espín con signo + o -; unos pocos hablan de la tercera componente del espín. En los S se da la situación inversa respecto a M.

15. La mayoría de los textos explican la estructura electrónica de los átomos sin justificarla. Así, postulan la ordenación de orbitales, que se ocupan posteriormente (idea relacionada con el ítem 10); unos pocos S obtienen la estructura a partir de espectros o de energías de ionización.

Sin ser exhaustivos, presentamos a continuación algunos errores explícitos. Observamos dos fuentes importantes de errores. La primera, recurrir a conceptos clásicos para explicar conceptos cuánticos, dando como «real» la imagen clásica. La segunda, no desconectar de la primera, se debe a la confusión implicada por la dualidad onda-corpúsculo.

Ilustraremos esto con algunos ejemplos, entrecomillando las citas textuales. Así, el modelo de Bohr mantiene la idea clásica de órbitas «que pueden compararse con las descritas por los planetas alrededor del sol». Pero ahora hay que hablar de orbitales. No se suele relacionar el orbital con la función de ondas del electrón (a partir de la cual se pueden calcular los diferentes observables), sino con una idea de probabilidad. Para justificarlo se dice que el electrón no es una partícula, sino «una nube de carga negativa que se desplaza alrededor del núcleo». O bien se explica manteniendo simultáneamente la idea de órbita, porque «la órbita que el electrón describe alrededor del protón no es fija, sino que tanto el diámetro como el plano en el que se mueve la partícula varían con el tiempo». Hay que observar la contradicción con la comparación referida al sistema solar (las órbitas planetarias sí son fijas). Además «como la distancia del electrón al núcleo varía con el tiempo, de manera estadística, el electrón tendrá al moverse la probabilidad de encontrarse en todo el espacio de la corteza que rodea al núcleo». Esta contradicción se manifiesta también diciendo que la órbita del electrón no es en realidad una órbita «sino más

bien una región orbital en todas las direcciones del espacio», o bien diciendo que «en cada una de las órbitas pueden existir subniveles de energía que denominamos orbitales, y que asimilaremos a trayectorias que pueden recorrer los electrones». Es decir, las órbitas están formadas por cosas más complejas llamadas orbitales, pero que en realidad, no son más que órbitas.

Respecto a la dualidad onda-corpúsculo, a pesar de que se hable de ella, algunos continúan pensando que el electrón no deja de ser una partícula, pero «distribuida sobre todo el frente de ondas». O bien, después de haber hablado de la dualidad se dice lo siguiente: «el átomo está prácticamente vacío. Si se aumentara un cristal de cloruro sódico en un billón de veces, los átomos de cloro y de sodio, en forma de iones, adquirirían respectivamente un radio de 181 y 95 m, pero en realidad únicamente se observarían unas esferas macizas de unos centímetros de radio, situadas unas de otras a distancias de 276 m, formando una red cúbica y, girando a su alrededor, 18 y 10 esferas muy tenues que corresponderían a los electrones». Igualmente, la idea de partícula se manifiesta cuando se dice que «si fuéramos capaces de hacer fotografías en tres dimensiones de un átomo de hidrógeno, cada fotografía mostraría al electrón en un punto, a corta distancia del núcleo». Y, naturalmente, la superposición de todas las fotografías «nos daría el orbital». La idea implícita continúa siendo que el electrón es una partícula, y parece que la dualidad onda-corpúsculo provenga de unas deficiencias técnicas. Esas deficiencias parecen haber sido ya superadas, puesto que se llega a mostrar una fotografía del átomo de uranio «muy agrandado», donde «se ve» la trayectoria de los electrones.

6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

De los resultados de la encuesta deducimos que, si bien un cierto número de los textos analizados presentan globalmente las ideas cuánticas del átomo de un modo satisfactorio, todavía subsisten demasiados errores conceptuales en los textos. Ello confirma nuestras hipótesis de partida, y observamos que se tiende a realizar una introducción desestructurada y confusa de los conceptos cuánticos, introducción que yuxtapone (o incluso mezcla) las concepciones clásicas, pre-cuánticas y cuánticas acerca de la estructura atómica. Como ya hemos señalado, esta yuxtaposición constituye una de las fuentes más importantes de errores conceptuales.

Sin duda, en la mayoría de los casos, esta confusión tiene su origen en un deseo de presentar de un modo sencillo algunos conceptos y fenómenos nuevos, sobre los que carecemos de una previa experiencia sensible y cotidiana que nos proporcione una «intuición» (o prejuicio), sin tener que utilizar un bagaje matemático generalmente fuera del alcance de los alumnos. Este afán simplificador es desafortunado si conduce a utilizar conceptos clásicos (que se suponen adquiridos por los

alumnos), para explicar fenómenos que obligaron a abandonar las concepciones clásicas. En la mayoría de los casos, los nuevos aspectos se presentan sin dejar de dar como «real» la imagen clásica. En el párrafo anterior hemos mostrado y comentado algunos de dichos errores.

Como alternativa a la introducción habitual de los conceptos cuánticos, creemos que habría que insistir en dos aspectos fundamentales.

En primer lugar, subrayar el comportamiento nuevo de los objetos descritos por la Física Cuántica. Algunos autores (Balibar y Levy-Leblond 1984), han propuesto, aunque con poca fortuna hasta ahora, denominar «cuantones» a dichos objetos, para manifestar desde el principio su carácter especial. Naturalmente, habría que hacer ver que todos los objetos son cuantones, pero que bajo ciertas circunstancias un cuantón se manifiesta según lo que clásicamente describimos como partícula (bien sea un fotón en el efecto fotoeléctrico o bien sea una piedra que cae desde lo alto de la torre de Pisa), o se manifiesta según lo que clásicamente describimos como una onda (difracción de electrones u ondas luminosas). Este aspecto límite de la Física Clásica a partir de la Física Cuántica no es considerado en casi ningún texto, mientras que sí se suele hacer de la Física clásica respecto de la Física Relativista.

En segundo lugar, el uso de modelos y aproximaciones clásicas o semiclásicas (precuánticas), es algo frecuente en la práctica corriente de la Física, y los investigadores científicos no se privan de hacerlo siempre que tienen la oportunidad. Desde un punto de vista pedagógico es importante el utilizar modelos, y por las mismas razones por las que los utilizan los físicos. El uso de modelos permite presentar de forma esquemática y sencilla lo que de otro modo requeriría una descripción complicada, lo que tiene la virtud de separar los aspectos importantes de los secundarios en un determinado problema. Pero el inconveniente es que en muchos textos se presenta un modelo clásico correspondiente a un típico problema cuántico, como la descripción «real» y correcta, ignorando que todo modelo tiene sus limitaciones y que sólo es útil si se es consciente de ellas. Así, en nuestra opinión, el limitar la descripción de la estructura atómica al modelo de Bohr en los niveles elementales de enseñanza es algo perfectamente válido, siempre que se insista simultáneamente en las propias inconsistencias del modelo, cosa que muy pocas veces se hace.

Como resultado de este análisis se está preparando actualmente un modelo de currículum para cada uno de los niveles de enseñanza.

Agradecemos la ayuda prestada por el Servicio de Formación del Profesorado de la Universitat de València y la Conselleria de Cultura, Educació i Ciència para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AUSUBEL, D.P., 1978, *Psicología educativa. Un punto de vista cognoscitivo*. (Trillas: México).
- BALIBAR, F. y LEVY-LEBLOND, J.M., 1984, *Quantique. Rudiments*. (Intereditions: París).
- BERNABEU, J., NAVARRO, J., SOLBES, J. y VENTO, V., 1985, Memoria del proyecto Implantación de enseñanzas prácticas de Física moderna, Documento de trabajo.
- DRIVER, R., 1986, Psicología cognoscitiva y esquemas conceptuales de los alumnos, *Enseñanza de las Ciencias*, 4, 3-15.
- FEYNMAN, R.P., 1971, *Física vol. 3. Mecánica cuántica*. (Fondo Educativo Interamericano: Panamá).
- GIL, D., 1983, Tres paradigmas básicos en la enseñanza de las ciencias, *Enseñanza de las Ciencias*, 1, 26-33.
- GIL, D., 1986, La metodología científica y la enseñanza de las ciencias: Unas relaciones controvertidas, *Enseñanza de las Ciencias*, 4, 111-122.
- GIL, D. y CARRASCOSA, J., 1985, Science Learning as a conceptual and methodological change, *European Journal of Science Education*, 7, 231-236.
- GIL, D., SENENT, F. y SOLBES, J., 1986, Análisis crítico de la introducción de la Física moderna, *Revista de Enseñanza de la Física*, (se publicará).
- GIORDAN, A., 1978, Observation-experimentation; Mais comment les élèves apprenent-ils?, *Revue Française de Pédagogie*, 44, 66-73.
- HODSON, D., 1985, Philosophy of science, science and science education, *Studies in Science Education*, 12, 25-55.
- LEHRMAN, R.L., 1982, Confused Physics: A tutorial critique, *The Physics teacher*, 20, 519-523.
- LEVINE, I., 1977, *Química Física* (AC: Madrid).
- TOULMIN, S., 1977, *La comprensión humana I: el uso colectivo y la evolución de los conceptos*, (Alianza: Madrid).
- WARREN, J.W., 1976, The mystery of mass-energy, *Physics Education*, 11, 52-54.
- YAGER, R.E. y PENICH, J.E., 1983, Analysis of the current problems with science in the USA, *European Journal of Science Education*, 5, 463-469.