

BID.T 7450

UNIVERSITAT DE VALÈNCIA  
FACULTAD DE FISICAS

LA INTRODUCCION DE LOS CONCEPTOS  
BASICOS DE FISICA MODERNA

UNIVERSITAT DE VALÈNCIA  
Servei de Formació Permanent  
CENTRE D'INFORMACIÓ I DESARROLLO EDUCATIU  
Reg. Entrada ..... 6093  
Data ..... 01 FEB. 1995  
Signatura SF-53:37(641) Sol

L. 329206

Memoria presentada por  
JORDI SOLBES MATARREDONA  
para optar al grado de  
Doctor en Ciencias Físicas

UMI Number: U607569

All rights reserved

INFORMATION TO ALL USERS

The quality of this reproduction is dependent upon the quality of the copy submitted.

In the unlikely event that the author did not send a complete manuscript and there are missing pages, these will be noted. Also, if material had to be removed, a note will indicate the deletion.



UMI U607569

Published by ProQuest LLC 2014. Copyright in the Dissertation held by the Author.  
Microform Edition © ProQuest LLC.

All rights reserved. This work is protected against  
unauthorized copying under Title 17, United States Code.



ProQuest LLC  
789 East Eisenhower Parkway  
P.O. Box 1346  
Ann Arbor, MI 48106-1346

38095

D 329775

L 329806



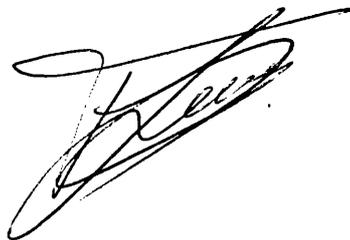
EDU D 11759

FERNANDO SENENT PEREZ, Catedrático de Física Atómica y Nuclear de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad de Valencia y

DANIEL GIL PEREZ, Catedrático de Física y su Didáctica de la - Escuela Universitaria de Formación del profesorado de EGB de - la Universidad Autónoma de Barcelona.

C E R T I F I C A N: Que la presente Memoria "Introducción de los conceptos básicos de Física Moderna" ha sido realizada bajo nuestra dirección en el Departamento de Física Fundamental de la Facultad de Ciencias Físicas y en el Instituto de Ciencias de la Educación, y constituye la Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Físicas.

Y para que conste en cumplimiento de la - legislación vigente, presentamos ante la Facultad de Ciencias Físicas de la Univer- sidad de Valencia la referida Tesis Docto- ral, firmando el presente certificado en Valencia a dos de Abril de mil novecientos ochenta y seis.



*A Amèlia i als meus pares,  
per tot.*

*Al presentar esta Memòria vullc expressar el meu agraïment a totes les persones que amb la seua col·laboració i ajuda l'han feta possible.*

*A En Fernando Senent i a En Daniel Gil per la seua ajuda i recolçament al llarg de tot el treball.*

*A En José Bernabeu i a En Jesús Navarro per la lectura crítica dels materials elaborats i els seus valuosos suggeriments.*

*Als companys del Seminari Permanent de Física i Química de l'ICE de la Universitat de València per la seua participació en el disseny i aplicació dels materials.*

*Als nombrosos companys i alumnes que han facilitat la realització d'aquest treball complimentant qüestionaris, participant en entrevistes, etc.*

*A Consuelo Gil per l'acurat mecanografiat de taüles i gràfiques i a Felicidad Lopez per verificar els calculs estadístics.*

-----  
INTRODUCCION E INDICE GENERAL  
-----

El objetivo de este trabajo es el estudio de la situación de la Física moderna en la Enseñanza media, ante la cual nos planteamos las siguientes cuestiones:

1ª ¿Se introducen correctamente los conceptos básicos de la Física moderna? ¿Son comprendidos por los alumnos?

2ª ¿Es posible realizar un tratamiento correcto de la crisis de la Física clásica y del surgimiento de la moderna que favorezca una mejor comprensión de ambas?

Dar respuesta a las primeras cuestiones constituye el objeto de los capítulos 2,3 y 4. Para ello emitimos una primera hipótesis, según la cual habitualmente se realiza una introducción desestructurada que simplemente yuxtapone (o incluso mezcla) las concepciones clásicas y las modernas, acompañada de errores en los conceptos clave, que perjudica por tanto la correcta comprensión de ambas y da lugar a errores conceptuales en los alumnos.

Después de fundamentar teóricamente esta primera hipótesis -lo que supone un análisis de las características esenciales de la metodología científica y de sus implicaciones en una enseñanza que pretenda ser coherente con la misma-, se realiza el correspondiente diseño experimental de cara a poder realizar su contrastación.

En cuanto a la 2ª cuestión, nos ocupamos de ella en los

capítulos 5, 6 y 7, en donde comenzamos por enunciar nuestra 2ª hipótesis, según la cual es posible 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.

Tras fundamentar y operativizar esta 2ª hipótesis presentamos el diseño experimental utilizado para su contrastación. A continuación se realizará el análisis estadístico de los resultados obtenidos (que apoyan muy significativamente las hipótesis emitidas) y se presentan las conclusiones finales incluyendo las perspectivas abiertas.

De acuerdo con ello, el desarrollo del trabajo se ajustara al siguiente índice general:

#### INDICE

	PAG
Capítulo 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
Capítulo 2. FORMULACION Y FUNDAMENTACION DE LA PRIMERA HIPOTESIS..	6
2.1. Planteamiento de la primera hipótesis.....	7
2.2. Fundamentación de la primera hipótesis.....	8
2.2.1. Características fundamentales del trabajo científico.....	9
2.2.2. El desarrollo de los conocimientos científicos.....	12
2.2.3. Aportaciones de la investigación didáctica a una enseñanza/aprendizaje de las ciencias acorde con las características del trabajo científico.....	13

2.2.3.1.La estructura conceptual de los alumnos como punto de partida del aprendizaje .....	14
2.2.3.2.Necesidad de un cambio conceptual.....	16
2.2.3.3.Necesidad de un cambio metodológico.....	19
2.2.4.Análisis de las formas habituales de enseñanza.....	20
2.2.4.1.La enseñanza tradicional por transmisión verbal.....	21
2.2.4.2.La enseñanza por descubrimiento inductivo.....	21
2.2.4.3.La enseñanza ausubeliana por transmisión verbal significativa.....	23

Capítulo 3.DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA CONTRASTACION DE LA PRIMERA HIPOTESIS.....27

3.1.Operativización de la primera hipótesis.....	28
3.2.Diseño para contrastar la primera hipótesis.....	32
3.2.1.Preparación de los cuestionarios.....	32
3.2.2.Cuestionario para el análisis de textos.....	33
3.2.2.1.Criterios de valoración de los items.....	37
3.2.3.Cuestionario para profesores.....	42
3.2.3.1.Criterios de valoración de los items.....	44
3.2.4.Cuestionario para alumnos.....	44
3.2.4.1.Criterios de valoración de los items.....	49
3.2.5.Tamaño de las muestras y formas de aplicación de los cuestionarios.....	52

Capítulo 4.PRESENTACION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE LA PRIMERA HIPOTESIS.....55

4.1.Presentación de los resultados obtenidos con el cuestionario	
--	--

de textos .....	56
4.2. Análisis de los resultados del cuestionario de textos.....	64
4.3. Presentación y análisis de los resultados obtenidos con el cuestionario de profesores.....	64
4.4. Presentación de los resultados obtenidos con el cuestionario de alumnos .....	71
4.5. Análisis de los resultados del cuestionario de alumnos.....	74

Capítulo 5. FORMULACION Y FUNDAMENTACION DE LA SEGUNDA HIPOTESIS. 83

5.1. Planteamiento de la segunda hipótesis.....	84
5.2. Fundamentación de la segunda hipótesis.....	86
5.2.1. La introducción de la Física moderna según el modelo de enseñanza/ aprendizaje de las ciencias como cambio conceptual y metodológico.....	86
5.2.2 Criterios para el diseño de un curriculum de introducción a la Física moderna .....	90
5.2.2.1. Hilo conductor para la introducción de la Física relativista.....	93
5.2.2.2. Hilo conductor para la introducción de la Física cuántica.....	98
5.2.3. Un método: el programa-guía de actividades.....	103

Capítulo 6. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA CONTRASTACION DE LA SEGUNDA HIPOTESIS..... 107

6.1. Operativización de la segunda hipótesis.....	108
6.2. Diseño para contrastar la segunda hipótesis.....	111
6.3. Presentación de los programas-guía de actividades.....	114

La crisis de la Física clásica y el surgimiento de la Física moderna (Programa-guía para el nivel elemental) .....115

Introducción a los conceptos de Física relativista y cuántica (Programa-guía para el nivel superior) .....125

Capítulo 7.PRESENTACION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SEGUNDA HIPOTESIS.....162

7.1.Presentación de los resultados obtenidos con los grupos experimentales.....163

7.2.Análisis de los resultados obtenidos con los grupos experimentales.....171

Capítulo 8.CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.....179

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....185

Capitulo 1.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

-----  
Cap 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA  
-----

El impacto de la Física moderna en el desarrollo científico implica que los currícula de Física y Química incluyan, como es lógico a fines ya del siglo XX, tanto en los primeros niveles universitarios como en la enseñanza media, temas que suponen el manejo de ideas y conceptos propios de lo que se conoce como Física moderna (1).

Este manejo plantea sin embargo serias dificultades y constituye un punto claramente problemático, como lo manifiesta el interés de la "International Commission on Physics Education", de la "International Union of Pure and Applied Physics" por el tema, a través de recopilaciones ("Quantum Mechanics in the School", 1981) y conferencias internacionales ("The Teaching of Modern Physics", Genève, CERN 1984).

Esta situación nos lleva a plantear los siguientes problemas, que exigen un detenido estudio:

¿Hasta qué punto las ideas y conceptos de la Física moderna son introducidos correctamente en la enseñanza media?

¿Los alumnos alcanzan una comprensión aceptable de dichas ideas y conceptos?

Y en el caso, a nuestro parecer bastante probable -como trataremos de justificar primero y de mostrar experimentalmente

después-, de que el tratamiento sea incorrecto y no se de en las condiciones actuales un mínimo grado de comprensión por parte del alumno:

¿Es posible proporcionar una visión clara y elemental de la crisis de la Física clásica y del surgimiento de la Física moderna que favorezca una mejor comprensión de ambos cuerpos teóricos y evite errores conceptuales?

En un principio cabría pensar que la causa de la introducción incorrecta y de las dificultades de manejo resida en la escasa proporción de tiempo, respecto a la totalidad de la materia, que se dedica a la Física moderna (Rogers 1981).

Esta escasa presencia de la Física moderna en la práctica docente habitual es reconocida, por ejemplo, en "Les orientacions sobre programació" del "Departament d'Ensenyament de la Generalitat de Catalunya" de Septiembre de 1982. En efecto, debido a la extensión de los cuestionarios oficialmente vigentes para BUP y COU (BOE 18-Abril-1975 y 17-Marzo-1978), es imposible, según dichas orientaciones, abarcarlos en su totalidad durante el curso y, por ello, se recomienda reducirlos, lo que afecta muy en particular, al conjunto de temas que en 3º de BUP tratan sobre la Física moderna.

Lógicamente, la amplitud enciclopédica de los temarios, denunciada hace años por autores como Piaget (1977) y por organismos educativos internacionales (como las Conferencias Internacionales de Instrucción Pública), es un obstáculo no sólo

para el tratamiento de algunos temas específicos, sino para cualquier aprendizaje verdaderamente significativo. Sin embargo, cabe pensar que las dificultades no sean debidas tanto a la insuficiencia de tiempo -sin descartar que un excesivo defecto de tiempo contribuya a un tratamiento simplista y superficial- cuanto a un tratamiento didáctico incorrecto de la Física moderna.

Con esta óptica, el estudio que aquí presentamos incluye en primer lugar un análisis del tratamiento habitual. En una segunda parte se propone y fundamenta un tratamiento didáctico alternativo y se exponen algunos resultados comparativos.

Digamos, para terminar este breve planteamiento inicial del problema que, al elegir como problema de investigación la introducción de la Física moderna en la Enseñanza Media, lo hemos hecho por un doble motivo:

-Porque la introducción de los conceptos de Física moderna permite proporcionar una imagen más correcta -menos lineal y más creativa- de la Ciencia.

-Por el interés que dicha introducción posee para proporcionar una imagen del comportamiento de la materia más acorde con las ideas actuales.

El problema abordado en esta investigación queda aquí formulado de forma aún imprecisa, como simple preocupación inicial por la enseñanza de un dominio importante pero escasa y, creemos, incorrectamente tratado. La formulación y

fundamentación de las hipótesis de trabajo permitira precisar el problema.

NOTAS:

(1) Diversos autores (Eisberg 1974, Resnick 1976) coinciden en denominar Física moderna a "ciertos campos específicos de la Física", que "tienen en común dos características: la primera, que se han desarrollado a partir del año 1900, aproximadamente, y la segunda, que las teorías empleadas para explicar los fenómenos propios de dichos campos son completamente diferentes de las teorías que existían antes de 1900".

La relatividad y la teoría cuántica constituyen la base teórica de la Física moderna. En efecto, como señala Eisberg "los temas que estudia la Física moderna son: la teoría de la relatividad y los fenómenos relacionados con ella, las teorías y los fenómenos cuánticos y, en particular, la aplicación de las teorías de la relatividad y la cuántica al átomo y al núcleo".

Además, no sólo constituyen la base de la nueva Física, sino los marcos "en el interior (de los cuales) pueden ser elaborados modelos más precisos (...) Sus principios generales pueden ser utilizados para construir teorías específicas: la teoría de Schrodinger para átomos y moléculas, teorías de campos (cromodinámica, teoría electrodébil...), física nuclear, física del estado sólido, etc" (Laloe 1984).

Como resume Resnick (1976) "la Física moderna puede definirse como la Física que requiere para su interpretación la teoría de la relatividad o la teoría cuántica".

## Capítulo 2.

### FORMULACION Y FUNDAMENTACION DE LA PRIMERA HIPOTESIS

- 2.1. Planteamiento de la primera hipótesis
- 2.2. Fundamentación de la primera hipótesis
  - 2.2.1. Características fundamentales del trabajo científico
  - 2.2.2. El desarrollo de los conocimientos científicos
  - 2.2.3. Aportaciones de la investigación didáctica a una enseñanza/aprendizaje de las ciencias acorde con las características del trabajo científico
    - 2.2.3.1. La estructura conceptual de los alumnos como punto de partida del aprendizaje
    - 2.2.3.2. Necesidad de un cambio conceptual
    - 2.2.3.3. Necesidad de un cambio metodológico
  - 2.2.4. Análisis de las formas habituales de enseñanza
    - 2.2.4.1. La enseñanza tradicional por transmisión verbal
    - 2.2.4.2. La enseñanza por descubrimiento inductivo
    - 2.2.4.3. La enseñanza ausubeliana por transmisión verbal significativa

-----  
Cap 1. FORMULACION Y FUNDAMENTACION DE LA PRIMERA HIPOTESIS  
-----

2.1. PLANTEAMIENTO DE LA PRIMERA HIPOTESIS

Ya hemos hecho referencia a la necesidad de estudiar el tratamiento didáctico de la Física moderna que se realiza en la Enseñanza Media, en la medida en que consideramos que a él se deben las dificultades que encuentran los alumnos en la comprensión de la misma. Ello constituye en esencia nuestra primera hipótesis, que podemos precisar señalando que la enseñanza de la Física moderna en los niveles medios vendría caracterizada por:

Una introducción desestructurada que mezcla las concepciones clásicas y las modernas y que no muestra la existencia de una neta ruptura entre ambas. En consecuencia:

1.No deja claro, ni siquiera a nivel cualitativo, la existencia de dificultades insuperables que originaron la crisis de la Física clásica

2.No muestra las diferencias entre la visión clásica y moderna sobre el comportamiento de la materia, lo que a su vez,

3.Perjudica una correcta comprensión de ambas y da lugar a serios errores conceptuales y

4.Proporciona una imagen deformada (muy lineal) de como se desarrolla la Ciencia y, por tanto, de la propia metodología científica.

Vamos a proceder a continuación a la fundamentación de esta hipótesis y, en los siguientes capítulos, expondremos el diseño experimental para su verificación y el análisis de los

resultados obtenidos.

## 2.2. FUNDAMENTACION DE LA PRIMERA HIPOTESIS

La visión crítica sobre la forma en que se introduce la Física moderna que hemos enunciado en el apartado anterior, a título de hipótesis, esta fundamentada básicamente en:

1. La existencia de concepciones epistemológicas erróneas y muy extendidas entre el profesorado y, por tanto, en los libros de texto, sobre la naturaleza del trabajo científico y la forma de evolución de los conocimientos (Hodson 1985).

2. Las formas vigentes de enseñanza de las ciencias -"por transmisión de conocimientos ya elaborados" o "por descubrimiento inductivo"- y su escasa relación con lo que realmente es el trabajo científico (Gil 1983).

De acuerdo con ello desarrollaremos esta fundamentación en los siguientes puntos:

1. Expondremos en primer lugar algunas características básicas del trabajo científico y de la forma de evolución de los conocimientos científicos -en las que existe amplio consenso entre autores de muy diversas tendencias-.

2. Describiremos las aportaciones de la investigación didáctica que apoyan una enseñanza de las ciencias coherente con las características del trabajo científico.

3. Mostraremos como las concepciones habituales del profesorado de ciencias -caracterizadas por un empirismo extremo

y por una visión puramente acumulativa del desarrollo de los conocimientos científicos- y sus formas usuales de enseñanza no tienen en cuenta dichas características, lo que conduce a un tratamiento didáctico incorrecto de las ciencias y, muy en particular, de la Física moderna.

### 2.2.1. CARACTERISTICAS FUNDAMENTALES DEL TRABAJO CIENTIFICO

Sin pretender reproducir aquí los debates sobre la naturaleza del trabajo científico, nos limitaremos a poner de relieve algunos de sus aspectos esenciales, en los que se da una amplia coincidencia entre las distintas concepciones epistemológicas (Bunge 1973, Chalmers 1984, Feyerabend 1974, Hempel 1976, Piaget 1975, Popper 1962) y que siguiendo a Gil (1983) podemos resumir así:

1. El rechazo de la idea misma de "Método científico", como un conjunto de reglas perfectamente definidas y ordenadas que se aplicarían mecánicamente (Feyerabend 1974).

2. La superación de un empirismo que supone que los conocimientos científicos se forman por inducción a partir de "datos puros".

Por el contrario, toda investigación científica, en el momento de realizarse, se inserta en el marco conceptual o paradigma existente (Khun 1975), como lo indican las referencias bibliográficas justificativas, el planteamiento inicial de los

problemas, la fundamentación de las hipótesis, etc. Y, más aún, los resultados obtenidos en la investigación resultan coherentes con dicho paradigma u obligan a su reformulación.

Esto, evidentemente, supone un rechazo de los "datos" como punto de partida de los conocimientos científicos, porque dichos datos han de formularse en términos de teorías y deben obtenerse con ayuda de instrumentos diseñados y leídos en el marco de las mismas (Bunge 1978).

Es necesario subrayar esto por sus implicaciones didácticas, ya que entre el profesorado de ciencias persiste generalmente una visión simplista de la metodología científica, caracterizada por un empirismo extremo (Giordan 1978, Hodson 1985).

3. Resaltar aspectos fundamentales de la investigación científica, relegados en los planteamientos empiristas. Así, el planteamiento de los problemas, la emisión de hipótesis o el propio diseño de experimentos, ocupan un lugar central en cualquier trabajo con pretensión científica. En palabras de Bunge (1973):

"Un fragmento de investigación científica consiste en el manejo de un conjunto de problemas suscitados por un análisis crítico de alguna parte del conocimiento o por un exámen de nueva experiencia a la luz de lo que ya se conoce o conjetura. Los problemas se resuelven aplicando o inventando conjeturas que, de ser contrastables, se llaman hipótesis científicas. A su vez, algunas hipótesis científicas se ascienden a veces a leyes, de

las que se supone que reproducen estructuras objetivas; y las leyes se sistematizan en teorías. Así pues, el proceso creador de la ciencia arranca del conocimiento de problemas y culmina con la construcción de teorías, cosa que a su vez plantea nuevos problemas, entre ellos el de la contrastación de las teorías."

Obviamente, esto no implica incurrir en el otro extremo de una ciencia desarraigada de la realidad, ya que como el texto anterior señala, estas hipótesis habrán de ser confirmadas experimentalmente.

La importancia de este punto en lo que concierne a la enseñanza de las ciencias es recalcar el papel de las formas divergentes de pensamiento en el aprendizaje (Gil 1982).

4.El carácter social, colectivo y dirigido del desarrollo científico que se evidencia en que:

-El punto de partida de toda investigación científica es el paradigma teórico vigente en el respectivo campo de conocimientos (Kuhn 1975), el cual se halla constituido por las aportaciones de los anteriores investigadores.

-La investigación responde cada vez en mayor medida a estructuras institucionalizadas (Bernal 1976, Price 1973) en las que el trabajo de los individuos está orientado por las líneas de investigación establecidas, por el trabajo del equipo del que forman parte, careciendo prácticamente de sentido la idea de investigación individual y autónoma. Este punto tiene una

implicación didáctica evidente: apoya la idea de que la enseñanza de las Ciencias precisa de una actividad colectiva y orientada de los alumnos.

### 2.2.2. EL DESARROLLO DE LOS CONOCIMIENTOS CIENTIFICOS

Analogamente a lo expuesto en el apartado anterior, sólo queremos destacar las aportaciones de diversos autores (Feyerabend 1974, Kuhn 1975, Lakatos 1975a y b, Toulmin 1977) sobre la forma en que se desarrollan los conocimientos científicos.

Estas aportaciones -al margen de diferencias de matiz que no afectan nuestros planteamientos- son básicamente coincidentes en la superación de una visión puramente acumulativa de los conocimientos científicos.

Dicha visión acumulativa está en íntima conexión con las concepciones empiristas sobre el trabajo científico. En efecto, como señala Popper (1962), dado que el "criterio de demarcación" empirista exige que sólo pueden aceptarse como científicas las proposiciones probadas por los hechos o derivadas a partir de otras ya probadas, se excluyen de la ciencia los periodos de crisis. Según ello, el desarrollo de la ciencia sería lineal y acumulativo, tanto a nivel teórico como factual (Carnap 1969).

Por el contrario, el conjunto de autores citados anteriormente muestran como cuando uno o varios problemas científicos no pueden ser explicados a partir del marco conceptual vigente se produce lo que Kuhn (1975) denomina

"cambio de paradigma" o Toulmin (1977) "ruptura conceptual con las ideas aceptadas por generaciones de científicos, que se traduce en la aparición de un nuevo paradigma".

Esto tiene notables implicaciones en la enseñanza de las ciencias, ya que tanto el profesorado como los libros de texto siguen ofreciendo ordinariamente una visión meramente acumulativa de los conocimientos científicos, lo que afecta muy en particular a la Física moderna que, como sabemos, es el resultado de una serie de dificultades que no puede explicar la Física clásica, respecto a la que supone una ruptura.

### 2.2.3. APORTACIONES DE LA INVESTIGACION DIDACTICA A UNA ENSEÑANZA/APRENDIZAJE DE LAS CIENCIAS ACORDE CON LAS CARACTERISTICAS DEL TRABAJO CIENTIFICO

Hemos visto hasta aquí algunos aspectos del método científico y del desarrollo de las ciencias que no son tenidos habitualmente en cuenta por el profesorado, lo que se traduce en un tratamiento didáctico inadecuado de las ciencias.

En este apartado mostraremos cómo las investigaciones educativas más recientes señalan la existencia de un cierto paralelismo entre el proceso de producción de los conocimientos científicos y el aprendizaje significativo de las ciencias, lo que apoya un tratamiento didáctico coherente con la metodología científica (Gil 1983).

Pasamos a continuación a exponer algunas de dichas aportaciones.

### 2.2.3.1. La estructura conceptual de los alumnos como punto de partida del aprendizaje

Así como el análisis de las características de la metodología científica muestra la importancia de los paradigmas conceptuales como origen y término de cualquier trabajo científico (Kuhn 1975, Lakatos 1975 a y b, Toulmin 1977), la investigación didáctica evidencia que la enseñanza no puede plantearse como si el alumno partiese de cero. En efecto, los alumnos no inician ningún nivel educativo como una tábula rasa; cada uno posee una estructura conceptual, es decir, un sistema organizado de conceptos que le sirven para explicar y predecir lo que ocurre alrededor (Ausubel 1978, Driver 1985, Novack 1982).

Dichos trabajos han puesto en evidencia que la estructura conceptual posee, además de los conocimientos adquiridos a través del aprendizaje, una serie de ideas intuitivas o preconceptos, acerca de numerosos temas, previos a cualquier enseñanza escolar sobre los mismos.

Pero dicho preconceptos, capaces de coexistir en la estructura cognoscitiva con conocimientos que los contradicen, actúan como "obstáculo o barrera epistemológica" (Bachelard 1971), impidiendo la comprensión de nuevos conceptos y produciendo errores conceptuales (respuestas incorrectas en las situaciones en que tienen que utilizar dichos conceptos).

Esto obliga a plantear una enseñanza que según Giordan (1978) "lejos de continuar llenando al niño de conocimientos debería

derribar las ideas falsas que lo llenan", lo que no es tan fácil porque estas ideas presentan una notable resistencia a ser sustituidas por las explicaciones científicas proporcionadas por el profesorado, hasta el punto de encontrarse incluso en niveles universitarios y en el profesorado de EGB y Enseñanza media (Carrascosa y Gil 1984).

Estos preconceptos se originan mediante el proceso de inducción, intuición e imaginación que el alumno realiza, desde la infancia, para intentar interpretar la realidad y por el uso de términos científicos en el lenguaje ordinario con significados diferentes y ambiguos (así fuerza, trabajo, energía, corriente, etc) (Driver 1985, Helm 1980, Solis 1984, Viennot 1978).

Los trabajos de Piaget y colaboradores (Piaget 1970 a) han mostrado que la adquisición de dichas ideas previas por el niño tiene un cierto paralelismo con la evolución histórica de los correspondientes conceptos en una ciencia. Así, por ejemplo, estos estudios han dejado patente como las experiencias cotidianas sobre el movimiento de los cuerpos generan una visión del comportamiento mecánico de la materia muy próxima a la Física aristotélico escolástica.

Esto explica algunas de las dificultades del aprendizaje de la Física clásica, ya que dicho preconceptos se caracterizan por no ser congruentes con los conceptos, leyes y teorías que los alumnos tienen que aprender. Con mucha mayor razón aparecerán dificultades en la enseñanza habitual de la Física moderna, en contradicción con la Física del sentido común y con la clásica.

De todo lo dicho se puede deducir la importancia fundamental de la estructura conceptual para cualquier proceso de enseñanza/aprendizaje (Driver 1985). Ausubel (1978) llega a afirmar que "si yo tuviera que reducir toda la psicología educativa a un sólo principio enunciaría éste: averigüese lo que el alumno ya sabe y enseñese consecuentemente".

Esto, junto con la resistencia de estos preconceptos a ser derribados y la necesidad de explicar como se integran los nuevos conceptos en la estructura conceptual previa, ha conducido a modelos de aprendizaje de las ciencias basados en el cambio conceptual, que desarrollaremos a continuación.

#### 2.2.3.2. Necesidad de un cambio conceptual

Los modelos de enseñanza de las ciencias como cambio conceptual, también denominados constructivistas -entre los que podemos referirnos al Generative Learning Model (Osborne y Wittrock 1983), al PSHG Model, denominado mediante las iniciales de sus autores (Fosner, Strike, Hewson y Gertzog 1982, Hewson 1982) y el modelo Driver (1985)- se basan en la idea de que el proceso de enseñanza/aprendizaje consiste en una interacción entre la estructura conceptual previa y la nueva información, que puede -o no- producir cambios en ésta.

Dicha situación es comparable, en cierta forma, con los cambios de paradigma (o revoluciones científicas) dado que como Hewson (1981) señala:

"El aprendizaje de la Ciencia es complejo, el alumno ha de adquirir nueva información, reorganizar el conocimiento existente e incluso abandonar ideas profundamente asumidas (...) La analogía entre el aprendizaje individual y el cambio conceptual en las disciplinas científicas ha sido fructífera y ha propiciado un marco adecuado para el análisis del aprendizaje de las ciencias".

En resumen, podemos observar un paralelismo nada superficial entre el proceso de aprendizaje y el modo de producción de los conocimientos científicos, lo cual viene a apoyar la idea de una enseñanza de las ciencias acorde con las características del trabajo científico.

Describiremos a continuación, brevemente, las distintas posibilidades de cambio conceptual que involucra el aprendizaje de la Ciencia, en las que coinciden diversos autores, aunque utilizando términos distintos (Ausubel 1978, Driver 1985, Novack 1982, Piaget 1970 b, Posner et al 1982). Utilizaremos los del modelo PSHG, que actualmente goza de gran aceptación por su poder explicativo. Dichos autores consideran los siguientes cambios conceptuales:

-Asimilación, que tiene lugar cuando las ideas previas permiten tratar la información nueva la cual queda, por tanto, incorporada (asimilada) al esquema conceptual.

-Acomodación, que es el cambio que se produce cuando los conceptos previos son inadecuados para tratar la nueva

información. Esto produce una insatisfacción que se traduce en:

.Una reestructuración o reorganización de los conceptos previos, o bien en

.Una sustitución de los conceptos existentes por otros nuevos.

Para que se produzca la reorganización conceptual y, sobre todo, la sustitución de conceptos previos por otros nuevos es necesario que:

-Exista insatisfacción con las ideas previas, para lo cual el profesor debe presentar un número suficiente de "anomalías" o problemas que el esquema no pueda resolver.

-Las ideas nuevas sean inteligibles (el alumno debe comprender lo que significan), plausibles (reconciliables con los fenómenos conocidos) y fructíferas (capaces de explicar las anomalías encontradas y ampliar el campo de conocimientos).

Podemos plantearnos, en vista de lo anterior, cual debe ser la estrategia a adoptar para superar los errores conceptuales. Los autores citados coinciden en la necesidad de un planteamiento didáctico que favorezca el cambio conceptual y la consolidación de la nueva información. Por ello el profesor debe:

-Comenzar haciendo que los mismos alumnos expongan sus ideas y puntos de vista, con el fin de que se den cuenta de cual es su paradigma conceptual (Nussbaum y Novick 1980)

-A continuación, haciendo uso de la contrastación experimental y de previos análisis críticos, mostrar los fallos y limitaciones del paradigma conceptual expuesto, procediendo

así a la sustitución de las viejas ideas por otras nuevas más adecuadas que habrán de configurar un nuevo paradigma conceptual. Dicho paradigma habrá de ser repetidamente confrontado con el antiguo, si queremos que pueda quedar verdaderamente consolidado.

#### 2.2.3.3. La necesidad de un cambio metodológico

Trabajos recientes vienen a completar el modelo de aprendizaje como cambio conceptual, aportando la idea de que los cambios conceptuales durables exigen a la vez cambios metodológicos en el alumno (Gil y Carrascosa 1985).

En efecto, si nuestros alumnos tienen, por ejemplo, una interpretación del movimiento mecánico similar a la que encontramos en el paradigma aristotélico ello no puede ser fruto de azar, sino el resultado de idénticas causas: la tendencia a sacar conclusiones precipitadas y a generalizar acriticamente a partir de observaciones meramente cualitativas (Piaget 1975). Y no debe olvidarse que las concepciones aristotélicas sólo fueron desplazadas, tras siglos de vigencia -con todas las dificultades que conlleva un cambio de paradigma- gracias a un nuevo abordaje metodológico, nada fácil, que aunaba la creatividad del pensamiento divergente con el rigor de la contrastación de las hipótesis a través de experiencias realizadas en condiciones controladas. Es lógico suponer que lo mismo ha de ocurrir con nuestros alumnos. Únicamente llegarán a superar la "metodología de la superficialidad" (Carrascosa y Gil 1985) si son puestos

reiteradamente en situación de aplicar la metodología científica, es decir, en situación de plantearse problemas, emitir hipótesis a la luz de los conocimientos previos, diseñar experimentos, realizarlos, analizar cuidadosamente los resultados, que verifican o falsan la hipótesis.

Y, además, este planteamiento de ajustar la enseñanza a las características de la metodología científica es necesario, no sólo porque la familiarización de los alumnos con el trabajo científico sea un objetivo en sí, sino porque sin el cambio metodológico que ello supone, no es concebible un efectivo cambio conceptual y, por tanto, una verdadera superación de los preconceptos erróneos. Es evidente, por tanto, que sólo la presentación de la Física moderna como ruptura con la clásica (basándonos en la imposibilidad de esta para dar solución a ciertos problemas) y siguiendo planteamientos acordes con la metodología científica, haría posible un aprendizaje significativo.

#### 2.2.4. ANALISIS DE LAS FORMAS HABITUALES DE ENSEÑANZA

Hasta aquí hemos mostrado la existencia de un cierto isomorfismo entre el trabajo científico y el proceso de aprendizaje significativo de los conocimientos científicos. Ahora vamos a finalizar verificando que las formas más usuales de enseñanza de las ciencias -la transmisión verbal de conocimientos y el descubrimiento inductivo- pese al énfasis de la segunda de ellas en el papel del "Método Científico", no son

coherentes con las características fundamentales del trabajo científico, con sus consiguientes consecuencias inhibitorias de un aprendizaje significativo (Gil 1983 y 1984).

#### 2.2.4.1. La enseñanza tradicional por transmisión verbal

Es el tipo de enseñanza más utilizado habitualmente, caracterizado en las situaciones más extremas, por:

-La atención casi exclusiva a los contenidos

-La falta casi total de trabajo experimental

-El papel preponderante del profesor, la asimilación de cuyo discurso es la única actividad propuesta a los alumnos.

Evidentemente esta enseñanza no es coherente con la metodología científica y sus resultados, por otra parte, son tan deficientes que han originado la aparición de nuevos paradigmas de enseñanza que pretenden mejorarlos y que expondremos seguidamente, procediendo a su crítica en la medida en que no son acordes con las características del trabajo científico y que no provocan cambios conceptuales y metodológicos en el alumno.

#### 2.2.4.2. La enseñanza por descubrimiento inductivo

La enseñanza de las ciencias denominada como "de descubrimiento" adquiere especial relevancia a mediados del siglo XX en EEUU, por la convergencia del "aldabonazo sobre las concepciones pedagógicas" que supuso el lanzamiento del Sputnik en 1957 y la existencia de un movimiento de renovación

pedagógica influido por John Dewey, William James, etc (Fernandez 1979).

Su objetivo básico era poner al mismo nivel los métodos de la Ciencia y los contenidos de las materias científicas, aspecto este último obviamente mucho más promocionado hasta entonces que el primero, procurando para ello que los alumnos vayan descubriendo las cosas por sí mismos, mediante una amplia realización de observaciones y actividades experimentales, guiados por el "Método científico".

Este tipo de enseñanza ha influido en la elaboración de importantes proyectos para la enseñanza de la Física (PSSC, Nuffield), de la Química (CBA, CHEM), de la Biología (BSCS) etc y, actualmente, en los temarios oficiales, en cualquier proyecto, etc, se insiste en esta "aplicación del método científico".

Sin embargo, los resultados alcanzados por este tipo de enseñanza, en concreto, en los EEUU, donde se ha aplicado más extensamente, no han sido nada positivos. Ausubel (1978, pag. 536) llega a afirmar que:

"...Como los términos 'laboratorio' y 'método científico' se volvieron sacrosantos en las preparatorias y universidades norteamericanas, los estudiantes fueron obligados a remedar los aspectos exteriormente conspicuos pero inherentemente triviales del 'método científico (...)' En realidad con este procedimiento aprendieron poco de la materia y menos aun del método científico".

Las causas de estos resultados son, como señala Gil (1983):

-El empirismo, basado en la idea de que "la solución de problemas ocurre necesariamente con fundamento en el razonamiento inductivo a partir de datos empíricos" (Ausubel 1978), lo que conduce a realizar muchas actividades experimentales, en las que aspectos esenciales como la emisión de hipótesis o el diseño de experimentos son ignorados, convirtiendo pues dichas actividades en meras manipulaciones (Colmez et al 1978).

-No tener en cuenta la estructura conceptual previa de los alumnos ni el hecho de que cada disciplina esta caracterizada por una estructura que define las relaciones entre conceptos (Host 1978), lo que se traduce en una falta de atención a los contenidos y en la creencia de que la ejecución de algunos experimentos inconexos proporciona al alumno lo esencial de la materia, es decir, su metodología.

-Y, para finalizar, el énfasis que se hace en este tipo de enseñanza, en la actividad individual y autónoma del alumno, lo que contradice el carácter colectivo y guiado del trabajo científico.

#### 2.2.4.3. La enseñanza ausubeliana por transmisión verbal significativa

Recientemente, la crítica de la enseñanza por descubrimiento inductivo, ha venido acompañada por una defensa del aprendizaje "por recepción" (Ausubel 1978, Novack 1982) que tenga en cuenta

la estructura cognoscitiva de los alumnos y el papel que la guía del profesor puede jugar como facilitadora del aprendizaje significativo.

Esto es un paso adelante, pero ya hemos señalado en el apartado anterior (2.2.3) la imposibilidad de un cambio de la estructura conceptual que no este acompañado por un cambio metodológico. En lo que concierne al profesor, estamos de acuerdo con el papel positivo de la guía, lo que no parece tan claro es que dicha guía deba quedar reducida a proporcionar los conocimientos ya elaborados para su aprendizaje por recepción. .

En efecto, como reconoce el propio Ausubel (1978) la verdadera asimilación de conceptos requiere un proceso activo de "relación, diferenciación y reconciliación integradora con los conceptos pertinentes que ya existan" y que "cuanto más activo sea ese proceso, tanto más significativos y útiles serán los conocimientos asimilados".

Ello significa que es necesario hacer activo el proceso de asimilación en la misma clase -donde es posible la orientación del profesor-, interrumpiendo el discurso profesoral con más tiempo propio para los alumnos, que así pueden trabajar los conceptos hasta ligarlos con su estructura conceptual.

Sin embargo, las ocasiones privilegiadas para la actividad de los alumnos -los trabajos prácticos y la resolución de problemas- se transforman, con el método de transmisión verbal, en ejercicios de asimilación.

Así pues, dentro de esta orientación de aprendizaje por recepción los trabajos prácticos juegan el papel de ilustración

o comprobación de lo anteriormente expuesto por el profesor. Incluso, muchas veces son realizadas por el propio profesor como experiencias de cátedra. Esto convierte dicha prácticas en meras manipulaciones (Colmez et al 1978), siguiendo guías pormenorizadas, en las que faltan aspectos esenciales como la definición del problema, la emisión de hipótesis, el diseño de experimentos e incluso el análisis de resultados (Yager y Penich 1983, Gil y Payá 1984a). Por ello es necesario plantear los trabajos prácticos como pequeñas investigaciones en las que los estudiantes puedan familiarizarse verdaderamente con la metodología científica (Gil y Payá 1984b, Calatayud et al 1980, Calatayud, Furió et al 1980).

Analogamente, en lo que concierne a los problemas se ha señalado que los alumnos no aprenden a resolver problemas, sino únicamente a comprender y memorizar soluciones explicadas por el profesor como simples ejercicios de aplicación, lo cual conduce a que los alumnos se limiten a reconocer problemas que ya han sido resueltos o a abandonar. Por ello, hay que replantear los problemas con una metodología adecuada de trabajo que no puede ser otra que su abordaje como investigación, como proceso coherente con la metodología científica (Gil y Martínez 1983 y 1984).

En resumen, hemos mostrado que tanto las concepciones usuales del profesorado sobre las ciencias -caracterizadas por un empirismo extremo y una visión acumulativa del desarrollo de los conocimientos científicos- como sus formas habituales de

enseñanza -por trasmisión verbal o por descubrimiento inductivo- tienen poco que ver con la forma en que realmente se desarrolla la ciencia y con algunas aportaciones de la investigación didáctica.

Estas aportaciones muestran que existe un cierto paralelismo entre las características del trabajo científico y el proceso de aprendizaje de las ciencias. Por ello se realza el papel de las estructuras conceptuales de los alumnos -análogo al de los paradigmas- y la necesidad del cambio conceptual y metodológico -que tiene su correlato en los cambios de paradigma y en los aspectos del trabajo científico relegados por el empirismo-.

En nuestro ámbito concreto, se ha mostrado 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 pregalileano a las concepciones clásicas, lo que exigió un cambio conceptual y metodológico que sería necesario provocar también en los alumnos a través de un aprendizaje acorde con las características del trabajo científico.

Identicas razones permiten suponer que sólo la introducción de la Física moderna como ruptura con las concepciones clásicas y siguiendo planteamientos acordes con la metodología haría posible un aprendizaje significativo.

Pero según nuestra primera hipótesis, esto no es así, lo que se traduce en la escasa comprensión que los alumnos alcanzan de los conceptos básicos de la Física moderna.

### Capítulo 3.

#### DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA CONTRASTACIÓN DE LA PRIMERA HIPÓTESIS

- 3.1. Operativización de la primera hipótesis
- 3.2. Diseño para contrastar la primera hipótesis
  - 3.2.1. Preparación de los cuestionarios
  - 3.2.2. Cuestionario para el análisis de textos
    - 3.2.2.1. Criterios de valoración de los items
  - 3.2.3. Cuestionario para profesores
    - 3.2.3.1. Criterios de valoración de los items
  - 3.2.4. Cuestionario para alumnos
    - 3.2.4.1. Criterios de valoración de los items
  - 3.2.5. Tamaño de las muestras y formas de aplicación de los cuestionarios

-----  
Cap 3.DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA CONTRASTACION DE LA PRIMERA  
HIPOTESIS  
-----

3.1. OPERATIVIZACION DE LA PRIMERA HIPOTESIS

De acuerdo con la primera hipótesis de trabajo, según la cual la enseñanza de la Física moderna en los niveles medios se caracteriza por una introducción no estructurada que mezcla las concepciones clásicas con las modernas y no muestra la existencia de una neta ruptura entre ambas, esperamos encontrar:

1. Que los libros de texto, medio de instrucción mayormente utilizado (Yager y Penich 1983), no proporcionen, en general, una visión estructurada de la Física moderna. Con más precisión:

a) No muestren con claridad la crisis de la Física clásica. Dicho de otro modo den una visión simplemente acumulativa del desarrollo científico, sin tener en cuenta las aportaciones de muy diversos autores sobre la naturaleza de las ciencias (Chalmer 1984, Feyerabend 1974, Kuhn 1975, Lakatos 1975 a y b). Dichas aportaciones coinciden básicamente en señalar que los conocimientos se articulan en cuerpos coherentes o teorías, hasta que dificultades insuperables provocan una revolución teórica: el surgimiento de un nuevo paradigma. Según ello, los textos no tratan esas dificultades como tales, es decir, como problemas que no pudieron ser explicados por la Física clásica y

que, por tanto, pusieron en evidencia los límites de dicha visión del comportamiento de la materia.

b) Incluyan elementos de Física moderna mezclados con los clásicos. Como ya hemos señalado, su tratamiento de la ciencia como un proceso meramente acumulativo, conduce a que la Física moderna no aparezca como un cuerpo de conocimientos que rompe con la visión clásica, ya que no proporcionan una imagen del comportamiento de la materia con diferencias radicales respecto a la que nos proporciona la Física clásica.

c) Puedan llegar a introducir errores conceptuales en los alumnos. Nos referimos más específicamente a:

-La introducción directa o explícita de errores por interpretaciones incorrectas que en parte coincidirían con las que se cometieron en la génesis de la Física moderna -debido a las relaciones existentes entre el desarrollo de los conocimientos científicos y el desarrollo psicológico de los individuos (Piaget 1970 a)- y en desacuerdo con las concepciones actualmente vigentes (Warren 1976). Como señala Lehrman (1982) algunos de dichos errores aparecerían hoy en los textos por un mecanismo de transmisión debido a la aceptación acrítica de lo incluido en otros anteriores.

-La falta de un tratamiento didáctico clarificador, lo que equivale a provocar el error al no mostrar como 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.

d) No lleguen a mostrar el considerable desarrollo científico

y tecnológico que supuso la nueva Física (Levy-Leblond 1984) con la cual la Física moderna les parece a los alumnos y profesores "una rama esotérica y marginal de las ciencias físicas", cuyo único campo de aplicación parece ser el "estudio de los objetos microscópicos" (Balibar et al 1984).

2. De acuerdo con nuestra hipótesis esperamos encontrar entre los profesores en formación y en activo que:

a) No se propongan desarrollar temarios en los que aparezcan claramente -de forma cualitativa- los límites de las concepciones clásicas y el lugar de la Física moderna. Esto se traduciría en la inexistencia de un hilo conductor, es decir, de una selección y secuencialización de contenidos, fundamentada en unos criterios, tales como mostrar la crisis y los límites de la Física clásica y la diferente visión del comportamiento de la materia que supone la Física moderna, sin lo cual la visión de la Física resulta incompleta e incorrecta.

b) Acepten, por tanto, acriticamente el temario oficial -carente, como veremos, de dicho hilo conductor- y los libros de texto que lo desarrollan.

3. También esperamos encontrar que los alumnos, en gran parte debido al tratamiento dado por el profesorado y a los libros de texto utilizados:

a) Ignoren la existencia de crisis en el desarrollo de la Física, en particular, las crisis de los paradigmas pregalileano y clásico.

- b) Desconozcan las causas de la crisis de la Física clásica.
- c) No conozcan sus límites de validez.
- d) No alcancen, ni siquiera, una visión cualitativa correcta del comportamiento de la materia según las concepciones modernas.
- e) Incurran en errores conceptuales relevantes.

### 3.2. DISEÑO PARA CONTRASTAR LA PRIMERA HIPÓTESIS

Para comprobar los distintos puntos enumerados en la operativización de nuestra primera hipótesis:

-Hemos elaborado cuestionarios para el análisis de textos, para el profesorado y para alumnos de BUP y COU

-Hemos aplicado dichos cuestionarios a los referidos colectivos

-Hemos tenido entrevistas y discusiones complementarias con los alumnos

-Hemos realizado el tratamiento estadístico habitual de los resultados

#### 3.2.1. PREPARACION DE LOS CUESTIONARIOS

En la preparación de los cuestionarios se tendrán en cuenta las siguientes técnicas usuales de investigación educativa (Serramona 1980, Open University 1979, Fox 1981):

-elaboración de un primer borrador a someter a cierto número de expertos para su revisión

-ensayo piloto para analizar la validez del cuestionario revisado (facilidad de comprensión de los items, coherencia de los resultados...)

-reelaboración del cuestionario a la luz del análisis de los resultados del ensayo piloto

El análisis de textos se ha realizado independientemente por dos investigadores, con objeto de constatar la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Los ensayos piloto para llegar a la obtención de los cuestionarios utilizados se han realizado con 7 libros de texto, dos grupos de alumnos de 3º de BUP, con 30 y 23 alumnos respectivamente y miembros de los Seminarios de Física y Química de dos Institutos de Bachillerato.

Presentaremos en el párrafo siguiente los cuestionarios en la forma en que se han aplicado a 42 textos, a 65 profesores y a 526 alumnos, que sobrepasan los que ordinariamente se necesitan para este tipo de estudios.

### 3.2.2. CUESTIONARIO PARA EL ANÁLISIS DE TEXTOS

El cuestionario que hemos elaborado para el análisis de textos se adjunta a continuación (Cuadros 3.2.2.a y 3.2.2.b). Como puede verse consta de dos partes:

La primera de ellas versa sobre el tratamiento que cada texto estudiado realiza sobre la Física moderna y consta de 7 ítems. Los 6 primeros cuestionan la existencia o no de párrafos que aborden, aunque sea en forma breve, los aspectos enunciados en cada ítem y el último considera el número de páginas que se dedican a la Física moderna.

De acuerdo con nuestra hipótesis no esperamos encontrar en la mayoría de los textos una síntesis de la Física clásica (ítem 1), ni referencias a la visión del comportamiento de la materia que nos proporciona (ítem 2), ni a las causas de su crisis (ítem 3), ni a sus límites de validez (ítem 4), ni a las diferencias de la Física moderna respecto a la clásica (ítem 5), ni a sus

Cuadro 3.2.2a.- Cuestionario para el análisis de textos  
(1ª parte).

TEXTO ANALIZADO	
Titulo Autor (es) Editorial	Nivel
1ª PARTE	
1. ¿Se sintetizan en algun momento las principales conquistas de la Física clásica, tanto científicas como técnicas?	SI( ) ver pag NO( )
2. ¿Se hace referencia a la imagen del comportamiento de la materia que proporciona la Física clásica, así como a sus hipótesis subyacentes?	SI( ) ver pag NO( )
3. ¿Aparece tratada la crisis de la Física clásica?	SI( ) ver pag NO( )
4. ¿Se hace referencia en algun momento a los límites de validez de la Física clásica?	SI( ) ver pag NO( )
5. ¿Aparece la Física moderna como un nuevo cuerpo de conocimientos que rompe con la visión clásica, dando una imagen radicalmente diferente del comportamiento de la materia?	SI( ) ver pag NO( )
6. ¿Se hace referencia explícita al importante desarrollo científico y tecnológico que facilitó la nueva Física?	SI( ) ver pag NO( )
7. Número de páginas dedicadas al tratamiento de la Física Moderna ( ) pag. Porcentaje respecto a la totalidad del texto ( %)	

Cuadro 3.2.2b.- Cuestionario para el análisis de textos  
(2ª parte).

2ª PARTE

8. ¿Se trata debidamente la relación masa/energía?

- No se trata ( )
- Se incurre en el error de las supuestas transformaciones masa/energía ( ) ver pag.
- Se trata correctamente ( ) ver pag.

9. ¿Se trata debidamente la dualidad onda/corpusculo?

- No se trata ( )
- No se intenta interpretar ( )
- Se elimina la dualidad reduciéndola al aspecto ondulatorio o corpuscular ( ) ver pag.
- Se trata correctamente ( ) ver pag.

10. ¿Se trata debidamente la indeterminación introducida por la Física cuántica?

- No se trata ( )
- No se interpreta ( ) ver pag.
- Se interpreta como falta de precisión de los instrumentos ( ) ver pag.
- Se interpreta como pura aleatoriedad ( ) ver pag.
- Se da una interpretación correcta ( ) ver pag.

11. ¿Se trata debidamente la cuestión de las partículas elementales de la materia?

- No se trata explícitamente ( )
- Se mantiene la idea mecanicista de componente "último", sin estructura interna ( ) ver pag.
- Se da una interpretación correcta ( ) ver pag.

múltiples aplicaciones, tanto teóricas como prácticas (item 6).

La segunda parte trata de los errores conceptuales que, según nuestra hipótesis, esperamos encontrar en los libros. Para ello se han seleccionado errores que hacen referencia a algunos aspectos fundamentales de la Física moderna.

Así, aunque sobre los trabajos de Einstein existen numerosas interpretaciones incorrectas (Resnick 1980) hemos seleccionado una de las más frecuentes e importantes, consistente en una malinterpretación de la relación de Einstein de equivalencia entre la masa y la energía (Warren 1976). Se habla así de las "transformaciones (o conversiones) de materia en energía", con todas las consecuencias que ello implica: "la refutación de la conservación de la masa o de la energía o de ambas", o la distinción de algún tipo particular de energía, usualmente, la energía nuclear. Según esta interpretación, en una reacción nuclear "desaparece" masa y "se crea" energía. Se atribuye así un sentido literal, con el mismo significado que en la Física clásica, a los términos de "desmaterialización" y de "materialización". Este error se halla tan extendido que Lehrman (1982), en un análisis realizado sobre 14 textos estadounidenses de nivel preuniversitario encontró dicho error en un 50 % de ellos.

Otros errores, cuyo estudio realizaremos, son análogos a algunos que se cometieron durante la génesis de los conceptos a que hacen referencia.

Así, en primer lugar, el intento de reducir la dualidad onda corpúsculo a un aspecto puramente ondulatorio (las partículas

serían paquetes de ondas) o puramente corpuscular (explicándose el comportamiento ondulatorio por la presencia de un gran número de partículas) (Lalöe 1984b, Wheaton 1984).

En segundo lugar, el intento de interpretar las relaciones de indeterminación atribuyéndolas a posibles faltas de precisión de los instrumentos y técnicas utilizados, subsanables por tanto con un perfeccionamiento de dichos instrumentos y técnicas, o bien, el considerar que el principio de indeterminación impide medir con precisión y que, por tanto, la posición y la cantidad de movimiento no son buenos observables (Chevalley 1984, Bartell 1985).

Y, para finalizar, un tratamiento simplista, mecanicista, de las partículas elementales, considerándolas como "bolas de billar microscópicas", componentes últimos de la materia, sin estructura interna (Ridnik 1978).

Este estudio se concreta en 4 items de respuesta múltiple, que incluyen los errores directos enumerados, los errores por omisión -que como ya dijimos consisten en no tratar la cuestión, introduciendo escuetamente un enunciado, sin mostrar su ruptura con la Física clásica o sin interpretarlo- y la posibilidad de un tratamiento correcto.

#### 3.2.2.1. Criterios de valoración de los items del cuestionario

Vamos a exponer a continuación los criterios de valoración que hemos aplicado a los items incluidos en el cuestionario para el análisis de los textos.

Item 1. ¿Se sintetizan en algún momento las principales conquistas de la Física clásica, tanto científicas como técnicas?

Hemos considerado correcto el tratamiento de la cuestión (y por tanto negativo para nuestra hipótesis) si existe algún párrafo de síntesis que haga referencia, por ejemplo, al papel fundamental de la Mecánica, "aplicada a situaciones tan diferentes como el lanzamiento de un proyectil, el giro de los planetas o incluso a las partículas del mundo microscópico, causantes de la presión de los gases, la producción y propagación del sonido, etc", indicando cómo "los fenómenos caloríficos también se integraron en el esquema mecánico, y la construcción de las máquinas térmicas supuso un factor esencial para la revolución industrial. También la electricidad se desarrolló siguiendo inicialmente los esquemas de la mecánica hasta terminar abrazando, en la teoría electromagnética, a la misma óptica y dando lugar a conquistas técnicas tan fundamentales como la producción y transmisión de la corriente eléctrica o de las ondas electromagnéticas" (esta cita se ha tomado de uno de los textos analizados, Beltran et al, 1977, lo que nos permite mostrar como es posible tratar el tema a este nivel. También existen tratamientos análogos más amplios en Harvard Project 1970 y Holton 1976)

Item 2. ¿Se hace referencia explícita a la imagen del comportamiento de la materia que proporciona la Física clásica,

así como a las hipótesis subyacentes en dicha visión?

En este ítem consideramos correcta la existencia de algún párrafo que muestre cómo "la imagen de la naturaleza del siglo XIX (...) distinguía entre materia substancial y luz etérea" (Wheaton 1984), sometida la primera a las leyes de la Mecánica de Newton y la segunda a las leyes del Electromagnetismo de Maxwell. Una materia que se desplaza en un espacio absoluto, independiente de los objetos que contiene y que no ejerce ninguna acción sobre los mismos, sufriendo una evolución medible en una escala temporal también absoluta (Beltran et al 1977, Holton 1976)

Ítem 3. ¿Aparece tratada en algún momento la crisis de la Física clásica?

Pretendemos constatar la existencia o no de algún párrafo que enumere alguno de los fenómenos que no encontraron explicación en el marco de la Física clásica y que, por tanto, exigieron un cambio profundo en las concepciones clásicas.

En particular señalaremos el fracaso en la detección de un sistema de referencia en reposo absoluto (el éter), la composición espectral de la luz producida por sólidos y líquidos incandescentes, los espectros de rayas de los gases, el efecto fotoeléctrico, la inestabilidad del modelo atómico de Rutherford (Deligeorges 1984, PSSC 1980).

En este ítem se considerará también desfavorable para nuestra hipótesis la existencia de breves párrafos por separado para cada fenómeno, pero con la condición de que muestren

explícitamente la contradicción con la Física clásica y la crisis que esto supuso.

Item 4. ¿Se hace referencia en algún momento a los límites de validez de la Física clásica?

Con este ítem hemos intentado verificar la existencia o no de fragmentos del texto que indiquen el campo delimitado de fenómenos en que funcionan las teorías clásicas, explicitando cuales son dichos límites de validez. En concreto, el límite relativista (que las velocidades involucradas sean del orden de la velocidad de la luz) y el límite cuántico (asociado al principio de indeterminación de Heisenberg) (Resnick 1976).

Item 5. ¿Aparece netamente la Física moderna como un nuevo cuerpo de conocimientos que rompe con la visión clásica, dando una imagen radicalmente diferente del comportamiento de la materia?

Con este ítem pretendemos verificar la existencia o no de párrafos en los textos que manifiesten la novedad de la Física moderna respecto de la Física clásica, explicitando las diferencias entre ambas. Por ejemplo, la variación de la masa con la velocidad, la equivalencia entre masa y energía, en el dominio de la Física relativista y la cuantización de la energía, del momento angular, y el comportamiento dual de la materia, en el de la Física cuántica.

Item 6. ¿Se hace referencia al importante desarrollo científico y tecnológico que supuso la nueva Física?

Se considera el ítem desfavorable a nuestra hipótesis si aparece algún párrafo que explicita cómo la teoría fue capaz de extender su campo de acción al conjunto de los fenómenos del mundo microscópico, en particular a la estructura electrónica de los átomos y al enlace químico, a la conductividad, al magnetismo y, en general, a la naturaleza de los sólidos; de abordar nuevos problemas como la estructura nuclear y el mundo de las partículas elementales y que mencione alguno de los grandes campos de aplicación (la microelectrónica -origen de lo que ya se denomina 2ª revolución industrial-, la Química moderna, el laser, la energía nuclear, etc) (Balibar et al 1984, Levy-Leblond 1984)

Item 7. Número de páginas dedicadas al tratamiento de la Física moderna y porcentaje respecto a la totalidad del texto.

Dado que el objetivo de nuestra hipótesis es probar que el problema de la enseñanza de la Física moderna no es tanto de extensión cuanto de tratamiento didáctico, esperamos encontrar un porcentaje reducido de páginas dedicadas a la Física moderna, aunque análogo al de otros países (por ejemplo, EEUU).

Para evaluar dicho número de páginas hemos considerado como Física moderna el conjunto de los temas que incluían conceptos que requerían un tratamiento relativista o cuántico, aunque estuvieran entremezclados en el texto con los conceptos clásicos.

Items 8 a 11. Respecto a los errores conceptuales consideremos

como favorable a nuestra hipótesis el incurrir en los errores señalados al final del apartado anterior (el 3.2.2) o el incurrir en error por omisión.

### 3.2.3. CUESTIONARIO PARA PROFESORES

Investigaciones educativas en muy diversos campos han mostrado que existe una gran correlación entre los resultados obtenidos con los profesores en activo y en formación y, también, con los obtenidos con los libros de texto (Open University 1979). Esto permite simplificar la investigación ya que estudiando dos de estos grupos (por ejemplo, libros de texto y profesores en formación), podemos tener información suficiente.

El cuestionario elaborado para verificar nuestra hipótesis en lo que concierne a profesores en formación consta de dos cuestiones abiertas (Cuadro 3.2.3), que se entregan por separado para evitar que la segunda pueda influir en la respuesta de la primera.

El primer ítem trata de verificar la inexistencia de un hilo conductor y, en particular, la ausencia de referencias a la crisis de la Física clásica, sus límites, a las distintas visiones sobre el comportamiento de la materia de las Físicas clásica y moderna, etc.

El segundo pretende mostrar la aceptación acrítica del temario oficial, a pesar de su carácter desestructurado, que al mezclar la Física moderna con la clásica, no muestra claramente

Cuadro 3.2.3.- Cuestionario para profesores.

Titulación: Físico ( ) Químico ( ) otros ( ) especificar:

1. Indicar que aspectos de la Física moderna convendría introducir en el "Curriculum" de Física y Química de BUP y COU y en que orden. Justificar brevemente. Indicar, en cada caso, si se propone una introducción cualitativa o cuantitativa.

2. Este es el programa oficial de Física y Química de 3º de BUP - relacionado con la Física moderna:

- 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:

- Electrónica. Ondas electromagnéticas.
- Naturaleza de la luz. Dualidad onda corpúsculo.
- Física nuclear de baja y alta energía. Energía nuclear.

Juzgar su validez para introducir la Física moderna en BUP y COU.

la crisis de esta última.

### 3.2.3.1. Criterios de valoración de los ítems

Respecto al primer ítem, se considera favorable a nuestra hipótesis si el profesorado no menciona ningún criterio que justifique su elección de contenidos ni propone ningún tipo de tratamiento.

En cuanto al segundo, es favorable si no indican ningún planteamiento crítico sobre la validez de los temarios oficiales para introducir la Física moderna.

### 3.2.4. CUESTIONARIO PARA ALUMNOS

Con el fin de comprobar que los alumnos no adquieren en general unos conceptos mínimos sobre Física moderna, se ha elaborado el siguiente cuestionario, que consta de tres partes (Cuadros 3.2.4.a, 3.2.4.b y 3.2.4.c).

La primera está constituida por una sola pregunta de carácter abierto. La hemos presentado por separado para evitar que los enunciados de las restantes preguntas orienten la contestación. Intenta demostrar que los alumnos suelen desconocer la existencia de crisis en el desarrollo de la Física (en particular, la del paradigma pregalileano que originó la Física clásica y la crisis de ésta, que originó la Física moderna). Además, su carácter abierto permite detectar errores en la concepción sobre el desarrollo de las ciencias (por ejemplo, una

Cuadro 3.2.4.- Cuestionario para alumnos (1ª y 2ª partes).

1.1. 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.

-----

2.1. Hacia 1880, 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 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.

-

-

-

2.2. 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.

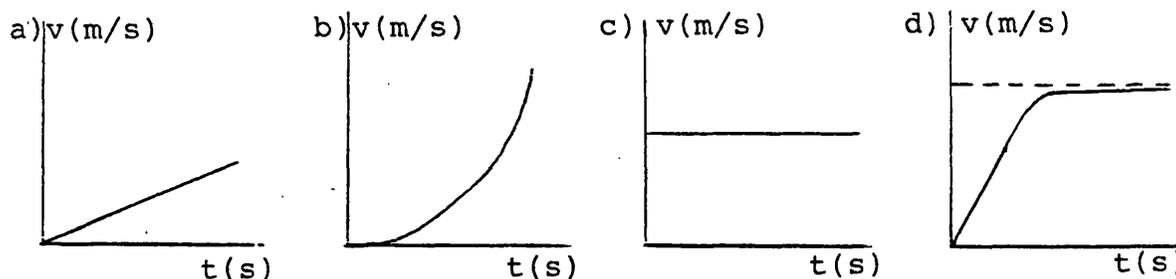
-

-

-

Cuadro 3.2.4b.- Cuestionario para alumnos (3ª parte).

3.1. 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:

Explicar.

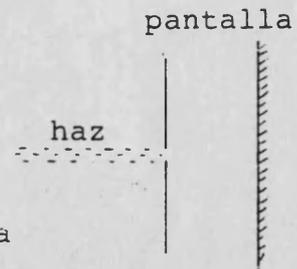
- a -
- b -
- c -
- d -
- No se -

El comportamiento según la física moderna se representa mejor por la gráfica:

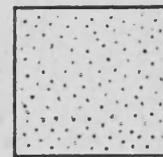
Explicar.

- a -
- b -
- c -
- d -
- No se -

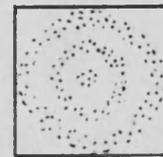
3.2. Supongamos que pudieramos hacer pasar un haz de electrones a través de un estrecho orificio frente al cual se encuentra una pantalla (constituida por una placa fotográfica). Indicar qué imagen se formaría en la pantalla según la física clásica y según la física moderna.



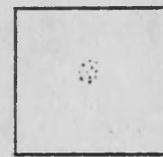
a) Aparece impresionada toda la placa de forma regular



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 se -

La concepción moderna se ajusta al esquema:  
Explicar.

- a -
- b -
- c -
- No se -

3.3. 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.

visión meramente acumulativa sobre la evolución de los conocimientos científicos).

La segunda parte está constituida por dos preguntas de carácter abierto. La 1ª trata de verificar si los alumnos ignoran las causas de la crisis de la Física clásica, es decir, algunos de los problemas que no fue capaz de explicar. La 2ª, pretende comprobar que los alumnos no alcanzan una visión correcta del comportamiento de la materia según la Física moderna y, en consecuencia, una visión más coherente de la Física clásica, ya que son incapaces de indicar las diferencias esenciales que existen entre ambas. Análogamente, el carácter abierto de ambas permite detectar errores conceptuales (Por ejemplo, la "transformación de masa en energía o la reducción de la dualidad a un aspecto meramente corpuscular u ondulatorio).

La 3ª parte esta constituida por 3 ítems, 2 de elección múltiple, con explicación de la elección, y otra de carácter abierto. El primero de ellos pretende mostrar que los alumnos desconocen la variación de la masa con la velocidad y el carácter límite de la velocidad de la luz. Los 2 distractores introducidos responden a posibles errores conceptuales de los alumnos: considerar que si la fuerza es constante la velocidad también lo es y atribuir una dependencia no lineal de la velocidad con el tiempo en un caso de aceleración uniforme. El 2º ítem pretende mostrar que los alumnos no conocen el comportamiento dual de los electrones. El distractor introducido muestra el error de considerar que los electrones se distribuyen de forma puramente aleatoria. Y para finalizar, el 3º, intenta

constatar que los alumnos ignoran las razones tanto teóricas como experimentales en contra del modelo de órbitas de Bohr-Sommerfeld.

### 3.2.3.1. Criterios de valoración de los items

Exponemos a continuación los criterios de valoración de los items del cuestionario propuesto a los alumnos.

Item 1.1. "(...) Indicar muy brevemente, las grandes crisis que se han producido en el desarrollo de la Física".

Aunque en el item hemos ofrecido la posibilidad de hacer referencia a las dos grandes crisis del desarrollo de la Física (las crisis de la Física pregalileana y de la Física clásica) sólo consideraremos contraria a nuestra hipótesis la referencia a la crisis de la Física clásica, que dió paso a la Física moderna objeto de nuestro análisis.

Item 2.1. "(...) A comienzos del siglo XX se descubrieron una serie de hechos que no encontraron justificación en el marco de la Física clásica (...) Cita, como mínimo, 3 de esos hechos".

Se consideran correctas contestaciones como: efecto fotoeléctrico, espectros discontinuos de gases, espectros continuos en sólidos y líquidos, inexistencia de un sistema de referencia en reposo absoluto, inestabilidad del átomo de Rutherford, etc. También se considera correcto que se hable sólo de espectros, sin más precisiones, ya que es habitual explicar

sólo los discontinuos.

Se distribuyen las respuestas en dos grupos: alumnos que mencionan algún (3, 2 o 1) fenómeno y alumnos que no mencionan ninguno. Con un criterio muy benigno hemos considerado favorable a nuestra hipótesis sólo éste último.

Item 2.2. "La Física clásica da una visión del comportamiento de la materia distinta de la que proporciona la Física moderna. Cita, como mínimo, 3 de esas diferencias".

Se aceptan como correctas contestaciones que hagan referencia, por ejemplo, a la variación de la masa con la velocidad, a la equivalencia de masa y energía, a la cuantización de la energía, al comportamiento dual de la materia, a las relaciones de indeterminación, a los orbitales atómicos en contraposición con las órbitas, etc.

Analogamente al ítem anterior se distribuyen las contestaciones en 2 grupos: los que incluyen alguna y ninguna diferencia y sólo consideramos favorable a la hipótesis este último grupo.

Item 3.1. "Supongamos un cuerpo sobre el que actúa una fuerza constante. Indicar que gráfica representaría mejor la variación de la velocidad que experimenta ese cuerpo según la Física clásica y según la Física moderna (...) Explicar".

Sólo se consideran contrarias a nuestra hipótesis las elecciones a para la Física clásica y d para la Física moderna, acompañadas de sus respectivas explicaciones (en el primer caso,

basta indicar que según la Física clásica, si la fuerza es constante, la velocidad crece linealmente con el tiempo y en el 2º que, según la Física moderna, la velocidad del cuerpo tenderá asintóticamente a la velocidad de la luz).

Se distribuyen las contestaciones en 2 grupos: alumnos con interpretación según la Física moderna correcta o incorrecta. Lógicamente, este último se considera favorable a nuestra hipótesis de que los alumnos desconocen las diferencias de comportamiento y los límites de validez.

Item 3.2. "Supongamos que pudieramos hacer pasar un haz de electrones a través de un estrecho orificio frente al cual se encuentrea una pantalla (...) Indicar que imagen se formaría en la pantalla según la Física clásica y según la Física moderna (...) Explicar".

Como este item es análogo al anterior, el tratamiento será el mismo. Se consideran correctas las elecciones c para la Física clásica, por el caracter corpuscular del electrón y su propagación rectilínea, y b para la Física moderna, por el carácter dual del electrón.

Se distribuyen las respuestas en 2 grupos: alumnos con la contestación correspondiente a la Física moderna correctas o incorrecta, siendo este último favorable a nuestra hipótesis.

Item 3.3. "Indica, para interpretar la estructura electrónica del átomo, que razones existen desde el punto de vista de la Física moderna en contra de las órbitas de Bohr-Sommerfeld".

Se trata de un ítem abierto en el que se consideran correctas contestaciones que hagan referencia a las razones tanto experimentales (no explicar los espectros de los átomos no hidrogenoideos, la intensidad y anchura no nula de las rayas emitidas, la existencia de direcciones privilegiadas en los enlaces atómicos, etc) como teóricas (contradicción con las relaciones de indeterminación, etc).

Se distribuyen las contestaciones en 2 grupos: alumnos que mencionan alguna razón y alumnos que no indican ninguna. Este último grupo se considera favorable a la hipótesis.

### 3.2.5. TAMAÑO DE LAS MUESTRAS Y FORMAS DE APLICACION DE LOS CUESTIONARIOS

Uno de los problemas de la investigación didáctica es el tamaño de las muestras. Actualmente, en parte gracias a trabajos como los realizados por Piaget y colaboradores con muestras pequeñas, se ha superado la idea, impuesta a mediados de siglo por organismos como el American Educational Research Association, de que el grado de generalidad depende fundamentalmente del tamaño de las muestras (Novack 1982).

En efecto, como señalan Larkin y Rainard (1984), "la mayor parte de las investigaciones no usan grandes muestras para aumentar la generalización. En cambio suelen o estimar muchos parámetros en un modelo detallado o aumentar la significación estadística en un factor significativo para el tamaño de la muestra".

Para este tipo de trabajos se considera que el número estadísticamente significativo de individuos a encuestar es como mínimo de 30 a 50 (Open University 1979). Además, se procura controlar muchos parámetros y abordar el problema desde diferentes perspectivas (textos, profesores, alumnos) y se espera que sea sometido a replicaciones posteriores.

Por otra parte, el carácter aleatorio de la muestra queda asegurado por el elevado número de individuos encuestados y por su pertenencia a distintos Institutos de Bachillerato de distintas ciudades (6 y 4, respectivamente), en el caso de los alumnos, y a distintas Facultades, en el caso de los profesores en formación, licenciados que son alumnos de los Cursos de Aptitud Pedagógica (CAF).

En cuanto a la forma de aplicación, el cuestionario de alumnos se les ha pasado después de que a estos se les habían impartido los temas de Física moderna y sin que el profesor de la asignatura tenga conocimiento del contenido del mismo. Se explica a los alumnos que no se trata de ningún examen, que el cuestionario consta de 3 partes de 1, 2 y 3 preguntas respectivamente, que las respuestas han de ser breves y que disponen del tiempo que crean necesario (encontrándose que ningún alumno superó el plazo de una hora). Además, para evitar que las partes posteriores orienten la contestación de las anteriores, se indica que avisen al finalizar cada una de ellas para recogerlas y suministrar las siguientes. Para finalizar y para evitar posibles dudas en la lectura, se añade que la Física

clásica es la relacionada con los trabajos de Galileo, Newton, etc.

El pase del cuestionario a los profesores en formación se efectuó durante los cursos de Aptitud Pedagógica, haciendo resaltar que no se trataba de prueba alguna -pero que las respuestas tienen interés porque orientan el trabajo del curso- y que la contestación era totalmente anónima.

## Capítulo 4.

### PRESENTACION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE LA PRIMERA HIPOTESIS

- 4.1. Presentación de los resultados obtenidos con el cuestionario de textos
- 4.2. Análisis de los resultados del cuestionario de textos
- 4.3. Presentación y análisis de los resultados obtenidos con el cuestionario de profesores
- 4.4. Presentación de los resultados obtenidos con el cuestionario de alumnos
- 4.5. Análisis de los resultados del cuestionario de alumnos

-----  
Cap 4. PRESENTACION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE LA PRIMERA  
HIPOTESIS  
-----

4.1. PRESENTACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL CUESTIONARIO  
DE TEXTOS

El análisis del tratamiento que los textos dan a la Física moderna se ha realizado con una muestra de 42 libros, 14 de los cuales corresponden a 2º de BUP, 15 a 3º y 13 a Física de COU y cuya relación se incluye en los Cuadros 4.1.a, b y c).

Se trata de una muestra superior a la utilizada en trabajos similares. Por ejemplo, Brattin et al (1982), Lehrman (1982) y Bullejos (1983) analizan 14 textos y Aguirre de Carcer (1983) sólo 5. Por otra parte, esta muestra es representativa porque incluye la casi totalidad de los textos existentes en el mercado para esos niveles y cubre un 80 % o más de la población estudiantil que escoge esas asignaturas.

Recordemos que con la 1ª parte del cuestionario se trata de comprobar que la mayoría de los libros de texto proporcionan una visión desestructurada que mezcla las concepciones clásica y modernas y no muestra la ruptura entre ambas; con la 2ª parte, se pretende mostrar la existencia de errores conceptuales en los propios textos.

Antes de pasar a exponer los resultados conviene señalar que para su tratamiento estadístico hemos utilizado las técnicas

habituales en el análisis de los valores cualitativos (Serramona 1980, Open University 1979, Fox 1981).

Presentamos los resultados en tablas, indicando el porcentaje de casos favorables a nuestra hipótesis junto al valor de la desviación estándar  $s$ . Como ya indicamos, para los 6 primeros items, será favorable a nuestra hipótesis la no aparición de párrafos relativos a los aspectos considerados en cada uno de ellos. Queremos señalar que el criterio utilizado para considerar el tratamiento de un texto desfavorable a nuestra hipótesis ha sido muy benigno ya que basta cualquier referencia a dichos aspectos. Recordemos también que para los 4 items relativos a errores conceptuales se considerará favorable para la hipótesis el que se incurra, directamente o por omisión, en los errores a los que se refieren dichos items.

Con objeto de facilitar la interpretación de la tabla incluimos en ella el enunciado de cada cuestión de modo que los resultados se refieran directamente al mismo. Además, para favorecer una visión comparativa de los resultados se adjunta un diagrama de barras. En el apartado 4.2 procedemos al análisis de dichos resultados.

AUTORES	AÑO	TITULO	EDITORIAL	CIUDAD
Bascones F y otros	1982	Física y Química	Luis Vives	Zaragoza
Beltran J y otros	1983	Física y Química	Anaya	Salamanca
Cacho F y otros	1977	Física y Química	Santillana	Madrid
Feo R y otros	1976	Física y Química	Bello	Valencia
Fidalgo J.A	1984	Física y Química	Everest	León
Lasheras L.A y Carretero MP	1984	Positron	Vicens-Vives	Barcelona
Lozano F y Negro J.L	1980	Spin	SM	Madrid
Marin F y Negro J.L.	1982	Física y Química	Alhambra	Madrid
Martín J y otros	1981	Física y Química	Magisterio Español	Madrid
Martinez A	1978	Enlace II	Bruño	Madrid
NagoreE y Miralles L	1976	Física y Química	ECIR	Valencia
Olarte M.A y otros	1984	Física y Química	SM	Madrid
Pujol M y Bozal J	1976	Física y Química	Teide	Barcelona
Soler P y otros	1981	Física y Química	SM	Madrid

Cuadro 4.1.a.- RELación de libros de 2º BUP utilizados en el análisis de textos.

AUTORES	AÑO	TITULO	EDITORIAL	CIUDAD
Aguilar J y Garzón J.L	1977	Física y Química	Anaya	Salamanca
Arago C y otros	1977	Física y Química	Santillana	Madrid
Beltrán y otros	1980	Física y Química	Anaya	Salamanca
Buendia M y Dolz M	1978	Física y Química	SM	Madrid
Dou J.M. y otros	1982	Física y Química	Casals	Barcelona
Esteban J.M. y otros	1981	Hacia la Física y la Química 2	Alhambra	Madrid
Fidalgo J.A.	1980	Física y Química	Everest	León
Lasheras A.L y Carretero M	1978	Spin	Vicens-Vives	Barcelona
Latorre M y otros	1981	Física y Química	Edelvives	Zaragoza
Marin F y Negro J.L.	1982	Física y Química	Alhambra	Madrid
Martinez A	1977	Enlace II	Bruno	Madrid
Miralles L y Nagore E	1978	Física y Química	ECIR	Valencia
Paraira M y Roman R	1977	Orbital	Vicens-Vives	Barcelona
Perez A	1979	Física y Química	Marfil	Alcoy
Pujol M y otros	1979	Física y Química	Teide	Barcelona

Cuadro 4.1.b.- Relación de libros de 3º de BUP utilizados en el análisis de textos.

AUTORES	AÑO	TITULO	EDITORIAL	CIUDAD
Aguilar J y otros	1980	Física	Anaya	Madrid
Agulles J y otros	1980	Física	Magisterio	Madrid
Alsina J y otros	1979	Física	Teide	Barcelona
Casanova J y otros	1982	Física	Santillana	Madrid
Caturla E y Vidal E	1980	Quark	Vicens Vives	Barcelona
Feo R y otros	1978	Física	Bello	Valencia
Guillem C	1980	Física	Marfil	Alcoy
Lloria A y Gonzalez P	1979	Física	SM	Madrid
Manuel E y Salinas F	1981	Física	Luis Vives	Zaragoza
Marin F	1981	Cerca de la Física	Alhambra	Madrid
Martinez A y otros	1978	Física	Bruño	Madrid
Miralles L y otros	1978	Física	ECIR	Valencia
Olañte M.A y otros	1984	Física	SM	Madrid

Cuadro 4.1.c.- Relación de libros de Física de COU utilizados en el análisis de textos.

Tabla 4.1.a.- Resultados del análisis de textos (1ª parte)  
(N = 42 textos: 14 de 2ª de BUP, 15 de 3º y  
13 de FISICA de COU).

<u>Aspecto analizado:</u>	<u>% de textos que no hacen referencia a dicho aspecto</u>	
	<u>%</u>	<u>S</u>
1. ¿Se sintetizan en algún momento las principales conquistas de la Física clásica, tanto científicas como técnicas?	95.1	3.3
2. ¿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
3. ¿Aparece tratada la crisis de la Física clásica?	83.3	5.8
4. ¿Se hace referencia en algún momento a los límites de validez de la Física clásica?	90.5	4.5
5. ¿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
6. ¿Se hace referencia explícita al importante desarrollo científico y tecnológico que facilitó la nueva Física?	95.2	3.3

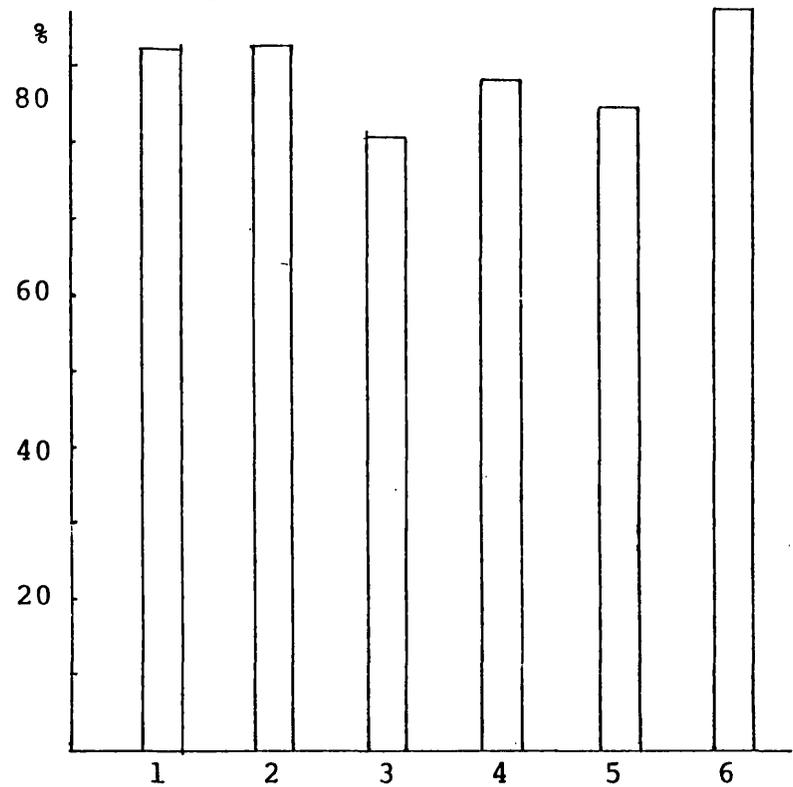
Tabla 4.1.b.- Resultados del análisis de textos (2ª parte)  
 ( N = 28 textos: 15 de 3º de BUP y 13 de COU)

Aspecto analizado: % de textos que no tratan  
debidamente dicho aspecto:

	%	S
1. Relaciones masa/ energía	78.6	7.8
2. Dualidad onda/corpúsculo	67.9	8.8
3. Relaciones de indeterminación	71.6	8.5
4. Idea de partícula "elemental"	78.6	7.8

Porcentaje de textos que no hacen referencia a los aspectos que se enumera:

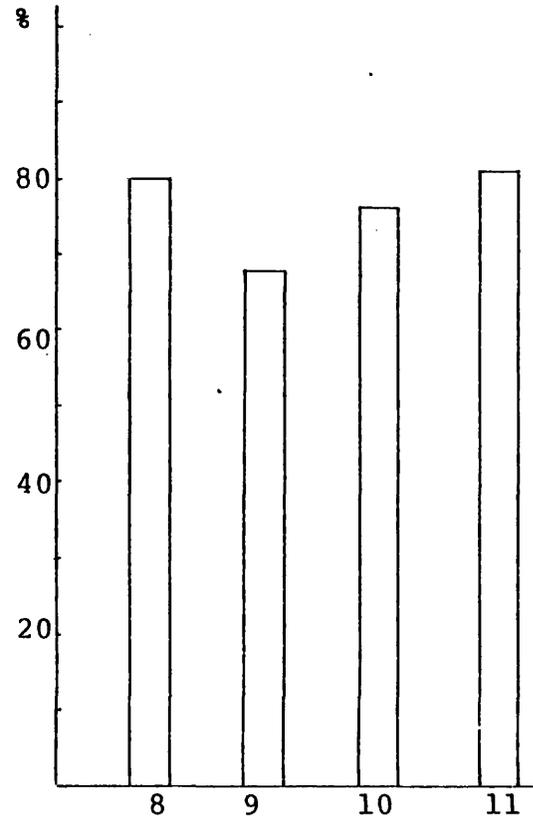
1. A la síntesis de la Física clásica (FC)
2. A la imagen del comportamiento de la materia de la FC.
3. A la crisis de la FC.
4. A los límites de validez de la FC.
5. A la nueva imagen del comportamiento de la materia que proporciona la Física Moderna (FM)
6. Al desarrollo científico-técnico que facilitó la FM.



Grafica 4.1.a.- Resultados del análisis de textos (1ª parte)

Porcentaje de textos que no trata debidamente los aspectos que se indica

8. Relaciones masa/energía
9. Dualidad onda/corpusculo
10. Relaciones de indeterminación
11. Concepto de partícula "elemental"



Grafica 4.1.b.- Resultados del análisis de textos. (2ª parte).

#### 4.2. ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL CUESTIONARIO DE TEXTOS

Como podemos ver en la Tabla 4.1.1.a los resultados de los items 1 a 6 muestran que la mayoría de los textos (entre el 83.3 % y el 95.2 %) dan una visión desestructurada de la Física moderna que confirma nuestra hipótesis de trabajo.

Particularmente notable es la semejanza de los resultados obtenidos en cada item. No se trata, como vemos, de que algunos aspectos aparezcan mejor o peor tratados. La práctica ausencia de todos ellos en la generalidad de los textos refuerza la coherencia del resultado: no hay ni siquiera referencias puntuales al carácter no lineal del desarrollo de la ciencia y los elementos de Física moderna introducidos lo son sin mostrar su radical novedad. Se pierde así una ocasión privilegiada para contribuir a dar una imagen más justa del trabajo científico y particularmente de la importancia de las revoluciones científicas.

En cuanto al item 7 muestra que el porcentaje medio de páginas dedicadas al tratamiento de la Física moderna respecto a la totalidad del texto es del 12.3 % (5.1) no significativamente inferior al 16.6 % (9.9) encontrado en 14 textos estadounidenses de nivel preuniversitario (Brattin et al 1982), dado que aquí se incluyen textos de tres niveles. Esta es por tanto la situación general. Cabe pues concluir que, de acuerdo con nuestra hipótesis, el problema de la enseñanza de la Física moderna no es atribuible a la cantidad de conceptos introducidos, al tiempo dedicado, etc, sino fundamentalmente al

tipo de tratamiento empleado.

En cuanto a los errores conceptuales, podemos comprobar en los resultados de los ítems 8 a 11 que un gran porcentaje de los textos (entre el 67.9 % y el 78.6 %) incurre en ellos. En particular, se puede señalar que tanto en el caso de la equivalencia masa/energía como en el de la dualidad onda/corpusculo, el 78.6 y el 67.9 %, respectivamente, incurren explícitamente en errores de interpretación.

Para completar el análisis resulta de gran interés comentar alguno de dichos errores conceptuales:

a) Respecto a la equivalencia masa/energía, encontramos una serie de errores similares a los analizados por Lehrman (1982) y Warren (1976). Empezaremos mencionando el de la conversión (o transformación), tomada en sentido estricto, de materia en energía, aplicado, casi exclusivamente, a las reacciones nucleares. Esto induce a los alumnos a pensar que existe un tipo particular de energía, la nuclear, que sería "capaz" de dicha transformación. Así en textos de 3º y COU encontramos las siguientes frases, usuales en el "argot" de los físicos, que pueden inducir errores en los alumnos:

"Es la masa que se transforma en energía cada vez que se juntan 2 protones y 2 neutrones para formar un núcleo de Helio"

"...Si la masa varía en  $dm$ , hay una variación correspondiente de energía  $dE = c^2 dm$ . Es decir la masa se puede transformar en energía y viceversa"

"La masa se transforma en energía en un proceso nuclear según la ecuación de Einstein  $AE = Amc^2$ "

La idea de "transformación" conduce a suponer que no se cumple la ley de conservación de la masa o de la energía o de ambas. Veamos los siguientes ejemplos, extraídos de textos de 3º y COU:

"La existencia de este defecto de masa da lugar a que en prácticamente todas las reacciones nucleares no se cumpla la ley de conservación de la masa"

"En definitiva, no se cumple el principio de conservación de la masa, ni el de la energía, pero sí el de la masa-energía"

"La masa se puede transformar en energía y la energía en masa. En el universo, la suma de la masa y la energía se conserva constante, pero no cada sumando separadamente"

"En una reacción nuclear no se conserva la masa (...)  
Pero si se conserva el conjunto masa-energía"

Otra de las consecuencias es suponer que la materia desaparece y se crea energía o viceversa, que la energía se "materializa". Se da así un sentido literal a los procesos de "materialización" y de "desmaterialización", expresiones utilizadas con un sentido preciso en los procesos de Física de partículas, pero que conducen a error en los alumnos de estos niveles. En los textos aparecen frases como las que siguen:

"Según esta teoría la energía que se puede conseguir por la desmaterialización de un gramo de materia es inmensa"

"Cuando un electrón se encuentra con un positrón se

aniquilan y la masa se convierte en energía (...)  
Recíprocamente, un fotón, de energía suficiente,  
superior a 1.02 Mev puede materializar su energía en un  
par electrón-positrón, lo que constituye una  
materialización de la energía"

b) Respecto a la dualidad es muy común la consideración única  
del aspecto ondulatorio (Lalöe 1984, Wheaton 1984). Así, en  
textos de 3º y COU encontramos, a título de ejemplo:

"Se puede considerar al electrón como una onda"

"Consideremos al electrón no tanto como una partícula que  
gira en una órbita perfectamente definida, sino como una  
onda que envuelve al núcleo (...) Asimilando pues el  
electrón a una onda o grupo de ondas que se mueven con  
una cierta velocidad"

c) En lo que concierne al principio de indeterminación, cabe  
señalar que casi las tres cuartas partes del porcentaje de  
textos que incurren en el error son debidas a lo que denominamos  
error por omisión, al no mostrar como el principio introducido  
entra en conflicto con las ideas previas o al no tratarlo.

Entre los errores conceptuales encontrados en los textos  
señalamos el de atribuir la indeterminación a falta de precisión  
en los instrumentos o el de considerar que el principio de  
indeterminación impide medir con precisión, ya detectados en la  
literatura (Bartell 1985, Chevalley 1984):

También, apoyándose en el principio de indeterminación, se

derivan consecuencias falsas, como el modelo de "la nube de carga", que mantiene la idea del electrón como partícula clásica, utilizando el simil de la cámara fotográfica

"Cada fotografía nos daría la posición del electrón en un instante determinado. Al superponerse estas fotografías hipotéticas se observaría una distribución en forma de nube"

"Con una fotografía tridimensional se podrá dar al electrón coordenadas x,y,z y representarlo en cada instante con un punto en el diagrama tridimensional"

d) Y para terminar, en lo que respecta a los errores en el concepto de partícula elemental, también aproximadamente la mitad del porcentaje de error es debido al error por omisión, consistente en la mayoría de los casos, en no interpretar la cuestión, lo que favorece el mantenimiento de los preconceptos de los alumnos (las partículas como "bolas de billar" microscópicas).

Entre los errores explícitos destaca, especialmente, la aparición de frases que inducen esa imagen mecanicista de componente "último" sin estructura interna (Ridnik 1978). Veamos algunos ejemplos:

"Las partículas que forman los átomos se conocen como partículas elementales en el sentido que son las unidades básicas a partir de las cuales se forma toda la materia"

"El término elemental se aplicó a partículas subatómicas con el significado de simple o sencillo"

#### 4.3. PRESENTACION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL CUESTIONARIO DE PROFESORES

En el apartado anterior sobre analisis de textos hemos podido constatar que la enseñanza impartida no se plantea la necesidad de dar una visión estructurada de la Física moderna, lo que hemos tratado de confirmar de otro modo pasando un nuevo cuestionario a 65 profesores en formación (licenciados que siguen los cursos de Aptitud Pedagógica).

En lo que concierne al 1<sup>er</sup> item esperamos encontrar, de acuerdo con nuestra hipótesis que los profesores no se planteen un hilo conductor, es decir, unos contenidos, elegidos en base a unos criterios, tales como mostrar la crisis y los límites de validez de la Física clásica y la diferente visión del comportamiento de la materia que supone la Física moderna, etc.

En efecto, el 87.7 % (4.1) no menciona ni criterios ni tipos de tratamiento, limitándose a indicar diversos aspectos (espectroscopía, Física nuclear...). De ellos, un 10.8 % incluyen, erróneamente, aspectos clásicos (por ejemplo, cinética, equilibrios, termodinámica, etc), lo que demuestra que no distinguen en absoluto entre Física clásica y moderna.

El 9.2 % (3.6) se refiere a la necesidad de realizar una introducción cualitativa que permita "entender mejor otros conceptos de Física y Química moderna que se basan en Mecánica cuántica y Relatividad (como, por ejemplo, estructura atómica, física nuclear)".

Sólo el 3.1 % (2.1) propone además del tratamiento

cualitativo, la introducción "de los diversos conceptos de la Física cuántica y relativista" con un planteamiento de ruptura "procurando transformar la mentalidad de la Física clásica".

En cuanto al 2º ítem, es decir, el correspondiente a los programas oficiales, hemos encontrado, tal y como esperábamos, una aceptación acrítica del temario oficial y, por tanto, del tratamiento desestructurado de los libros de texto que siguen dicho temario. Encontramos 3 tipos de contestaciones:

Un grupo mayoritario, el 78.5% (5.1), manifiesta dicha aceptación de distintas formas. Afirman que el programa oficial les parece "correcto, válido, acertado, completo, idóneo, adecuado, etc".

Un segundo grupo, el 15.4 %, sostiene que "la Física moderna es conceptualmente muy complicada" y que "pertenece a niveles muy superiores y sólo se debe introducir casi anecdóticamente".

Solo el 6.1 % realiza planteamientos críticos afirmando que "fundamentalmente insistiría sobre aquellos temas que rompen la estructura de la mentalidad clásica en Física" o que "el problema no es el temario concreto sino el objetivo a cubrir que para mí sería: ver la incapacidad de las teorías clásicas de explicar algunos fenómenos y hacer una breve introducción a través de la discusión en torno a la estructura atómica, de por donde van los tiros en Física moderna", o bien, que es necesario mostrar las "analogías y diferencias" o "entender las diferencias" entre Física clásica y moderna.

#### 4.4 PRESENTACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL CUESTIONARIO DE ALUMNOS

En los apartados anteriores hemos podido constatar como la enseñanza impartida no se plantea de ordinario la necesidad de dar una visión estructurada de la Física moderna, lo que favorece que los alumnos, como ya dijimos, no la distinguan de la Física clásica.

Para confirmar esta hipótesis se aplicó el cuestionario a un total de 536 alumnos de 6 Institutos de Bachillerato, pertenecientes 3 de ellos a la provincia de Valencia, 2 a la de Castellón y uno a la de Alicante. Los alumnos encuestados se distribuyen de la siguiente forma:

- 189 correspondientes a 5 grupos de 2º de BUP
- 202 correspondientes a 6 grupos de 3º de BUP
- 145 correspondientes a 6 grupos de COU

Dado que el tratamiento de la Física moderna en 2º de BUP es muy superficial, a los alumnos de este nivel sólo se les ha aplicado la 1ª y 2ª parte del cuestionario, referida a crisis en el desarrollo de la Física, a los hechos que provocaron la crisis de la Física clásica y a las diferencias existentes entre ésta y la moderna.

A continuación damos las tablas de los resultados para los 3 niveles indicando el porcentaje  $p$  y la desviación estandar  $s$ .

Tabla 4.4a.- Resultados del cuestionario para alumnos  
 (1ª y 2ª partes )  
 (N=536 alumnos: 189 de 2º de BUP, 202 de 3º a 145 de COU)

Porcentaje de alumnos que:

- No conocen la crisis de la Física clásica (Item 1.1)
- No citan ninguno de los fenomenos que provocaron la crisis de la Física clásica (Item 2.1)
- No citan ninguna diferencia entre la Física clásica y la Física Moderna (Item 2.2)

Grupo encuestado	N	Item 1.1 % S	Item 2.1 % S	Item 2.2 % S
2º BUP	189	93.6 (1.8)	91.5 (2.0)	94.1 (1.7)
3º BUP	202	85.1 (2.5)	84.6 (2.5)	88.5 (2.2)
COU	145	86.9 (2.8)	79.9 (3.2)	84.8 (3.0)

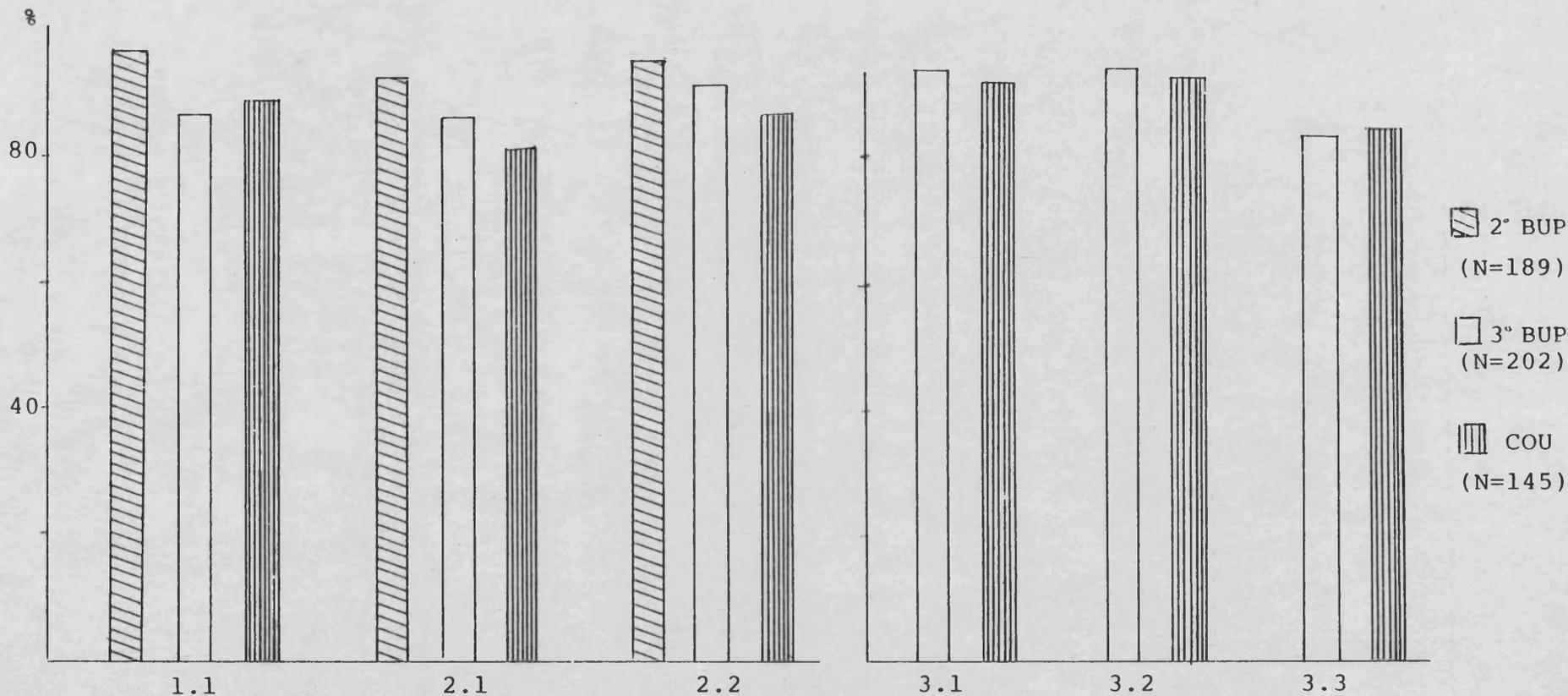
Tabla 4.4b.- Resultados del cuestionario para alumnos (3ª parte)  
 (N = 347 alumnos: 202 de 3º de BUP y 145 de COU)

Porcentaje de alumnos que:

- Desconocen la variación de la masa con la velocidad y el caracter limite de la velocidad de la luz (Item 3.1)
- Desconocen el comportamiento dual de los electrones (Item 3.2)
- No citan ninguna razones en contra de las orbitas de Bohr-Sommerfeld (Item 3.3)

Grupo encuestado	N	Item 3.1 % S	Item 3.2 % S	Item 3.3 % S
3º BUP	202	93.1 (1.8)	93.1 (1.8)	82.7 (2.7)
COU	145	89.7 (2.5)	92.4 (2.2)	84.1 (3.0)

PORCENTAJE DE ALUMNOS QUE: No conocen la crisis de la Física clásica (Item 1.1). No citan ninguno de los fenomenos que provocaron la crisis de la Física clásica (Item 2.1). No citan ninguna diferencia ente la Física clásica y moderna (Item 2.2).Desconocen el caracter límite de la velocidad de la luz (Item 3.1). Desconocen el comportamiento dual de los electrones (Item 3.2) No estan citan ninguna razón en contra de las orbitas de Bohr-Somerfeld (Item 3.3).



Grafica 4.4.a.- Resultados del cuestionario para alumnos (1ª y 2ª partes)

Grafica 4.4.b.- Resultados del cuestionario para alumnos (3ª parte)

#### 4.5. ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL CUESTIONARIO DE ALUMNOS

Debido al carácter abierto de algunos de los items del cuestionario (ver cuadros 3.2.4.a y 3.2.4.b), tiene interés realizar también un análisis de las contestaciones de los alumnos.

a) Así, respecto al ítem 1.1, referente a las crisis en el desarrollo Ciencia, se puede observar que el porcentaje de alumnos que cita la crisis de la Física clásica es, muy reducido: el 6.4 % (1.8) en 2º de BUP, el 14.9 % (2.5) en 3º y el 13.1 % (2.8) en COU, en total acuerdo con nuestra hipótesis.

Por otra parte, incluso para este reducido porcentaje de alumnos, la visión del nuevo cuerpo de conocimientos que sustituye a la Física clásica es muy pobre. Muchos sólo se refieren a la Física relativista, que no se imparte en el currículo; suponemos que ello es debido a que esta teoría es la más popular, por ser la más mencionada por los medios de comunicación (Resnick 1980). Algunos simplemente indican que "se pasó de la Física clásica empleada durante siglos a la nueva Física". Muy pocos tienen una imagen más completa citando no sólo la Física relativista, sino también la Física cuántica.

En cuanto a los porcentajes de alumnos que se refieren a la crisis de la Física pregalileana son también reducidos (en 2º de BUP el 1.6 %, en 3º el 27.2 % y en COU el 24.1 %), lo que está de acuerdo con la presentación lineal que se hace de toda la Física. Pensemos que además las respuestas positivas

corresponden casi todas a una breve referencia a que las ideas aristotélicas sobre la caída de graves fueron desplazadas por las de Galileo.

Para finalizar, queremos señalar los elevados porcentajes de alumnos que no indican ninguna crisis -el 92.0 % (2.0) en 2º, el 67.8 % (3.2) en 3º y el 74.5 % (3.6) en COU- lo que confirma nuestra hipótesis de que su visión del desarrollo científico es meramente acumulativa.

b) Respecto al ítem 2.1, hemos de señalar que la gran mayoría de los alumnos no han sido capaces de indicar ni uno sólo de los fenómenos que provocaron la crisis de la Física clásica: el 91.5 % (2.0) de 2º de BUP, el 84.6 % (2.5) de 3º y el 79.9 % (3.3) de COU. Los restantes alumnos, en su mayor parte, sólo citan uno de dichos fenómenos -el 8.5 % (2.0) en 2º, el 12.4 % (2.3) en 3º y el 16.6 % (3.1) en COU-, mientras que dos fenómenos son mencionados sólo por el 1.0 % (0.7) de 3º y el 3.5 % (1.5) de COU. Finalmente, sólo el 2.0 % (1.0) de 3º son capaces de citar 3 fenómenos.

Además, las respuestas correctas cubren solamente un ámbito muy reducido; sólo hemos encontrado 3 tipos distintos de contestaciones: espectros discontinuos en gases, espectros continuos en sólidos y líquidos incandescentes y efecto fotoeléctrico. En algunos casos sólo se hablaba de espectros, sin precisar nada más, respuesta que hemos aceptado como correcta atribuyéndola a espectros discontinuos, por ser estos los explicados más habitualmente.

Los errores que han aparecido más frecuentemente han sido:

-El hablar de teorías y modelos, cuando se les está interrogando sobre fenómenos, lo que evidencia la escasa familiarización con la metodología científica que poseen los alumnos. Se refieren así a la teoría de la relatividad, a los modelos atómicos y la estructura electrónica del átomo, a la física nuclear (incluyendo fisión, fusión, bombas, energía nuclear, etc), física cuántica (mencionada como tal por un reducido número de alumnos).

-El atribuir los descubrimientos de la radioactividad y de la divisibilidad atómica a la Física moderna. Este error está basado en considerar como Física moderna -con un planteamiento puramente temporal que ignora su diferencia radical con la Física clásica- todas las realizaciones del siglo XX, cuando en realidad estos fenómenos no exigieron para su explicación de hipótesis relativistas o cuánticas.

c) Cabe destacar que el 91.5 % (2.0) de los alumnos de 2º, el 88.5 % (2.2) de 3º y el 84.8 % (3.0) de COU, han sido incapaces, de acuerdo con nuestra hipótesis, de señalar ninguna diferencia entre la Física clásica y la moderna (item 2.2).

Como en el ítem anterior, la mayor parte de los alumnos que señalan correctamente alguna diferencia sólo mencionan una de ellas -el 4.8 % (1.6) en 2º, el 10.0 % (2.1) en 3º y el 13.1 % (2.8) en COU-, muy pocos citan dos diferencias -el 1.1 % (0.8) en 2º, el 1.5 % (0.9) en 3º y el 1.4 % (1.0) en COU- y sólo el 0.7 % (0.7) de COU llegan a citar tres.

Las contestaciones que hemos considerado correctas y que han aparecido con mayor frecuencia son:

-la cuantización de la energía, enunciada de muy diversas formas: "los electrones tienen una energía fija y cuantizada", "la energía sólo se puede intercambiar en cantidades permitidas", "los electrones tienen diversos niveles de energía cuantizados", etc.

-La dualidad onda/corpúsculo en la que se han considerado correctos, por la benignidad de los criterios evaluadores, no sólo aquellos enunciados que extienden el comportamiento dual a toda la materia (electrones, fotones, etc), como, por ejemplo, "todo cuerpo tiene un comportamiento ondulatorio y corpuscular", sino también aquellos que sólo mencionan el comportamiento ondulatorio de las partículas -o hablan de ondas asociadas, porque así se enuncia habitualmente en los textos- suponiendo implícito el corpuscular. Entre ellos mencionamos, por ejemplo, "todo cuerpo se comporta como una onda", "todo cuerpo lleva asociado una onda", "los cuerpos en movimiento tienen una onda asociada".

Otras contestaciones aceptadas como correctas y menos frecuentes son:

-La variación de la masa con la velocidad.

-La equivalencia masa/energía, no enunciada como tal, pero sin incurrir explícitamente en el error de las supuestas transformaciones. Por ejemplo; "la masa se relaciona con la energía según  $E = mc^2$ ".

-La indeterminación, que aparece usualmente citada de la

siguiente forma: "no podemos determinar la posición y la velocidad en un mismo instante".

-Finalmente, un alumno de 3<sup>o</sup> menciona que "la velocidad de la luz es la máxima posible en el universo" y otro de COU que "los campos a través de los que se realizan las interacciones están formados por partículas que transmiten las fuerzas".

Los errores conceptuales más usuales reproducen los que ya hemos encontrado al analizar los textos. En particular:

-La transformación de la masa en energía: "la materia se transforma en energía".

-Limitar la dualidad onda/corpusculo de toda la materia sólo a la luz: "la luz tiene un comportamiento ondulatorio y corpuscular", "dualidad onda/corpusculo de la luz", etc.

-"Asociar" la onda al movimiento: el movimiento lleva asociada una onda", "todo cuerpo lleva asociada a su movimiento una onda", etc.

-Afirmar que "el electrón no se puede localizar con precisión", cuando en realidad "cada magnitud característica de los fenómenos atómicos puede ser medida y definida con tanta precisión como queramos" (Chevalley 1984).

d) Es muy elevado el número de alumnos que, de acuerdo con nuestra hipótesis, desconocen la variación de la masa con la velocidad y el carácter límite de la velocidad de la luz: el 93.1 % (2.8) en 3<sup>o</sup> y el 89.7 % (2.5) en COU (item 3.1).

Los alumnos que eligen correctamente la gráfica correspondiente a la Física clásica son muy escasos -el 25.2 %

en 3º y el 26.9 % en COU-, pese a que la interpretación de gráficos es uno de los objetivos básicos del estudio de la Cinemática. Esto es debido al elevado porcentaje de ellos -el 46.0 % en 3º y el 37.2 % en COU- que incurren en el error de considerar la fuerza como causa del movimiento (Viennot 1979) afirmando por ello que si la fuerza es constante la velocidad también lo es.

Resulta así más elevado el número de alumnos -73.3 % (3.1) en 3º y 69.0 % (3.8) en COU- con ninguna de ambas contestaciones correctas, lo que evidencia que, en gran medida, los defectos encontrados en la introducción de la Física moderna son generalizables al tratamiento que se da a toda la Física.

e) Respecto al ítem 3.2, referido a la difracción de electrones, podemos observar el gran número de alumnos -93.1 % (1.8) en 3º y 92.4 % (2.2) en COU- que, confirmando nuestra hipótesis, desconocen el comportamiento de la materia según la Física cuántica. Más aún, de ellos el 73.3 % (3.1) en 3º y el 86.9 % (3.7) en COU no dan ninguna respuesta correcta: ni la Física clásica ni la moderna.

Las explicaciones erróneas encontradas han sido las siguientes:

-Confundir los resultados de un experimento de difracción con la estructura electrónica del átomo (en el que los electrones se encontrarían "distribuidos" en capas, niveles u órbitas). Esto muestra que un 28.7 % de los alumnos de 3º y un 30.3 % de COU, además de incurrir en el error conceptual de las capas, no están

familiarizados, en general, con la difracción, aunque el tema del movimiento ondulatorio aparezca tanto en 3º como en COU.

-Dentro del mismo error señalar que algunos alumnos escogen la solución b) -diagrama de difracción- para la Física clásica, atribuyéndole la estructura en órbitas y el diagrama a) -toda la placa impresionada de forma regular- para la Física moderna, por la "deslocalización" en orbitales.

-Atribuir la solución a) a la repulsión entre los electrones. Incurren en esto un 6.4 % en 3º de BUP y un 10.3 % en COU.

f) En cuanto al ítem 3.3 se puede señalar que pese a la amplitud de las respuestas aceptadas como correctas y tratarse de un tema impartido en los 3 niveles, el porcentaje de alumnos incapaces de dar razones contra las órbitas de Bohr-Sommerfeld es del 82.7 % (2.7) en 3º de BUP y del 84.1 % (3.0) en COU.

Las respuestas aceptadas como correctas, con gran amplitud de criterio y teniendo en cuenta los conocimientos del alumno en este nivel, se han agrupado en 2 epígrafes: razones experimentales y teóricas.

Entre las primeras encontramos:

-Señalar que el modelo de Bohr-Sommerfeld sólo es aplicable a átomos hidrogenoideos: "Este modelo sólo se aplica al átomo de hidrógeno", "el átomo de Bohr sólo explica el espectro del hidrógeno" y "ese modelo atómico no explica los espectros de los átomos con muchos electrones".

-Indicar que dicho modelo no puede dar cuenta de la totalidad de los desdoblamientos de las rayas de los espectros atómicos:

"Este modelo atómico no explica la división de las rayas".

-Afirmar que el modelo no explica la intensidad y anchura de las rayas espectrales: "No explica la luminosidad y grosor de las líneas".

-Y, finalmente, que no puede dar cuenta de las distintas geometrías de las moléculas: "No explica la geometría molecular".

Las razones teóricas aparecen en conexión con:

-El principio de indeterminación: "Dado que no se pueden determinar al mismo tiempo la posición y la velocidad, no existen órbitas bien definidas" o "como no podemos determinar simultáneamente la  $x$  y la  $v$ , esto implica que los electrones no siguen trayectorias bien definidas".

-La descripción del estado del electrón mediante la función de ondas: " $\Psi$  explica el comportamiento del electrón y la probabilidad de encontrar al electrón en una zona del espacio es  $\Psi^2$ " por tanto, no existen trayectorias bien definidas".

Sólo han sido capaces de mencionar razones teóricas -es decir, explícitamente asociadas a los conceptos de Física moderna- el 8.4 % (1.9) de los alumnos de 3º y el 7.3 % (2.2) de COU y experimentales el 8.9 % (2.0) de 3º y el 8.6 % (2.3) de COU. Ningún alumno ha sido capaz de indicar simultáneamente ambos tipos de razones.

En resumen, los apartados 4.1, 4.2 y 4.3 de este trabajo muestran que tanto los libros de texto como los profesores, plantean una introducción de la Física moderna que no toma como

punto de partida las dificultades insuperables que originaron la crisis de la Física clásica y sus límites de validez, ni intenta mostrar las diferencias entre la visión clásica y la moderna sobre el comportamiento de la materia.

En definitiva, la enseñanza de la Física clásica se caracteriza por una introducción desestructurada que simplemente yuxtapone (o incluso mezcla) las concepciones clásicas y modernas.

Los apartados 4.4 y 4.5 muestran las consecuencias de dicha introducción de la Física moderna:

- Dificulta que los alumnos alcancen una mínima comprensión, ni siquiera cualitativa, de las ideas y conceptos fundamentales del nuevo paradigma.

- Les produce errores conceptuales.

## Capítulo 5.

### FORMULACION Y FUNDAMENTACION DE LA SEGUNDA HIPOTESIS

5.1. Planteamiento de la segunda hipótesis

5.2. Fundamentación de la segunda hipótesis

5.2.1. La introducción de la Física moderna según el modelo de enseñanza/ aprendizaje de las ciencias como cambio conceptual y metodológico

5.2.2. Criterios para el diseño de un currículum de introducción a la Física moderna

5.2.2.1. Hilo conductor para la introducción de la Física relativista

5.2.2.2. Hilo conductor para la introducción de la Física cuántica

5.2.3. Un método: el programa-guía de actividades

-----  
Cap 5. PLANTEAMIENTO Y FUNDAMENTACION DE LA SEGUNDA HIPOTESIS  
-----

5.1. PLANTEAMIENTO DE LA SEGUNDA HIPOTESIS

Los resultados de la primera parte de este trabajo verifican que el tratamiento dado, en general, a la Física moderna por los libros de texto y el profesorado, se caracteriza por una introducción desestructurada que mezcla las concepciones clásicas y modernas, favorece los errores conceptuales y no logra que los alumnos alcancen una mínima comprensión de las ideas y conceptos fundamentales de la Física moderna.

Estos resultados podrían llevar a pensar en la conveniencia de retrasar la introducción de la Física moderna, eliminándola del curriculum de la Enseñanza Media. Sin embargo, en nuestra opinión -y ello constituye la 2ª hipótesis de este trabajo- creemos que es necesario y posible proporcionar una visión clara y elemental de la Física moderna que:

- Partiendo de la crisis de las concepciones clásicas de la Física, muestre la necesidad y características del nuevo paradigma.
- Favorezca una mejor comprensión tanto de la Física clásica como de la moderna.
- Y, por último, evite los graves errores conceptuales detectados en la primera parte del trabajo.

A continuación justificaremos y precisaremos esta hipótesis y, en los restantes capítulos, expondremos el diseño experimental para contrastarla y, finalmente, el análisis de los resultados obtenidos.

## 5.2. FUNDAMENTACION DE LA SEGUNDA HIPOTESIS

Nuestra segunda hipótesis esta fundamentada básicamente en la necesidad de proporcionar a los alumnos una imagen coherente de la ciencia, por lo que es necesario organizar, como ya se vió en la primera parte de este trabajo, el aprendizaje como cambio conceptual y metodológico.

De acuerdo con ello desarrollaremos esta fundamentación en los siguientes puntos:

1. Recapitularemos, en primer lugar, algunas características básicas del modelo de enseñanza de las ciencias como cambio conceptual y metodológico, que apoyan la necesidad de introducir la Física moderna.

2. Seguidamente, basandonos en dicho modelo y en el análisis de la bibliografía existente sobre el tema, elaboraremos unos criterios y un hilo conductor para la introducción de los conceptos básicos de Física relativista y cuántica y diseñaremos un método de trabajo en el aula, que favorezcan una adquisición significativa .

### 5.2.1. LA INTRODUCCION DE LA FISICA MODERNA SEGUN EL MODELO DE ENSEÑANZA /APRENDIZAJE DE LAS CIENCIAS COMO CAMBIO CONCEPTUAL Y METODOLOGICO.

En la primera parte de este trabajo ya mostramos como las concepciones del profesorado sobre la ciencia estaban caracterizadas, en general, por el empirismo y un visión

acumulativa del desarrollo de los conocimientos científicos. También vimos que sus formas habituales de enseñanza -por transmisión verbal o por descubrimiento inductivo tienen poco que ver con la forma en que realmente se desarrolla la ciencia y transmiten, por tanto, una imagen incorrecta de la misma.

Se vió, por el contrario, que una enseñanza que quiera dar una imagen más coherente de la ciencia y conseguir un aprendizaje significativo de la misma y una familiarización con el método de trabajo científico, debe tener en cuenta tanto las estructuras conceptuales previas de los alumnos como sus tendencias metodológicas habituales y, por tanto, ha de organizar el aprendizaje como un proceso de cambio conceptual y metodológico (Gil y Carrascosa 1985). En efecto, renunciar a la familiarización con la metodología científica -al cambio metodológico- supondría renunciar al aprendizaje significativo de conceptos -al cambio conceptual-, objetivo básico de la enseñanza de las ciencias.

Así pues, para dar una imagen más coherente de la ciencia y para organizar el proceso de enseñanza /aprendizaje como cambio conceptual y metodológico, es necesario que el curriculum de Física tenga en cuenta que la evolución histórica de las ciencias no es un proceso meramente acumulativo, dado que los conocimientos se articulan en teorías hasta que dificultades insuperables provocan una revolución teórica y el surgimiento de un nuevo paradigma.

Ya vimos que la introducción y manejo de la Mecánica es una ocasión privilegiada y necesaria para hacer vivir a los alumnos lo que representa un cambio de paradigma y sus dificultades, tanto

conceptuales como metodológicas, sin el cual quedarían anclados en la Física del sentido común. Por idénticas razones, la introducción cualitativa de los conceptos básicos de Física moderna es completamente necesaria para mostrar los límites de la visión clásica del comportamiento de la materia.

Ahora bien, no basta que los alumnos conozcan que ha habido revoluciones científicas, como propone Hodson (1985). Se trata de que experimenten ellos mismos un cambio semejante.

Para ello es necesario que los alumnos sean conscientes de las hipótesis fundamentales, explícitas o implícitas, de la Física clásica. Seguidamente que intenten explicar basándose en dichas hipótesis -y a través de su propio trabajo- una serie de problemas. Con ello perciben que los conceptos clásicos no son capaces de explicar dichos fenómenos, lo que les plantea la necesidad de sustituirlos por otros nuevos en clara ruptura con los anteriores.

Recapitulando, este planteamiento de la enseñanza /aprendizaje como cambio conceptual y metodológico permite, pues, proporcionar una imagen más correcta de lo que es el trabajo científico, una imagen mucho menos lineal y más creativa de la ciencia -incluyendo tanto la ciencia normal como los cambios de paradigma-.

Además de estas razones de tipo didáctico hemos de señalar que existe una amplia coincidencia entre autores, de diversos países (Cortini 1982, Haber-Schaim 1981, Kuhn 1981, Lijnse 1981, Loria et al 1981, Ogborn 1981, Rogers 1981, Strnad 1981), en la necesidad de tratar dichos temas en la enseñanza secundaria, aunque hay

discrepancias en cuanto al nivel: algunos, por ejemplo Kuhn (1981), sostienen que sólo deben ser introducidos en el nivel más elevado de la escuela secundaria y otros, por ejemplo Loria et al (1981), subrayan la necesidad de hacerlo previamente (13-14 años).

La opción que aquí presentamos sólo plantea el tratamiento de estos temas en dos niveles de la enseñanza media:

-Un nivel elemental, para 15-16 años (el actual 2º de BUP).

-Un nivel superior, para 16-18 años (tanto 3º de BUP como COU).

Además, dicho tratamiento será parcialmente cíclico, para conseguir así la necesaria profundización y afianzamiento atendiendo a los criterios que se elaboraron por el Seminario de Física y Química del ICE de la Universidad de Valencia (1983 y 1984).

En resumen, proponemos que la Física moderna se integre en un curriculum de Física organizado para provocar cambios conceptuales y metodológicos, ajustados en cierta medida a los grandes cambios de paradigma. Esto nos lleva a configurar un hilo conductor de los contenidos que permita a los alumnos comprender, al menos cualitativamente, cual es la visión del comportamiento de la materia contra la que se edifica la Física clásica y los límites de ésta que condujeron a la Relatividad y a la Mecánica cuántica.

Con esta orientación diseñaremos unos criterios y un hilo conductor para la introducción a la Física moderna y su correspondiente método de trabajo en el aula

## 5.2.2. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UN CURRÍCULUM DE INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA MODERNA

Este apartado pretende elaborar unos criterios y un hilo conductor para introducir los conceptos de Física relativista y cuántica que, de acuerdo con nuestra segunda hipótesis, favorezcan una mejor comprensión y eviten errores conceptuales en los alumnos, basándonos para ello en el modelo de enseñanza/aprendizaje como cambio conceptual y metodológico y en el análisis de la bibliografía consultada sobre el tema (artículos de revistas didácticas y de divulgación, proyectos como el PSSC, Nuffield, Harvard, etc, textos universitarios, actas de congresos, etc.).

En lo que concierne a la forma de introducir la materia en la literatura se exponen varios posibles caminos (Teixeira-Dias 1983, Gerthsen et al 1979): el axiomático, el histórico y el empírico, consistente este último en introducir mediante una serie de experimentos como se comporta la radiación, los electrones, los átomos, etc. En el nivel secundario, si bien existe un amplio consenso contra la utilización del método axiomático, no hay acuerdo respecto a los otros dos.

En efecto, el método empírico es utilizado en proyectos como el Nuffield (1974-75), el PSSC (1980) y recomendado explícitamente por French (1981), que realiza una simplificación del conocido tratamiento de Feynman (1971 b) basado en la interferencia en dos rendijas e, implícitamente, por Haber-Schaim (1931) y Ogborn

(1981), colaboradores en los proyectos mencionados.

En cuanto al método histórico es utilizado en el Harvard Project Physics (1970), siguiendo las líneas trazadas por Holton en su reeditado "Introducción a los conceptos y teorías de las Ciencias Físicas" (1976).

Por nuestra parte concedemos gran importancia al desarrollo histórico de las Ciencias, no tanto por el deseo de dar a conocer la cronología de los problemas abordados, sino por:

a) Extraer de dicha historia los problemas significativos y poner al alumno en situación de abordarlos, para evitar incurrir en el erróneo planteamiento empirista que introduce los experimentos sin tener en cuenta el problema histórico que los motivó, las sucesivas hipótesis que se plantearon en su interpretación, etc, con lo que se imposibilita la consecución de un objetivo fundamental: la familiarización con la metodología científica.

b) Proporcionar una visión estructurada que tenga en cuenta los cambios de paradigma en el desarrollo de las ciencias, para provocar cambios conceptuales en el alumno. Por el contrario, el enfoque empírico mezcla la Física clásica con la moderna; así, por ejemplo, el Nuffield en la Unidad 2 (1974) mezcla electricidad con niveles energéticos y en la Unidad 4 (1975a) el efecto fotoeléctrico con la radioactividad y el modelo de Rutherford; en el PSSC (1980), las ideas relativistas están insertas con las clásicas.

c) Tener en cuenta las ideas previas de los alumnos y salir así al paso de posibles errores conceptuales que, como ya hemos visto,

en algunos casos, coinciden con los que se produjeron en la génesis de los conceptos.

En cuanto a los contenidos queremos señalar que la introducción a la Física moderna, de acuerdo con el planteamiento de nuestra hipótesis de proporcionar una visión estructurada, se debe iniciar en ambos niveles atendiendo a los puntos siguientes:

a) Realizando una síntesis de la Física clásica y mostrando la imagen del comportamiento de la materia que esta proporciona. Recordemos que esto sólo se realiza en un 4.8 % de los textos de enseñanza media analizados en este trabajo (ver apartado 4.1), tampoco aparece en el restante material bibliográfico utilizado, salvo en 2 textos universitarios como el Messiah (1973) y el Eisberg (1974).

b) Viendo que la Física clásica había surgido contra un paradigma, la Física pregalileana, que se había mostrado incapaz de resolver importantes problemas del comportamiento de la materia. Esto permite romper con una imagen lineal del crecimiento de la ciencia, lo que contribuirá a prepararles para la nueva ruptura.

c) Mostrando cómo, análogamente, una serie de dificultades insuperables originaron la crisis de la Física clásica, sin lo cual es imposible que los alumnos comprendan los límites de validez de ésta y las diferencias entre la visión clásica y moderna sobre el comportamiento de la materia.

Con este objeto proponemos que la Física moderna se inserte en un programa de Física y Química estructurado para provocar cambios

conceptuales y metodológicos ajustados en cierta forma a los grandes cambios de paradigma, en el cual se mencione el fenómeno fotoeléctrico (al finalizar el Electromagnetismo), el problema de los espectros o la inestabilidad del átomo de Rutherford (al terminar la Teoría atómico-molecular de la materia, que culmina la Física clásica) y el fracaso en la detección de un sistema de referencia en reposo absoluto. Respecto a que estos problemas están entre los que desencadenaron la crisis de la Física clásica existe amplio consenso en la literatura (Hawes 1981, Deligeorges 1984, PSSC 1980).

Pero los alumnos han de ser conscientes de que en la historia de la ciencia la crisis y abandono de una teoría no es consecuencia de unos pocos resultados negativos y de que si el papel de los fenómenos es crucial, las teorías sólo se abandonan si existe muy clara evidencia en contra de las mismas y/o una concepción alternativa (Hodson 1985). Un buen ejemplo de ello es la larga duración de la resistencia al concepto de fotón (Pais 1984).

Estas pequeñas nubes oscuras en la Física clásica se hincharon y estallaron en la Relatividad y la Mecánica cuántica (Deligeorges 1981). Veremos a continuación el hilo conductor que se seguirá para introducir las.

#### 5.2.2.1. Hilo conductor para la introducción de la Física relativista

En el siguiente capítulo se desarrollan con detalle los

contenidos concretos que se introducen, lo que hacen los alumnos, las dificultades que surgen, etc. En este apartado y en el siguiente nos limitamos a referir, respectivamente, el hilo conductor para la introducción de la Relatividad y de la Cuántica.

Proponemos introducir la Relatividad tan sólo en el nivel superior con un tratamiento cuantitativo elemental. En nuestro país no aparece en los cuestionarios oficiales vigentes para BUP y COU ningún tema ni ninguna recomendación que contemple la introducción de la Relatividad. Esto se traduce en que los libros de texto no introduzcan ningún tema al respecto pero todos ellos utilizan -sobre todo en la Física nuclear- alguno de los principales resultados de la teoría, sobre todo la ecuación de Einstein  $E = mc^2$ , mezclados con los de la Física clásica y sin ninguna justificación.

En los textos de Física estadounidenses de este nivel se da una situación similar a la criticada: sólo 4 de los 14 textos analizados por Brattin et al. (1982) tratan la Relatividad. Otros textos no incluidos en dicho análisis, por ejemplo, el PSSC (1980) y el Nuffield (1974-75), confirman lo dicho pues sólo mencionan algunos resultados cuando se necesitan.

Frente a esto, se considera que el camino correcto es introducir los aspectos básicos de la teoría de la relatividad -como sus postulados, la dilatación del tiempo, la variación de la masa con la velocidad y la equivalencia masa-energía (Cortini 1982)-, pero mostrando que esto supuso una crítica de las hipótesis implícitas de la Física clásica, el espacio y el tiempo absolutos y la invarianza de la masa, dado que dichas ideas están

profundamente arraigadas en la estructura conceptual del alumno (Hewson 1982).

Iniciar el tema con una descripción detallada del experimento de Michelson-Morley (Alonso-Finn 1970, Holton 1976) quizá guarde mayor fidelidad con la cronología de la génesis de la relatividad, pero es didácticamente más confuso, por la misma complejidad del experimento, por los escasos conocimientos de óptica del alumno y porque la cuestión del éter enmascara el problema fundamental: la visión del espacio y del tiempo. En efecto, como muestra el debate entre Whittaker, Holton y Grunbaum sobre el nacimiento de la teoría de la relatividad (Einstein et al 1975) no resulta provechoso ocuparnos del experimento de Michelson-Morley (dado que Einstein conocía el resultado pero no los detalles), ni de los trabajos preliminares de Lorentz y Poincaré (que Einstein no había leído) ni tan siquiera de como Einstein enfocó inicialmente el problema, teniendo en cuenta que "al aplicar la electrodinámica de Maxwell a cuerpos en movimiento, aquello conduce a ciertas asimetrías que no parecen ser inherentes a los fenómenos." (Einstein 1905, en Einstein et al 1975).

Por ello es conveniente iniciar el tratamiento de la Física relativista saliendo al paso de la idea que tienen los alumnos, incluso los universitarios, de que existen sistemas de referencia absolutos. Pero aceptar la existencia de objetos en reposo absoluto supone la posibilidad de distinguir experimentalmente si un sistema de referencia dado se encuentra en reposo o en movimiento; por el contrario, existen toda una serie de

experiencias habituales, que los alumnos deben descubrir, que ponen en evidencia la inexistencia de diferencias entre los fenómenos mecánicos en sistemas de referencia inerciales (principio de relatividad de Galileo).

Queda pendiente el problema de si otro tipo de experiencias (ópticas, por ejemplo) permitirían distinguir entre un sistema en reposo y otro que se desplace con movimiento uniforme. Esto puede ser planteado de una forma sencilla, mediante el estudio del tiempo que tarda la luz en recorrer una cierta distancia sobre la tierra. Si aceptamos que esta se mueve con velocidad  $v$  respecto al espacio, el tiempo dependerá de la dirección en que la luz recorra esa distancia, lo que contradice la experiencia y obliga a cuestionar las hipótesis subyacentes de las transformaciones de Galileo, es decir, la identidad de los intervalos espaciales y temporales (la existencia de un espacio y tiempo absolutos). Criticar estas ideas es esencial porque de lo contrario permanecen en la estructura conceptual, reconciliadas con las ideas clásicas, considerando la dilatación del tiempo o la contracción de la longitud como distorsiones en la percepción (Hewson 1982).

Seguidamente, se puede tratar la dilatación temporal sin introducir las transformaciones de Lorentz, con el sencillo ejemplo del reloj de luz (ver el apartado "1.3. Crítica de los supuestos básicos de la Física newtoniana. Los postulados de la relatividad especial" del programa- guía del nivel superior).

Esto permite introducir la variación de la masa con la velocidad y la equivalencia masa-energía, no como meras aproximaciones para altas velocidades, sino como una modificación

en las leyes fundamentales de la Mecánica clásica, debida a los profundos cambios en los conceptos cinemáticos (ver el apartado "1.4. Masa y energía en la Física relativista" en dicho programa-guía).

Algunos autores como Fabri (1981) en la línea de algunos textos universitarios, por ejemplo el Jackson (1980), sostienen que no es necesario introducir el concepto de masa relativista  $m$ , bastando con la masa en reposo  $m_0$  (ya que trabajan con la expresión  $p = \gamma m_0 v$ ), porque ello puede conducir a la "monstruosidad" de obtener las leyes relativistas sustituyendo en las clásicas la masa en reposo  $m_0$  por la masa relativista  $m$ .

Por el contrario consideramos, de acuerdo con el propio Einstein y numerosos textos (Kittel et al 1982, Feynman 1971 a, Alonso y Finn 1970, Resnick 1976, Tipler 1978 y 1980), necesario introducir la masa en movimiento  $m$  para comprender, por ejemplo, el comportamiento material de la luz (capacidad de transmitir cantidad de movimiento -efecto Compton, etc- o de interactuar gravitatoriamente) e interpretar correctamente la relación  $E = mc^2$  (Cortini 1982).

Además, es necesario evitar que la idea de equivalencia se entienda como transformación de masa en energía (Warren 1976, Lehrman 1982), error conceptual ya puesto en evidencia en este trabajo (ver apartado 3.2.2).

Por último queremos subrayar la importancia de mostrar que los resultados de la teoría han sido confirmados experimentalmente con partículas aceleradas (aumento de la vida media, de la masa, etc)

y con la posibilidad de poder liberar grandes cantidades de energía en los procesos nucleares.

#### 5.2.2.2. Hilo conductor para la introducción de la Física cuántica.

Proponemos que se introduzca tanto en el nivel elemental como en el superior, aunque en el primer caso el tratamiento sea más sencillo, meramente cualitativo y limitado a una serie de aspectos elementales. En nuestro país la situación es, al menos a nivel de cuestionarios oficiales, sensiblemente mejor que en Relatividad porque se introducen algunos tópicos tanto en 3º de BUF como en COU.

En cuanto a la literatura didáctica, existe un amplio consenso en algunos de los puntos que se considera necesario enseñar (Strnad 1981, Loria et al 1981, Kuhn 1981, Lijnse 1981, Haber-Schaim 1981, Ogborn 1981), como, por ejemplo, los efectos fotoeléctrico y Compton, la existencia de estados estacionarios en los átomos, la dualidad onda corpúsculo, las relaciones de indeterminación, ideas de mecánica ondulatoria, etc, aunque también se introducen otros muchos tópicos, cuyo tratamiento no abordaremos basandonos en un rechazo del carácter enciclopédico de los currícula habituales, completamente inabordables, que obligan a centrarse en contenidos tratados superficialmente, con olvido de los trabajos prácticos o de cualquier otro aspecto (Piaget 1977). Por el contrario, anteponeamos la profundización a la extensión, optando por un currículum organizado en torno a un núcleo o "core" obligatorio (Seminario de Física y Química 1984, Tebutt 1981) y a

la libre elección, debidamente fundamentada del resto.

Se puede iniciar el estudio de los fenómenos cuánticos con el efecto fotoeléctrico y no con la teoría de Planck, como correspondería cronológicamente, por la gran dificultad didáctica de ésta para los niveles medios (Mott 1981) y porque Planck no concibe  $h\nu$  como cuanto de radiación electromagnética (Hawes 1981). El procedimiento sería mostrar como el efecto fotoeléctrico no puede ser explicado por la teoría electromagnética, por lo que se requieren unas nuevas hipótesis sobre la naturaleza de la radiación 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 al fotón a su aspecto corpuscular, volviendo a las concepciones de Newton. También es necesario recalcar la idea de cuantización de la energía, que se plantea por primera vez.

A continuación se considera importante resaltar la potencia del concepto de fotón aplicándolo a nuevos fenómenos como el efecto Compton y los espectros discretos, ya que como señala Hodson (1985), es necesario evitar la visión simplista de que las teorías se abandonan a consecuencia de unos pocos resultados negativos. El efecto Compton proponemos que sólo se aborde en el nivel superior y de forma cualitativa.

En cuanto a los espectros discontinuos, es necesario mostrar como la Física clásica era incapaz de explicarlos, tanto como la propia estabilidad del átomo, lo que condujo a Bohr a aplicar la idea de cuantización al modelo de Rutherford. Muchos autores y textos se manifiestan contra el uso del modelo de Bohr (Mott 1981,

Feynman 1971b, Nuffield 1975, PSSC 1980, Wichman 1972) para evitar una descripción del átomo que incluya órbitas. Aquí se sigue la opción contraria por las siguientes razones:

a) Los alumnos, como fruto de su paso por la EGB, poseen una representación atómica mediante órbitas (Marx 1981), que proponemos explicitar para derribarla seguidamente, mostrando los límites tanto experimentales como teóricos de dicho modelo.

b) El interés didáctico de la utilización de modelos (Rogers 1981, Khun 1981) que proporcionan explicaciones no del todo acordes con la experiencia, pero sí más sencillas e intuitivas. Esto permite, una vez se ha realizado la crítica del modelo de Bohr, señalar que sus ideas permiten explicar algunos espectros atómicos sustituyendo simplemente "órbitas" por "estados discretos de energía" u "orbitales".

c) Para evitar la imagen de que son únicamente las incapacidades del electromagnetismo las que justifican la introducción de ideas cuánticas, dado que la crítica del concepto de trayectoria (órbita) contribuye a mostrar también las limitaciones de la mecánica clásica (Paoloni 1982).

d) Para llegar, de forma sencilla (Latimer 1983) a los conceptos de cuantización de la energía y del momento angular y a la aparición del nº cuántico principal.

Para justificar la existencia de los restantes nºs cuánticos algunos textos usan el modelo de Sommerfeld, lo que desaconsejamos, porque dichos números no son correctos (no explican, por ejemplo,  $l=0$ ) (Messiah 1974, Galindo y Pascual 1980).

Con el tratamiento de estos puntos pueden darse por finalizados los orígenes de la Física cuántica. A partir de la dualidad de De Broglie se inicia lo que conocemos como Mecánica cuántica, que se introducirá en ambos niveles, aunque en el elemental sólo cualitativamente. Conviene subrayar que la dualidad se extiende a toda la materia (no sólo a los fotones) y evitar que los alumnos piensen que los electrones, fotones, etc, son ondas y/o partículas, según la experiencia, como la gran mayoría de textos que se han considerado correctos en nuestro análisis por la benignidad de los criterios utilizados. Es necesario que los alumnos comprendan algo más: que los electrones, fotones, etc, no son ni ondas ni partículas, sino un nuevo modelo de comportamiento de la materia, que en circunstancias extremas, se asemeja a una partícula y en otras a una onda (Feynman 1971b, Bunge 1978, 1984).

Seguidamente, y en conexión con el carácter ondulatorio de los electrones, se introducirán las relaciones de indeterminación (Ebison 1981), mostrando sus implicaciones positivas y saliendo al paso de posibles errores conceptuales (Chevalley 1984, Bartell 1985), entre los que cabe destacar el de atribuir la indeterminación a falta de precisión de los instrumentos o el de considerar que el principio de indeterminación prohíbe medir con precisión, ya que toda medida ha de alterar la magnitud que se mide y, en consecuencia, la posición y la cantidad de movimiento no son buenos observables.

Llegados a este punto, es positivo que los alumnos realicen cálculos de orden de magnitud con las relaciones de De Broglie y

de Heisenberg, para familiarizarse con los límites de validez de la Física clásica (Weisskopf 1981, Wichman 1972).

En consecuencia, el hecho de que los electrones, fotones, etc, no sean ni ondas ni partículas y la crítica realizada al concepto de trayectoria, hace necesario un modelo más general para describir su estado y evolución, distinto de los utilizados para las partículas y ondas clásicas. Esto permitirá hablar de la función de ondas y la ecuación de Schrodinger, indicando que ésta sólo tiene soluciones distintas de cero para determinados valores de la energía, lo que justifica la discontinuidad de los niveles energéticos de los átomos. Este procedimiento de justificar niveles es preferible al utilizado por algunos textos (Resnick 1976, PSSC 1980, Halliday-Resnick 1982, Tipler 1978) consistente en considerar que sólo existen las órbitas en que pueden persistir ondas que cumplen  $2\pi r = n\lambda$ , dado que esto sugiere que la onda estacionaria es armónica plana (García-Castañeda 1985).

Por otra parte, el concepto de función de onda permite criticar algunas ideas erróneas sobre la noción de orbitales, como considerarlos "nubes electrónicas" o zonas del espacio, independientes de los electrones y que, consecuentemente, pueden o no estar ocupadas por estos, etc.

A continuación es conveniente completar la imagen del comportamiento de la materia que la nueva Física proporciona, con algunas ideas básicas sobre el complejo mundo de las partículas elementales (Weisskopf 1981), tales como los procesos de creación y aniquilación -idea de antimateria- o el concepto de interacción

como intercambio de partículas, para que el alumno del nivel superior comprenda la necesidad de utilizar conjuntamente la Relatividad y la Cuántica para interpretar ciertos fenómenos y para mostrarle más argumentos contra la interpretación mecanicista de las partículas elementales como componentes "últimos" sin estructura interna (Ridnik 1978).

Para finalizar es muy adecuado realizar un resumen de las diferencias más notables entre Física clásica y moderna, así como de los límites de validez de la Física clásica para favorecer la comprensión de dichos fenómenos y mostrar las grandes posibilidades de nuevos desarrollos científicos y tecnológicos que abrió la nueva Física, para evitar que esta parezca una rama esotérica y marginal de las Ciencias Físicas, sólo aplicable en el mundo microscópico cuando en realidad subtiende el conjunto de nuestra comprensión de la materia de la más pequeña a la mayor escala: astrofísica y cosmología (Acker 1985, Alonso y Finn 1971, Balibar 1984, Ducasse et al 1985, Leite-Lopes 1985, Levy-Leblond 1984, Schaeffer 1985 y Tipler 1980).

### 5.2.3. METODO DE TRABAJO: EL PROGRAMA GUIA DE ACTIVIDADES

El concepto de método es uno de los más utilizados en el ámbito de la didáctica y, por ello, uno de los más polivalentes en su significado. Como señala Gimeno (1985) hay autores que lo equiparan con las relaciones profesor-alumno distinguiendo diversos tipos de métodos o estilos de enseñanza según sean los

patrones de comunicación que se utilicen.

Aquí se utiliza con el significado que en el ámbito anglosajón se atribuye al diseño de la instrucción (Novack 1982). En efecto, una vez elaborado lo que se quiere hacer (objetivos y contenidos) se trata de desarrollar el cómo se quiere hacer, es decir, cómo estructurar un proceso comunicativo particular, unos medios técnicos, una forma de trabajo en el aula... para conseguir dichos objetivos.

Como ya hemos visto, el rechazo de la enseñanza por transmisión verbal y por descubrimiento inductivo y autónomo, conduce a subrayar el papel de las actividades en el aprendizaje del individuo (Piaget 1977), lo que transforma el papel del profesor en el de organizador de actividades y orientador del trabajo de los alumnos.

Por ello, cada tema -desde la introducción de conceptos a la resolución de problemas, pasando por el trabajo experimental-, se puede convertir así en un conjunto de actividades debidamente engarzadas (a realizar por los alumnos), constituyendo un todo coherente que se ha propuesto denominar "Programa-guía de actividades" (Furió y Gil 1978, Gil 1982).

Así, la elaboración de cada tema supone un trabajo de traducción, de lo que en la enseñanza tradicional es información a transmitir, en actividades de aprendizaje, cuidadosamente estructuradas para integrar un todo coherente. Aparece así la necesidad de un trabajo colectivo que adquiera las características de una investigación aplicada, ensayado durante varios años con

control de resultados y revisiones subsiguientes.

La utilización de programas-guía plantea la conveniencia de estructurar la clase en pequeños grupos o equipos. Esto es defendido decididamente por Piaget (1977) y el mismo Ausubel (1978) si bien no se pronuncia de forma general sobre las ventajas del trabajo en grupos, reconoce que "la discusión es el método más eficaz y realmente el único factible de promover el desenvolvimiento intelectual con respecto a los aspectos menos establecidos y más controvertidos de la materia de estudio". Y toda nueva tarea, lógicamente, tiene para los alumnos el carácter de poco establecida y controvertida y, en particular, la Física moderna reúne para el alumno todas esas características. Además el trabajo en grupos favorece el nivel de participación y la creatividad necesaria para emitir hipótesis, diseñar experimentos, etc, imprescindibles para el cambio metodológico.

En cuanto a la forma de trabajo consiste en la realización ordenada de cada una de las actividades propuestas, seguida por una puesta en común, con reformulación del profesor que puede así clarificar y completar el trabajo de los pequeños grupos. Esto no supone "recaer" en la clase tradicional: el hecho de que los grupos hayan abordado previamente las cuestiones, incluso cuando este trabajo ha resultado infructuoso, hace su receptividad muy superior, por responder a cuestiones que ellos ya se han planteado.

En resumen, hemos intentado fundamentar nuestra segunda hipótesis en la necesidad de proporcionar a los alumnos una imagen de la ciencia acorde con las características del trabajo científico y de organizar, por ello, el proceso de enseñanza /aprendizaje como un cambio conceptual y metodológico. Esto nos lleva a organizar el curriculum de forma que facilite dichos cambios, ajustados en cierta medida a los grandes cambios de paradigma.

Este modelo de enseñanza /aprendizaje nos ha permitido, junto al análisis de la bibliografía sobre el tema, diseñar unos criterios y un hilo conductor para introducir los conceptos básicos de Física relativista y cuántica de una forma clara y elemental que, partiendo de la crisis de las concepciones clásicas, muestre cualitativamente las características del nuevo paradigma.

A continuación, basándonos en dicho modelo, diseñamos un método de trabajo en el aula.

Todo ello (criterios, hilo conductor y método) ha sido preparado para lograr que los alumnos alcancen un mayor grado de comprensión y dejen de incurrir en errores conceptuales. En los siguientes capítulos expondremos el diseño y los resultados que vienen a comprobar nuestra hipótesis.

Capitulo 6.  
DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA CONTRASTACION DE  
LA SEGUNDA HIPOTESIS

- 6.1. Operativización de la segunda hipótesis
- 6.2. Diseño para contrastar la segunda hipótesis
- 6.3. Presentación de los programas-guía de actividades

La crisis de la Física clásica y el surgimiento de la Física moderna (Programa-guía para el nivel elemental)  
Introducción a los conceptos de Física relativista y cuántica (Programa-guía para el nivel superior)

-----  
Cap 6. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA CONTRASTACION DE LA SEGUNDA  
HIPOTESIS  
-----

6.1. OPERATIVIZACION DE LA SEGUNDA HIPOTESIS.

De acuerdo con nuestra segunda hipótesis es posible plantear una visión clara y elemental de la Física moderna que favorezca la comprensión de los alumnos y evite los habituales errores conceptuales a que hemos hecho referencia en la primera parte de este trabajo. Para contrastarla experimentalmente:

1. Desarrollaremos programas de introducción a la Física moderna (tanto para un nivel elemental como para otro superior) que, orientados como trabajo de investigación en una perspectiva de cambio conceptual y metodológico (ver el capítulo anterior), se planteen como un conjunto de actividades para los alumnos. Más concretamente, dichas actividades estarán dirigidas a facilitar que los alumnos:

-Realicen una síntesis de la Física clásica.

-Expliciten la visión del comportamiento de la materia que ésta proporciona.

-Se refieran a las causas de la crisis de la Física clásica.

-Señalen sus límites de validez.

-Comprendan que la Física moderna constituye un nuevo cuerpo de conocimientos en ruptura con la visión clásica que proporciona una

imagen diferente del comportamiento de la materia.

-Lleguen a conocer mínimamente el importante desarrollo científico y tecnológico que supuso la nueva Física (como forma de resaltar la importancia teórica y práctica del nuevo paradigma).

-No incurran en los errores conceptuales habituales.

2. Aplicaremos estos programas-guía a los alumnos, esperando que su aprendizaje muestre diferencias significativas con respecto a los alumnos a quienes se ha aplicado el tratamiento habitual reflejado por los libros de texto y caracterizado, como hemos mostrado ya en la primera parte de este trabajo, por una transmisión de conocimientos elaborados que manifiestan escasa o nula atención al proceso de construcción de dichos conocimientos. Esperamos, pues, que los alumnos de los grupos experimentales muestren tanto una reducción drástica de errores conceptuales como una visión más correcta de la Física moderna.

Mas concretamente, cabe esperar que dichos alumnos:

-Tengan una visión menos lineal del desarrollo de la Física y conozcan la existencia de crisis en dicho desarrollo, en particular, la crisis de la Física clásica.

-Citen alguno de los problemas que provocaron dicha crisis.

-Mencionen alguna de las diferencias entre Física clásica y moderna.

-Conozcan los límites de validez de la Física clásica.

-Alcancen una visión cualitativa correcta del comportamiento de la materia según las concepciones modernas (por ejemplo, la variación de la masa con la velocidad, el comportamiento

ondulatorio de los electrones, etc).

-No incurran en errores conceptuales relevantes.

## 6.2. DISEÑO PARA CONTRASTAR LA SEGUNDA HIPOTESIS.

Para comprobar los puntos enumerados en la operativización de la hipótesis:

-Hemos elaborado programas-guía de actividades para la introducción de la Física cuántica en los niveles elemental y superior y de la Física relativista en el superior únicamente.

-Hemos aplicado dichos materiales a alumnos de los niveles elemental y superior.

-Hemos pasado los cuestionarios utilizados en la primera parte de este trabajo a dichos alumnos.

-Hemos realizado una comparación estadística entre los resultados de estos alumnos y de los sometidos al tratamiento habitual (ver apartado 4.5).

La elaboración de estos materiales didácticos alternativos tiene por objeto corregir las deficiencias de los textos y de la práctica docente habituales, analizadas en la primera parte de este trabajo.

Para su realización se han tenido en cuenta, además de la bibliografía mencionada en el apartado 5.2.2, dedicado al establecimiento de los criterios, los trabajos realizados en dicha perspectiva por miembros del Seminario Permanente de Física y Química del ICE de la Universidad de Valencia (Beltrán et al 1976, Beltrán et al 1977, Gil et al 1979).

El desarrollo de estos programas- guía ha sido un proceso laborioso, puesto que en él participan colectivos de profesores. Se elabora un primer borrador que es sometido a cierto número de

expertos (generalmente profesores universitarios de dicha materia) para su revisión, la versión reelaborada es discutida seguidamente con profesorado del nivel en que se va a impartir (en nuestro caso, miembros del Seminario Permanente de Física y Química) y finalmente, pueden aparecer nuevas modificaciones tras el trabajo de los alumnos, particularmente en aquellos casos en que haya sido ineficaz, lo cual quizá muestre que la actividad planteada era inadecuada. En resumen, este proceso se traduce en la existencia de 5 o 6 versiones del programa-guía previas a la que aquí se presenta que, por supuesto, no tiene la aspiración de ser la definitiva .

La aplicación de los materiales se ha realizado de dos formas:

-Por una parte, el propio autor de esta tesis ha utilizado los programas- guía con sus alumnos

-Hemos creído también conveniente tomar en consideración los resultados obtenidos por otros profesores quienes quienes han utilizado los materiales elaborados en una forma más laxa -dedicando menos tiempo y no realizando todas las actividades-, para contrastar los efectos de una enseñanza de la Física moderna guiada por los mismos principios pero sin que se diera el "especial" interés del investigador, lo que como es bien sabido produce siempre mejores resultados en el grupo experimental -efecto Hawthorne (Fox 1981)-.

De hecho los profesores implicados en el diseño no llegaron a aplicar los programas- guía elaborados sino tan sólo versiones

reducidas de los mismos, aunque estaban de acuerdo con los criterios para introducir la Física moderna que han presidido la elaboración de los programas- guía (mostrar la crisis de la Física clásica, etc).

En cuanto a la aplicación de los cuestionarios, dado que la contrastación de nuestra segunda hipótesis implica el estudio de la existencia o no de diferencias significativas entre los grupos de alumnos sometidos al tratamiento habitual (grupos control) y los grupos de alumnos a los que se les han aplicado los materiales didácticos elaborados (grupos experimentales), esto exige la utilización de los mismos cuestionarios usados en la comprobación de la primera hipótesis (ver tablas 3.2.4.a y 3.2.4.b).

El primero de dichos cuestionarios se utiliza con la totalidad de los alumnos (2º y 3º de BUP y COU), pero el segundo, sólo con los alumnos tratados con el programa-guía para el nivel superior (3º de BUP y COU), al igual que se hizo en la primera parte de éste trabajo.

Lógicamente dichos cuestionarios no evalúan la totalidad del trabajo realizado por los alumnos, dado que este no es nuestro objetivo, sino verificar hasta que punto alcanzan una comprensión aceptable de unos aspectos básicos .

### 6.3. PRESENTACION DE LOS PROGRAMAS-GUIA DE ACTIVIDADES

Los programas-guía, consisten en folletos en que se presentan a los alumnos el conjunto de las actividades de un tema debidamente estructuradas y acompañadas de las introducciones e ilustraciones aclaratorias necesarias. Para facilitar su distinción, las actividades van precedidas por la letra A seguida de un número. Además, algunas actividades, por su especial dificultad, se consideran opcionales, lo que se indica explícitamente en cada caso.

En la versión para el profesor, que adjuntamos a continuación, las actividades van acompañadas de comentarios en los que se explicitan el objetivo de cada actividad, las contestaciones más habituales de los alumnos y la información que el profesor debe añadir en sus recapitulaciones. Dichos comentarios aparecen con ese título, con líneas horizontales separadoras y con un sangrado muy superior al de las actividades de los alumnos, con lo que se pretende evitar la confusión entre lo que es texto para el alumno y para el profesor.

Para finalizar, dado que los programas-guía aparecen algunas actividades idénticas en ambos niveles -por el carácter parcialmente cíclico del currículum-, los comentarios sólo aparecen en uno de ellos, remitiendo siempre al nivel en que están desarrollados e indicando el tratamiento adecuado al nivel que se trate.

Se adjuntan seguidamente ambos programas-guía.

## LA CRISIS DE LA FÍSICA CLÁSICA Y EL SURGIMIENTO DE LA FÍSICA MODERNA

(Programa-guía para el nivel elemental)

Hacia 1880 se consideraba a la Física como una ciencia prácticamente elaborada y cerrada, cuyos principios y leyes estaban sólidamente establecidos.

Pero una serie de problemas que no pudieron ser explicados originaron, a principios del siglo XX, la crisis de la Física clásica, poniendo en cuestión hasta sus conceptos más evidentes y sólidos, y el surgimiento de un nuevo paradigma.

Desarrollaremos este tema de acuerdo con el siguiente índice:

1. Síntesis de la Física clásica.
2. Dificultades de la Física clásica
3. Orígenes de la Física cuántica
  - 3.1. Teoría cuántica de la radiación: Efecto fotoeléctrico y concepto de fotón
  - 3.2. Teoría cuántica del átomo: Modelo de Bohr
4. Establecimiento de la Física cuántica
5. Aplicaciones de la Física moderna

### 1. SÍNTESIS DE LA FÍSICA CLÁSICA

A fines del siglo XIX, con la realización de la síntesis electromagnética por Maxwell -que integraba como hemos visto los fenómenos hasta entonces considerados desconexos de electricidad, magnetismo y óptica-, parecía haberse dado respuesta satisfactoria a los principales problemas que planteaba la ciencia física. A lo largo de 2 siglos se había erigido así un edificio imponente del que la mecánica newtoniana

pilares.

A.1. Señalar algunos de los principales éxitos (incluyendo sus aplicaciones prácticas) de la Física clásica, es decir, desde la época de Galileo a la de Maxwell.

-----  
Comentarios A.1. Los alumnos mencionan habitualmente el estudio de los movimientos, las leyes de Newton de la Dinámica, los principios de conservación (masa, cantidad de movimiento, momento angular, energía, carga), la ley de gravitación universal, las leyes de la electricidad y el magnetismo, la corriente eléctrica, la síntesis electromagnética, etc. En cuanto a las aplicaciones señalan la construcción de máquinas térmicas, factor esencial en la primera revolución industrial, la producción y transmisión de la corriente eléctrica o de las ondas electromagnéticas -radar, radio, televisión...-.

El profesor encontrará buenas síntesis de la Física clásica en, por ejemplo, la Introducción del Eisberg (1974) y en el Cap. 1 "Los orígenes de la Física cuántica" del Messiah (1973). Y dado que el objeto de la actividad es sintetizar la Física clásica, convendrá que se recalque, resumiendo los párrafos anteriores, como los fenómenos caloríficos y acústicos, debidos a los movimientos de las partículas del mundo microscópico, se integraron en el esquema mecánico y como la teoría electromagnética acabó abrazando a la óptica, dando así una visión más sistemática y estructurada.

-----  
A.2. (Opcional) Tratar de indicar que imagen del comportamiento de la materia introduce la Física clásica (en particular, como se conciben el espacio, el tiempo, las radiaciones y los cuerpos).

-----  
Comentarios A.2. El objeto de la misma es mostrar como en la Física clásica se distinguen dos categorías de objetos en el universo, la materia y las radiaciones. La materia esta hecha de corpúsculos perfectamente localizables sometidos a las leyes de la Mecánica de Newton, cuyo estado viene definido en cada instante por su posición y su velocidad. Las radiaciones siguen el electromagnetismo de Maxwell y sus variables dinámicas son las componentes en cada punto del espacio de los campos eléctrico y magnético (Messiah 1974).

Subyacente se encuentra una imagen del universo en que los cuerpos se desplazan en un espacio absoluto -independiente

de los objetos que contiene y que no ejerce ninguna acción sobre los mismos-, sufriendo una evolución medible en una escala temporal también absoluta.

-----

Esta Física clásica había surgido contra un paradigma anterior que se había mostrado incapaz de resolver una serie de problemas.

A.3. ¿Qué aspectos de la Física aristotélico-escolástica (o pregalileana) vino a derribar la Física clásica?.

-----

Comentarios A.3. Si los alumnos están familiarizados con este planteamiento del curriculum surgen aspectos como la separación entre Física terrestre y física celeste, en conexión con la doctrina de los cuatro elementos y el éter, la idea de la fuerza como causa del movimiento (es decir, la proporcionalidad de la fuerza con la velocidad), la dependencia de la masa en la caída de graves, el reposo absoluto de la Tierra (geocentrismo), el "horror al vacío", etc. Esta actividad tiene gran importancia porque permite a los alumnos romper con una imagen lineal del crecimiento de la ciencia y contribuye a prepararles para una nueva ruptura.

-----

## 2. DIFICULTADES DE LA FISICA CLASICA.

Del mismo modo que las dificultades de la concepción aristotélico escolástica contribuyeron al surgimiento del paradigma clásico en el siglo XVII, a finales del siglo XIX, una serie de problemas que no pudieron ser explicados originaron la crisis de la Física clásica, poniendo en cuestión los conceptos más evidentes y sólidos, y produjeron el surgimiento de un nuevo paradigma.

A.4. Como ya hemos visto en temas anteriores la Física clásica explicaba prácticamente todos los fenómenos conocidos, pero existían algunos cuya explicación permanecía pendiente. Citar algunos de dichos problemas pendientes de resolución.

Comentarios A.4. Los alumnos citan los espectros discontinuos de los gases incandescentes, los espectros continuos de solidos y liquidos incandescentes, el hecho de que la descarga eléctrica entre dos electrodos es facilitada cuando llega luz a uno de ellos (efecto fotoeléctrico) y la inestabilidad del átomo de Rutherford. Además, el profesor tendrá que añadir el fracaso en la en la detección de un sistema de referencia en reposo absoluto indicando como este problema, junto con los fenómenos cuánticos, originaron dos líneas de investigación que confluyeron en provocar la crisis del paradigma clásico (ya que éste no pudo dar cuenta de ellos) y condujeron al establecimiento de la Física relativista y de la Física cuántica.

-----

### 3. ORIGENES DE LA FISICA CUANTICA

De los problemas mencionados en la actividad 4 nos limitaremos aquí a estudiar, cualitativamente, el efecto fotoeléctrico y los espectros discontinuos de los gases, ya que la teoría de la relatividad y la interpretación de los espectros continuos rebasa el nivel de este curso.

#### 3.1. Teoría cuántica de la radiación: Efecto fotoeléctrico y concepto de fotón

Como ya conocemos, el descubrimiento del efecto fotoeléctrico fue realizado en el curso de las experiencias de Hertz que tan brillantemente confirmaron la teoría electromagnética. En efecto, Hertz observó un hecho que la teoría no predecía: la chispa entre los terminales del detector saltaba más fácilmente cuando dichos terminales estaban iluminados por una luz intensa.

En efecto, colocando una pantalla entre el circuito primario y el detector, la chispa tardaba en saltar cierto tiempo. Y si, colocando la pantalla, se iluminaba el detector con otra luz de elevada frecuencia, de nuevo la chispa saltaba más fácilmente.

A.5. A título de hipótesis, tratar de dar alguna explicación del fenómeno observado por Hertz, es decir, del hecho de que en ciertas ocasiones al iluminar una placa metálica se arrancan electrones. Concretar dicha hipótesis -teniendo en cuenta que según la teoría electromagnética la luz es una onda que distribuye uniformemente su energía- e indicar como se puede

conseguir arrancar más electrones.

-----  
Comentarios A.5. Los alumnos señalan que la emisión de electrones de la superficie metálica, es debida a que estos adquieren energía cinética al recibir la energía transferida por la onda luminosa. Al concretar señalan, en general, que el número de electrones liberados dependerá de la intensidad o cantidad de luz (fuentes más potentes o numerosas).

-----  
Se encontró que estas predicciones basadas en la Física clásica contradecían los resultados experimentales, lo que obligó a la emisión de nuevas hipótesis, como veremos en la siguiente actividad.

A.6. Sugerir alguna nueva hipótesis sobre como distribuye la luz su energía que explique por qué en ocasiones (para determinadas frecuencias de la luz) aunque llegue muy poca luz es capaz de arrancar electrones mientras que para otros tipos de luz aunque su intensidad sea grande (llegue mucha luz) no puede arrancar ningún electrón.

-----  
Comentarios A.6. Esta es una de las actividades mas difíciles; algunos alumnos pueden llegar a ver que que ello obliga a aceptar que la luz no distribuye uniformemente su energía. Otros señalan que dicha energía depende de la frecuencia (del color) y que, por ello, la luz puede arrancar los electrones independientemente de su intensidad. El profesor debe recalcar como Einstein una ambas ideas la considerar las ondas electromagnéticas como una distribución de "paquetes" de energía o cuantos -posteriormente fotones- cada uno de los cuales posee una energía proporcional a la frecuencia según la expresión  $E = hv$ , donde  $h$  es una nueva constante ya introducida en 1900 por Planck.

-----  
3.2. Teoría cuántica del átomo: Modelo de Bohr

Hemos visto en el tema anterior, como los modelos atómicos basados en la Física clásica (Thomson, Rutherford...) eran incapaces de explicar algunos de los fenómenos observados. Así el modelo de Thomson (1904) era incapaz de dar cuenta de la dispersión de partículas alfa por una fina lámina de oro (experimento de Geiger y Mardsen, 1909) y el modelo de Rutherford (1911) si bien explicaba lo anterior, era inconsistente con la teoría electromagnética clásica, ya que según esta, un electrón girando alrededor del núcleo debe estar emitiendo energía continuamente, lo cual le llevaría a caer muy rápidamente sobre el núcleo, en contradicción con la aparente estabilidad del átomo.

En 1913 Bohr aplicó la nueva teoría cuántica de la radiación al átomo de Rutherford, modificándolo de forma que diera cuenta de los hechos experimentales relativos a la emisión de la luz. De forma esquemática podemos exponer las ideas de Bohr como sigue:

1. Los electrones sólo pueden encontrarse en ciertas órbitas de energía bien determinada (o estados energéticos).

2. Mientras los electrones giran en dichas órbitas no absorben ni emiten energía. Sólo cuando el electrón pasa de una órbita a otra más alejada absorbe energía y, contrariamente, sólo cuando desciende a una órbita más próxima al núcleo puede emitir energía.

A.7. Indicar las contradicciones entre las ideas de Bohr y la Física clásica.

-----  
Comentarios A.7. Esta actividad permite que los alumnos señalen como ambos postulados contradicen la Física clásica, ya que según la Mecánica clásica el electrón podía describir órbitas de cualquier energía. Ello muestra que el carácter cuantizado de la energía, ya visto para la radiación (en el efecto fotoeléctrico), aparece también en los sistemas atómicos, mientras que según el electromagnetismo, debería irradiar ininterrumpidamente al girar en las órbitas, como ya se vió en el tema anterior "Primeras concepciones sobre la estructura atómica".

-----  
A.8. Explicar cómo el modelo de Bohr da cuenta de los espectros discontinuos de los gases incandescentes.

-----  
Comentarios A.8. Los alumnos indican que al cambiar de órbita se produce una variación de energía  $\Delta E = E_f - E_i$

que, según el apartado anterior, será  $AE = h\nu$ . Como sólo existen unas órbitas determinadas, sólo se emitirán o absorberán fotones con frecuencias determinadas.

-----

Bohr pudo justificar así los espectros de emisión y de absorción para el elemento más sencillo, el hidrógeno. Se trataba de un éxito espectacular, similar al obtenido por Newton al explicar las órbitas de los planetas gracias a la ley de gravitación universal.

#### 4. ESTABLECIMIENTO DE LA FÍSICA CUÁNTICA

En el apartado anterior hemos abordado algunos de los problemas que marcaron los límites de la Física clásica y pusieron en evidencia la necesidad de profundos cambios en ella.

Y aunque los primeros cambios aparecen como retoques, como hipótesis parciales que rectificaron el edificio teórico existente, pronto se vió la necesidad de un replanteamiento global que conduce a la elaboración de un nuevo paradigma.

Este nuevo marco conceptual que sustituirá a la Física clásica constituye lo que conocemos como Física cuántica que se inicia en 1923 con los trabajos del científico francés Luis de Broglie.

A.9. La explicación del efecto fotoeléctrico evidencia que la luz posee conjuntamente propiedades ondulatorias y corpusculares. ¿Qué sugiere esto acerca del comportamiento de toda la materia (como, por ejemplo, los electrones) y a la distinción clásica entre ondas y corpúsculos?

A.10. Breve explicación por el profesor del establecimiento de la Física cuántica y de sus características básicas,

-----

Comentarios A.9 y A.10. La primera de ellas permite que los alumnos introduzcan el carácter ondulatorio de toda la materia y no sólo de la luz, pero no deben quedarse ahí y por ello el profesor debe añadir, de acuerdo con Feynman (1971 b), Levy-Leblond (1982) y otros, que los electrones, los fotones, etc, no son ni simplemente ondas ni simplemente partículas, ya que dichos conceptos sólo tienen validez en el dominio de la clásica (estos aspectos se desarrollan ampliamente en los comentarios de la A.5

del capítulo 3 del Programa guía para el nivel superior).

La segunda actividad ha sido pensada para que el profesor pueda introducir, cualitativamente y con el apoyo de la actividad anterior, ideas como: la complejidad de los objetos (no reducibles a pequeñas bolas o pequeñas ondas), la indeterminación como expresión de dicha complejidad (por la conexión existente entre el carácter ondulatorio y la deslocalización). Estas ideas aparecen más cuidadosamente desarrolladas en el capítulo 3 del Programa guía para el nivel superior.

-----

En las actividades siguientes mostraremos algunas implicaciones de las ideas cuánticas que acabamos de introducir.

A.12. En que contradice el modelo de Bohr -que supone el giro de electrones puntuales en órbitas definidas- a los conceptos cuánticos introducidos en la actividad anterior.

A.13. Establecer las diferencias más notables entre las visiones clásica y cuántica del comportamiento de la materia.

-----

Comentarios A.12 y A.13. Cabe esperar que los alumnos señalen que el carácter ondulatorio del electrón implica una cierta deslocalización y, por tanto, una cierta indeterminación en el movimiento que puede seguir el electrón. Esto se traduce en que el electrón carece de una trayectoria perfectamente determinada. El profesor indicará que por tanto sólo podemos referirnos a la posición del electrón de forma probabilista, lo que le permite introducir el concepto de estado del electrón u orbital.

La A.13. se encuentra desarrollada al final del capítulo 3 del Programa guía para el nivel superior. Algunas de dichas diferencias (las relativistas, la idea de interacción, etc) no pueden, por razones evidentes, ser introducidas en este nivel.

-----

La Física cuántica, junto con la relativista, constituyen sólidas teorías científicas, con principios y métodos bien desarrollados que abrieron nuevas posibilidades al desarrollo científico y técnico.

A.14. Realizar un estudio bibliográfico (utilizando textos de cursos superiores, enciclopedias, revistas de divulgación, etc) con objeto de enumerar los desarrollos científicos y tecnológicos más importantes que supuso la Física moderna,

-----  
Comentarios A.14. Ver los comentarios a la A.19 del capítulo 3 del Programa guía para el nivel superior.  
-----

## 6. ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS

A.15. Ciertos materiales fotográficos pueden manejarse con seguridad con luz roja, pero se deterioran con luz de otro color. ¿Cómo puede explicarse esto?

A.16. Una placa fotográfica posee una capa de pequeños cristales, cada uno de los cuales puede descomponerse si se expone brevemente a la luz. Los cristales descompuestos reaccionan con el líquido revelador ennegreciéndose. Explicar por qué la imagen está constituida por la acumulación de granos ennegrecidos.

A.17. Señalar, sobre una flecha temporal, algunos hitos que consideres fundamentales en el desarrollo de la Física moderna.

A.18. Comentar las siguientes proposiciones explicando en que medida te parecen correctas:

- Los átomos están constituidos por un núcleo y orbitales que pueden estar ocupados o no por electrones.
- Los orbitales son zonas del espacio que los electrones pueden ocupar.
- Los orbitales están asociados a propiedades de los electrones y no tienen existencia independientemente de los mismos.

-----  
Comentarios A.15 a A.18. El interés de las dos primeras actividades estriba no sólo en su relación con

aplicaciones en la vida cotidiana, sino en que permiten una introducción del concepto de fotón: de la dependencia de la energía con la frecuencia y del carácter corpuscular.

La A.17 permite que los alumnos realicen una síntesis del tema.

La A.18 pretende salir del paso del error conceptual muy frecuente del orbital "estantería", según el cual los orbitales existen independientemente de los electrones y pueden ser ocupados por estos.

-----

## INTRODUCCION A LA FISICA RELATIVISTA Y CUANTICA

### CRISIS DE LA FISICA CLASICA Y SURGIMIENTO DE LA FISICA MODERNA

(Programa guia para el nivel superior)

#### Introducción

A fines del siglo XIX, con la realización de la síntesis electromagnética por Maxwell -que integraba como ya hemos visto los fenómenos hasta entonces considerados desconexos de electricidad, magnetismo y óptica-, parecía haberse dado respuesta satisfactoria a los principales problemas que planteaban las ciencias físicas. A lo largo de mas de dos siglos se había erigido así un edificio imponente del que la Mecánica newtoniana y la teoría electromagnética eran los pilares.

A.1 Señalar algunos de los principales éxitos (incluyendo sus aplicaciones prácticas) de la Física clásica, es decir, desde la época de Galileo a la de Maxwell inclusive.

A.2. Tratar de indicar qué imagen del comportamiento de la materia introduce la Física clásica (en particular, como se conciben el espacio, el tiempo, las radiaciones y los cuerpos).

Esta Física clásica había surgido contra un paradigma anterior que se había mostrado incapaz de resolver una serie de problemas.

A.3. ¿Qué aspectos de la Física aristotélico-escolástica (o pregalileana) vino a derribar la Física clásica?

Del mismo modo que las dificultades de la concepción aristotélico escolástica contribuyeron (a través de un proceso de cambio metodológico y conceptual) al surgimiento del paradigma clásico en el siglo XVII, a finales del siglo XIX, una serie de problemas que no pudieron ser explicados originaron la crisis de la Física clásica, poniendo en cuestión los conceptos más

evidentes y sólidos, y provocando el surgimiento de un nuevo paradigma.

A.4. Como ya hemos visto en temas anteriores la Física clásica explicaba prácticamente todos los fenómenos conocidos entonces, pero existían algunos cuya explicación permanecía pendiente. Citar algunos de dichos problemas pendientes de solución.

-----  
Comentarios A.1 a A.4. Estas actividades, de acuerdo con nuestro criterio del carácter parcialmente cíclico del currículum (Seminario de Física y Química 1983 y 1984), son las mismas que las desarrolladas en el programa-guía para el nivel elemental, en el cual se pueden encontrar los comentarios correspondientes a cada una de ellas.  
-----

Estos problemas dieron origen a dos grandes líneas de investigación: la Relatividad y la Física cuántica. De acuerdo con ello, desarrollaremos el tema según el siguiente hilo conductor.

1. Algunos resultados de la Física Relativista.
  - 1.1. Los conceptos de espacio y tiempo absolutos como supuestos básicos de la Física clásica.
  - 1.2. El fracaso en la búsqueda de un sistema de referencia en reposo absoluto.
  - 1.3. Crítica de los supuestos básicos de la Física newtoniana. Los postulados de la Relatividad especial.
  - 1.4. Masa y energía en la Física relativista.
2. Orígenes de la Física cuántica.
  - 2.1. Crisis de la teoría clásica de la radiación: El efecto fotoeléctrico.
  - 2.2. Una hipótesis radical: El fotón.
  - 2.3. Algunos éxitos del modelo de fotón.
    - 2.3.1. Espectros discontinuos y estructura atómica.
    - 2.3.2. El efecto Compton.
3. Establecimiento de la Física cuántica.
  - 3.1. Hipótesis de De Broglie. Contrastación experimental.
  - 3.2. Conceptos fundamentales de Mecánica cuántica.
    - 3.2.1. Relaciones de indeterminación de Heisenberg.
    - 3.2.2. Función de ondas y ecuación de Schrodinger.
  - 3.3. La nueva imagen del comportamiento de la materia.
  - 3.4. Actividades de recapitulación.

## 1. ALGUNOS RESULTADOS DE LA FISICA RELATIVISTA

Hemos visto en la anterior presentación general la existencia de una serie de problemas que no pudieron ser explicados por la Física clásica. Dichos problemas fueron las primeras indicaciones de que la Física clásica exigía cambios fundamentales, y originaron dos líneas de investigación que contribuyeron a provocar la crisis del paradigma clásico.

Estas dos líneas fueron, por una parte, el fracaso en la detección de un sistema de referencia en reposo absoluto, lo que conduciría a la Teoría especial de la relatividad y, por otra, los fenómenos de absorción y emisión de la luz, que condujeron al establecimiento de la Física cuántica.

El estudio de la Física cuántica será el objeto de los capítulos siguientes. En este capítulo abordaremos algunas de las principales ideas de la Física relativista, así como sus implicaciones.

De acuerdo con ello, desarrollaremos el tema según el siguiente hilo conductor.

1.1. Los conceptos de espacio y tiempo absolutos como supuestos básicos de la Física clásica.

1.2. El fracaso en la búsqueda de un sistema de referencia en reposo absoluto.

1.3. Crítica de los supuestos básicos de la Física newtoniana. Los postulados básicos de la relatividad especial.

1.4. Masa y energía en la Física relativista.

### 1.1. LOS CONCEPTOS DE ESPACIO Y TIEMPO ABSOLUTOS COMO SUPUESTOS BÁSICOS DE LA FISICA CLASICA

Puede relacionarse fácilmente la génesis de la Teoría de la relatividad con un problema presente desde antiguo en la Historia de la Ciencia: el de la existencia o no del espacio absoluto. En realidad ya Aristóteles planteaba que no se puede hablar de la posición de un cuerpo ni, por tanto, de su movimiento, si no es con referencia a otro; que todo movimiento es siempre relativo a

un determinado sistema de referencia. Sin embargo, el carácter absoluto del movimiento reaparece si se acepta la existencia de un sistema de referencia en reposo absoluto.

A.1. Indicar brevemente que objetos materiales pueden considerarse en reposo absoluto.

-----

Comentarios A.1. Esta actividad permite conectar con las ideas previas de los alumnos en este campo. Mencionan así a la Tierra, al Sol o a las estrellas fijas como sistemas de referencia en reposo absoluto. Ello puede dar lugar a una revisión de las ideas que a lo largo de la Historia se tenían al respecto. Así, la Tierra se consideró como primer sistema en reposo absoluto, dado que así parecen indicarlo las experiencias cotidianas, y esto fue lo aceptado durante siglos en el sistema de Ptolomeo, que situaba a la Tierra en el centro del Universo. En cuanto al Sol, la teoría heliocéntrica de Cópernico le confirió dicho carácter arrebatándoselo a la Tierra. Para finalizar, la Física clásica consideró como sistema de referencia en reposo absoluto al propio espacio (a las estrellas fijas en él), considerándolo como un mero receptáculo de los objetos materiales, inmutable e independiente de los fenómenos que en él se producen.

-----

Pero aceptar la existencia de objetos en reposo absoluto supone la posibilidad de distinguir experimentalmente si un sistema de referencia dado se encuentra en reposo o en movimiento absoluto.

A.2. En la orilla de un río, un niño juega a lanzar una pelota al aire y a recogerla; sobre una canoa que avanza con movimiento uniforme un segundo niño hace otro tanto. ¿Existe alguna diferencia en la forma en que ambos niños observaran el juego?

-----

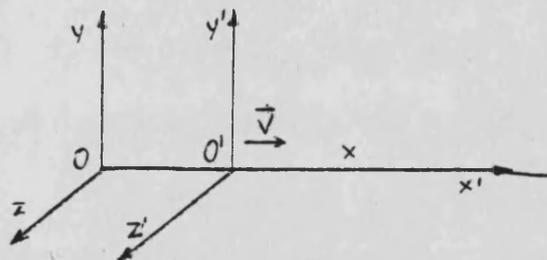
Comentarios A.2. Algunos alumnos contestan que la pelota se retrasa, lo que permite realizar una crítica del preconcepto. Pero, habitualmente, contestan que ninguna, dado que la práctica cotidiana nos muestra que no existen diferencias entre los fenómenos que ocurren en marcos de referencia en reposo o en movimiento uniforme (es decir, no acelerados entre sí o inerciales) uno respecto del otro. La razón de esto es muy simple, como ya lo puso en evidencia el propio Galileo; la pelota lanzada hacia

arriba desde la barca lleva la velocidad de esta. Esto nos permite afirmar que las leyes de la Mecánica no se modifican al referirlas a un sistema en reposo o a uno que se mueva con movimiento rectilíneo uniforme con respecto al anterior. Este enunciado se conoce como principio de relatividad de Galileo.

-----

Los resultados de esta actividad permiten enunciar el principio de relatividad de Galileo. Se puede mostrar más rigurosamente este principio al considerar como cambian las magnitudes mecánicas al pasar de un sistema de referencia de origen  $O$  a otro de origen  $O'$ . Esto es lo que plantean las dos actividades siguientes.

A.3. Supongamos que  $O'$  se desplaza respecto de  $O$  a lo largo del eje  $X$  con velocidad  $v$ . ¿Cuáles serán las ecuaciones que ligan las coordenadas  $(x, y, z)$  de un punto referidas al primer sistema y las  $(x', y', z')$  referidas al segundo sistema?



Las ecuaciones obtenidas permiten el paso de un sistema en reposo a otro en movimiento uniforme y se conocen como transformaciones de Galileo.

A.4. Obtener a partir de las transformaciones de Galileo las relaciones entre las velocidades y aceleraciones de un punto en ambos sistemas. ¿Qué se puede concluir respecto de las leyes de la dinámica en ambos sistemas?

-----

Comentarios A.3 y A.4. Estas actividades permiten la deducción cuantitativa del principio de relatividad de Galileo al mostrar como las aceleraciones y, por tanto, las fuerzas y, en consecuencia, las leyes de la Mecánica son invariantes en distintos sistemas de referencia inerciales entre sí.

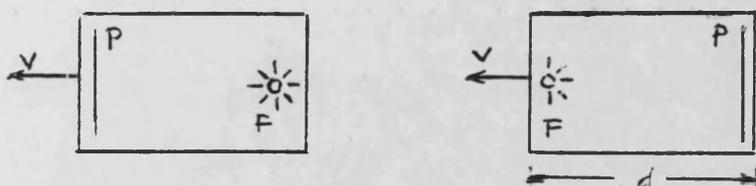
-----

1.2. FRACASO EN LA BÚSQUEDA DE UN SISTEMA DE REFERENCIA EN REPOSO

ABSOLUTO.

Aunque los fenómenos mecánicos no permiten, como ya hemos visto, distinguir entre dos sistemas en movimiento uniforme supuesto uno en reposo al otro que se desplaza con movimiento uniforme respecto a él, nada se oponía a que otro tipo de experiencias (por ejemplo, ópticas) hiciera posible esta distinción.

A.5. Aceptando que la Tierra se mueve respecto al espacio absoluto con velocidad  $v$  y siendo  $c$  la velocidad de la luz en dicho espacio, calcular el tiempo que la luz emitida por el foco  $F$  alcanzará la pantalla  $P$  -situada a una distancia  $d$ - en cada uno de los casos.



-----

Comentarios A.5. En un sistema de referencia en reposo absoluto la velocidad de la luz sería  $c$ , pero en un sistema que se mueva respecto del espacio absoluto dicha velocidad variaría, de acuerdo con las transformaciones de Galileo, desde  $c + v$  hasta  $c - v$ . Los alumnos resuelven habitualmente esta actividad en el sistema en reposo. Encuentran así que el tiempo que tardará la luz en recorrer la distancia  $d$  dependerá de la dirección en que la luz la recorra. Esta fue la idea básica de Michelson y Morley, cuyo interferómetro fue diseñado para poner en evidencia las diferencias de tiempo previstas. Pero el experimento siempre dió resultados negativos. Eludimos la cuestión del "éter" porque enmascara la cuestión fundamental: la inexistencia de un sistema de referencia en reposo absoluto y, por tanto, del espacio absoluto (Feynman 1971a, Jackson 1980).

-----

La actividad anterior muestra como los físicos creían disponer de un método para poner en evidencia la existencia de un sistema de referencia en reposo absoluto: bastaba para ello recurrir a medidas de la velocidad de la luz.

Un tal experimento fue realizado por Michelson en 1881 y por

Michelson y Morley en 1887. Se encontró, contra lo que cabía esperar, que la velocidad de la luz  $c$  no se veía afectada por el movimiento de la Tierra. O, dicho de otro modo, la  $c$  para todos los observadores, cualesquiera que fuera su velocidad respecto al éter era siempre la misma.

Se produjeron algunos intentos de justificar los resultados de Michelson dentro del marco de las teorías clásicas, con pequeñas modificaciones de las mismas, sin lograr una explicación satisfactoria.

Se hizo necesario un cambio más radical que pusiese en cuestión los fundamentos de la Mecánica Newtoniana.

### 1.3. CRITICA DE LOS SUPUESTOS BASICOS DE LA MECANICA NEWTONIANA. LOS POSTULADOS BASICOS DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL.

Los resultados de la experiencia de Michelson implicaban la imposibilidad de distinguir por procedimientos ópticos (igual que lo era por procedimientos mecánicos) si un sistema esta en reposo o en movimiento uniforme absolutos. Einstein generaliza este resultado en 1905 afirmando:

1. Todas las leyes de la Física (no sólo las de la Mecánica) son invariantes en todos los sistemas de referencia inerciales entre sí (Principio de la relatividad especial).

2. La velocidad de la luz en el vacío tiene el mismo valor  $c$  en todos los sistemas de referencia inerciales.

Esto condujo a Einstein a replantear la validez de las transformaciones galileanas que predicen distintos valores de la velocidad de la luz al pasar de un sistema de referencia inercial a otro. Para ello explicitó las hipótesis subyacentes en las que estas ecuaciones están basadas. En primer lugar estaba la identidad de las escalas temporales para uno y otro sistema, es decir, una cuarta ecuación  $t = t'$  que, por ser tan evidente, ni siquiera se había explicitado.

En segundo lugar, la identidad de los intervalos espaciales, es decir, de las distancias entre dos puntos, dadas en uno y otro sistema.

A.6. Mostrar, aplicando la transformación galileana, que la distancia entre dos puntos es la misma, medida en un sistema en reposo o en otro que se mueva con velocidad constante respecto al primero. Es decir, mostrar que:

$$x'_2 - x'_1 = x_2 - x_1$$

-----

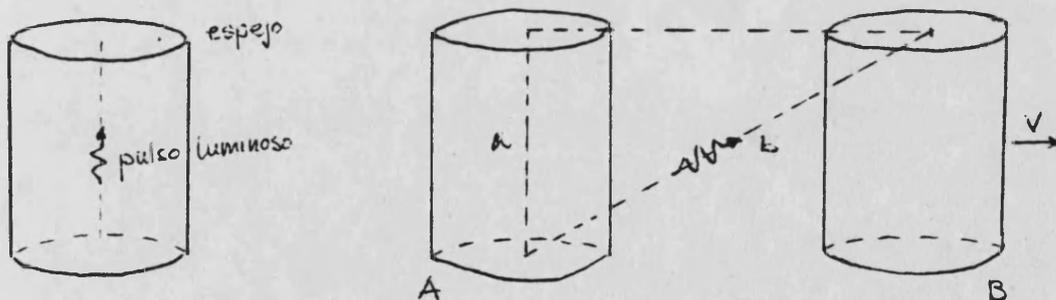
Comentarios A.6. Esta actividad es muy simple y los alumnos no tienen ninguna dificultad en realizarla (es conveniente introducir algunas actividades sencillas que den seguridad y refuercen la idea de avance).  
Conviene sobre todo resaltar el valor metodológico de la contribución de Einstein consistente en poner al descubierto los supuestos implícitos, que escapan así a la crítica y constituyen una de las barreras fundamentales con que se enfrentan los cambios profundos como el que aquí vamos a abordar.

-----

Y fue precisamente la crítica realizada por Einstein al concepto de tiempo lo que abrió las puertas a la solución del problema planteado por el resultado de la experiencia de Michelson.

Ilustraremos esta modificación del concepto de tiempo analizando el comportamiento de lo que podríamos llamar un "reloj de luz" constituido por un cilindro en cuya base inferior se emite luz y en cuya base superior hay un espejo (ver fig.). Sea  $t$  el tiempo necesario para que un pulso luminoso que parta desde el fondo incida en el espejo superior.

Consideremos ahora dos de estos relojes, A y B idénticos e inicialmente superpuestos de forma que B se desplace con respecto al A con velocidad  $v$ . Es evidente que si nosotros permanecemos solidarios al reloj A observaremos (ver fig.) que el camino recorrido por el rayo luminoso en B es mayor que el que recorre en el reloj A, lo que obliga a admitir que -si la velocidad de la luz es la misma en ambos casos- los tiempos han de ser diferentes.



Trataremos ahora de establecer la relación entre los tiempos  $t$  y  $t'$  medidos por ambos relojes.

A.7. Dar, en función de la velocidad de la luz  $c$ , el valor de

las distancias  $a$  y  $b$  recorridas por la luz en el reloj A y en el B. Dar igualmente, en función de su velocidad  $v$ , la distancia recorrida por el reloj B.

A.8. Aplicar el teorema de Pitágoras al triángulo de la figura para obtener la relación entre los tiempos. Interpretar el resultado.

-----  
Comentarios A.7 y A.8. Estas actividades permiten introducir la dilatación temporal. En efecto, el camino recorrido por la luz para el observador A sería  $ct'$ , mayor que el  $ct$ , correspondiente a un observador B que se mueva solidario con el reloj. Y como la velocidad de la luz  $c$  ha de ser siempre la misma, el tiempo  $t'$  será mayor que el  $t$ , es decir, que el reloj B se retrasará respecto al A -para un observador solidario con A-. Para un observador solidario con B sería simétricamente el reloj A el retrasado.

-----  
Esta dilatación temporal ha sido verificada experimentalmente mediante medidas de los periodos de semidesintegración de partículas inestables aceleradas hasta altas velocidades

A.9. El periodo de semidesintegración de una partícula elemental es de  $2.5 \cdot 10^{-8}$  s. ¿Cuál sería el periodo medido si dichas partículas fueran aceleradas hasta alcanzar velocidades de  $0.7 c$  respecto al observador?

-----  
Comentarios A.9. Los alumnos encuentran que, tal como hemos visto, la vida media de una partícula inestable aumenta (en el caso anterior, del orden de 1.8 veces) cuando esta posee una velocidad  $v$  grande con respecto al sistema de referencia a que está unido el observador. El profesor señalará que un observador solidario de la partícula mediría un tiempo de vida media normal para esta y, en cambio, vería alargarse la vida media de las partículas que están en reposo respecto al primer experimentador.

-----  
En resumen, encontramos que el tiempo transcurre de forma diferente para dos observadores distintos en sistemas de

referencia, uno de los cuales se mueve con velocidad  $v$  respecto al otro.

A.10. ¿Cómo explicar que las experiencias cotidianas, un viaje en tren, por ejemplo, no señale tal diferencia?

-----  
Comentarios A.10. Esta actividad se realizará si los alumnos al interpretar la actividad 8 no han señalado que sólo existe una diferencia sensible entre  $t$  y  $t'$ , cuando  $v$  tiene valores elevados, próximos a  $c$ , lo que justifica que en las experiencias cotidianas se pueden seguir tomando como iguales, es decir, se pueda considerar una única escala absoluta de tiempos.  
-----

#### 1.4. MASA Y ENERGIA EN LA FISICA RELATIVISTA

En el apartado anterior hemos visto algunas de las modificaciones que produjo la crítica de Einstein en los conceptos básicos de cinemática, lo que exigió, a su vez, una modificación de los conceptos fundamentales de la Física clásica. En efecto, las leyes fundamentales de la Mecánica clásica -tales como las leyes de conservación de la masa, la energía o la cantidad de movimiento-, dejaban de ser válidas, lo que, o bien implicaba reducir la validez de estas leyes a una mera aproximación para pequeñas velocidades, o bien exigía una modificación de las definiciones operativas de masa, cantidad de movimiento, etc

Einstein, para preservar la validez de los principios de conservación siguió la segunda opción que se mostró de una gran fertilidad en el establecimiento de nuevas predicciones, que la experiencia había de verificar plenamente. Así, para que se cumpla la conservación de la cantidad de movimiento, la masa de un cuerpo ha de variar con la velocidad según:

$$m = m_0 / (1 - (v/c)^2)^{-1/2}$$

en donde  $m_0$  es la masa medida por un observador respecto al cual la partícula esta en reposo.

A.11. Representar la gráfica  $m = f(v)$ , de acuerdo con: a) la Física clásica y b) la Física relativista. (Datos:  $v = 0.1c, 0.2c, 0.4c, 0.6c$  y  $0.8c$ ;  $m_0 = 1 \text{ kg}$ ).

A.12. Indicar cuando puede considerarse prácticamente constante

la masa de un cuerpo tal como supone la Mecánica clásica.

El aumento de la masa con la velocidad se ha comprobado experimentalmente en los aceleradores de partículas elementales, donde se han encontrado hechos como el que se muestra en la siguiente actividad.

A.13. Supóngase un electrón de masa  $m = 9.11 \cdot 10^{-31}$  kg que se mueve a una velocidad  $v = 0.8c$ . a) ¿Cuál será su masa para un observador en reposo respecto a él? b) ¿Y para un observador con su misma velocidad?

-----  
Comentarios A.11 a A.13. Las actividades anteriores muestran como la masa del cuerpo va creciendo con la velocidad tendiendo a infinito cuando  $v$  tiende a  $c$ . El profesor mostrará como esto es una nueva evidencia del carácter límite de la velocidad de la luz. Si los alumnos perciben en la A.11 que para velocidades  $v$  iguales o menores que  $0.2$  la masa es practicamente constante, la A.12 será reiterativa.

-----  
La relación  $m = m_0 / (1 - (v/c)^2)^{-1/2}$  puede considerarse, desde otro punto de vista, como una variación de la masa que tiene lugar al comunicar energía cinética al cuerpo. Einstein propuso que hay en general una relación de equivalencia entre masa y energía. Con palabras del propio Einstein: "La masa de un sistema de cuerpos puede considerarse precisamente como una medida de su energía. La ley de conservación de la masa de un sistema equivale a la ley de conservación de la energía."

Por tanto, si  $E$  es la energía total del sistema, podremos escribir "la probablemente más famosa ecuación de la Física" (Resnick 1976)

$$E = mc^2 \text{ o tambien } E = m_0c^2 / (1 - (v/c)^2)^{-1/2}$$

expresión que denota la existencia de energía incluso para  $v = 0$ , lo que nos lleva a concluir que la masa en reposo esta relacionada con una energía en reposo

$$E_0 = m_0c^2$$

Dado el elevado valor del coeficiente  $c^2$  aparece así una nueva posibilidad de liberación de grandes cantidades de energía consistente en aprovechar reacciones con "defecto de masa", tales como la fisión o la fusión.

A.14. Calcular la energía que podría liberarse si se desintegrará 1 g de materia. Comparar dicha cantidad con la que se libera al quemar 1 g de petróleo (poder calorífico aproximado 10.3 kcal/g)

-----  
Comentarios A.14. Es preciso que el profesor salga aquí al paso de una confusión muy extendida consistente en concebir la relación  $E = mc^2$  como expresión de una posible conversión o transformación de masa en energía ("desmaterialización") y viceversa. Como señala Warren (1976):

"La falsedad más común en la relación de Einstein es inferir que la masa puede convertirse en energía y viceversa: 'En ciertos procesos la masa puede ser convertida en una cantidad equivalente de energía'. Se puede asumir que los autores quieren decir que inicialmente se tiene una cantidad de masa y no de energía. Entonces la reacción cede energía y pierde masa. Esta idea es absolutamente contraria al principio de Einstein. De acuerdo con Einstein, si comenzamos con una masa  $m$ , esta tiene un contenido de energía  $E = mc^2$ . Si esta energía es cambiada a alguna otra forma existe todavía la misma cantidad de energía  $E$  la cual tiene la misma masa  $m$ ."

En resumen, la masa final es idéntica a la de partida y lo mismo sucede con la energía, por lo que ambas leyes de conservación son equivalentes (Lehrman 1982).

-----

## 2. ORIGENES DE LA FISICA CUANTICA

La crisis de la Física clásica a comienzos del siglo XX está relacionada con la imposibilidad de detectar un sistema de referencia en reposo absoluto -a la que nos hemos referido en el capítulo anterior- y con problemas relacionados con la emisión y absorción de ondas electromagnéticas y que, de forma coincidente, iban también a exigir un cambio profundo en dichas concepciones clásicas.

Dichos problemas son: el efecto fotoeléctrico -liberación de electrones por superficies iluminadas- y los espectros discontinuos de los gases. Es preciso referirnos a un tercer problema -aunque su mayor complejidad no recomienda su estudio a este nivel-, el relativo a la interpretación de los espectros continuos emitidos por sólidos y líquidos incandescentes.

De acuerdo con ello desarrollaremos el tema según el siguiente hilo conductor:

2.1. Crisis de la teoría clásica de la radiación: Efecto fotoeléctrico.

2.2. Una hipótesis radical: El fotón.

2.3. Algunos éxitos del modelo de fotón.

2.3.1. Espectros discontinuos y estructura atómica.

2.3.2. El efecto Compton.

### 2.1. CRISIS DE LA TEORIA CLASICA DE LA RADIACION: EL EFECTO FOTOELECTRICO.

En 1886 y 1887 H. Hertz llevó a cabo los experimentos que por primera vez confirmaron la existencia de las ondas electromagnéticas predichas por la teoría electromagnética de Maxwell. En el curso de estos experimentos Hertz descubrió que ocurre más fácilmente una descarga eléctrica entre dos electrodos cuando llega luz a uno de ellos.

A.1. A título de hipótesis tratar de dar alguna explicación del fenómeno observado por Hertz, es decir, del hecho de que cuando

se ilumine el electrodo se produzca más fácilmente la descarga.

-----

Comentarios A.1. Los alumnos señalan que la luz facilita la descarga al hacer que se emitan electrones de la superficie del cátodo. Esto es debido a que los electrones adquieren energía cinética al recibir la energía transferida por la onda luminosa.

-----

Conviene ahora operativizar las ideas expuestas en la actividad anterior.

A.2. Partiendo de la teoría de Maxwell que concibe la luz como una onda electromagnética -que como tal onda, distribuirá uniformemente su energía-, considerar a título de hipótesis la influencia de la frecuencia y de la intensidad luminosa sobre la emisión de electrones (la cantidad de electrones emitidos por segundo, su energía cinética, el tiempo que tardaran en ser emitidos...). Ver también el efecto de cambiar de metal.

-----

Comentarios A.2. El objetivo de esta actividad es que los alumnos hagan predicciones sobre lo que debería suceder en el efecto fotoeléctrico de acuerdo con la Física clásica, para que posteriormente lo contrasten con lo que realmente sucede. El profesor completará las predicciones de la Física clásica indicando lo siguiente: a) La energía cinética de los electrones liberados dependerá de la intensidad de onda y de la frecuencia, b) existirá un tiempo de retardo entre el choque de la luz sobre la superficie y la emisión del electrón porque como la energía de la luz está distribuida uniformemente en el frente de onda, es necesario un intervalo de tiempo -menor cuanto más intensa sea la onda- durante el cual el electrón está absorbiendo energía de la luz hasta que acumula la suficiente para escapar y c) para un metal dado, el efecto fotoeléctrico debe ocurrir para cualquier frecuencia de la luz, con la única condición de que la luz sea lo bastante intensa para proporcionar la energía necesaria para expulsar los electrones. (Resnick 1976, Messiah 1973 y Galindo y Pascual 1978).

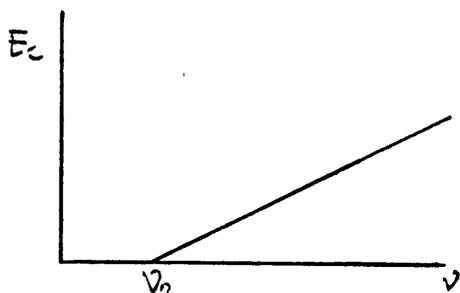
-----

Veamos a continuación que los resultados experimentales contradicen las hipótesis emitidas en la actividad anterior. Básicamente estos resultados pueden resumirse como sigue:

1. Para un metal dado, el efecto fotoeléctrico sólo se presenta por encima de una cierta frecuencia umbral  $\nu_0$ , sea cual sea la intensidad luminosa.

2. Si la frecuencia  $\nu$  se mantiene constante por encima de un valor mínimo  $\nu_0$ , el número de electrones crece con la intensidad luminosa, pero no ocurre así con la energía cinética de dichos electrones que se mantiene constante.

3. La energía cinética de los electrones crece linealmente con la frecuencia  $\nu$  a partir de un valor umbral  $\nu_0$ , característico de cada metal de acuerdo con la figura



4. La emisión de electrones es prácticamente instantánea.

A.3. Analizar los resultados experimentales anteriores viendo cuales contradicen la teoría clásica de la radiación como onda electromagnética que se distribuye uniformemente por el espacio. Extraer conclusiones sobre la naturaleza de la luz.

-----

Comentarios A.3. Esta actividad es crucial para los alumnos porque al contrastar las hipótesis de la actividad anterior, basadas en la Física clásica, con los resultados experimentales se dan cuenta de que no los pueden explicar. Así, de acuerdo con la Física clásica, el efecto fotoeléctrico debe ocurrir a cualquier frecuencia de la luz, con la única condición de que la luz sea lo bastante intensa para proporcionar la energía necesaria para expulsar los electrones, lo que contradice el primer resultado. Por otra parte la energía cinética de los electrones debe aumentar al hacerse más intenso el haz de luz, en contra del segundo y tercer resultados. Para finalizar, la emisión instantánea no se puede reconciliar,

como se ha visto, con la idea de onda que se distribuye uniformemente por el espacio.

-----

## 2.2. UNA HIPOTESIS RADICAL: EL FOTON.

A.4. Sugerir alguna nueva hipótesis sobre el comportamiento de la luz capaz de interpretar los resultados experimentales relativos al efecto fotoeléctrico. En particular se trata de explicar con dicha hipótesis:

1. Por qué dicho efecto sólo se presenta para frecuencias de la luz superiores a un valor umbral, distinto para cada metal.
2. Por qué la energía cinética de los electrones liberados es siempre la misma para una frecuencia  $\nu$  dada, sea cual sea la intensidad luminosa.
3. Por qué la emisión de electrones es prácticamente instantánea.

-----

Comentarios A.4. El objetivo de esta actividad es lograr que los alumnos vean la necesidad de considerar las ondas electromagnéticas como una distribución de "paquetes de energía" o cuantos -posteriormente fotones- cada uno de los cuales posee una energía proporcional a la frecuencia y muestren como esta hipótesis explica cualitativamente los resultados experimentales. El profesor señalará que la energía del fotón es  $E = h\nu$ , en donde  $h$  es una constante denominada constante de Planck, ya que fue este físico quien la introdujo en 1900 al explicar los espectros continuos de sólidos y líquidos incandescentes, tema que por su complejidad no se aborda en este nivel.

-----

A.5. Siendo  $\nu$  la frecuencia de la radiación (superior a la frecuencia umbral  $\nu_0$  necesaria para que se presente el efecto fotoeléctrico), escribir de acuerdo con la hipótesis anterior una ecuación que ligue la energía del fotón incidente con la energía cinética del electrón liberado.

-----

Comentarios A.5. Pretende llevar a los alumnos a la ecuación fotoeléctrica de Einstein, deducida en 1905

$$h\nu = W + mv^2/2$$

en la que  $h\nu$  representa la energía del fotón incidente,  $W$  el trabajo de extracción y  $mv^2/2$  la energía cinética del electrón liberado.

El profesor puede completar la actividad con una descripción de la experiencia de Millikan.

-----

La hipótesis de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico fue confirmada en 1915 por el físico americano R.A. Millikan, cuyos experimentos posibilitaron uno de los procedimientos para determinar la constante de Planck  $h$ .

### 2.3. ALGUNOS EXITOS DEL MODELO DE FOTON.

No vamos a tratar aquí las aplicaciones prácticas, de enorme interés, del efecto fotoeléctrico, sino a la explicación y predicción de nuevos hechos que ilustran la validez de la teoría del fotón. Nos referiremos en particular, aunque muy brevemente, a los espectros discontinuos de los átomos y al llamado efecto Compton.

#### 2.3.1. Espectros discontinuos y estructura atómica.

Como ya es conocido, los modelos atómicos basados en la Física clásica (Thomson, Rutherford...) eran incapaces de explicar algunos de los fenómenos observados. Así el modelo de Thomson (1904) era incapaz de dar cuenta de la dispersión de partículas alfa por una fina lámina de Au (Geiger y Mardsen 1909) y el modelo de Rutherford (1911) si bien explicaba lo anterior, era inconsistente con la teoría electromagnética clásica, ya que según esta, un electrón girando alrededor del núcleo debe estar emitiendo energía continuamente en forma de ondas electromagnéticas, lo cual le llevaría a caer muy rápidamente sobre el núcleo en contradicción con la evidente estabilidad de los átomos. Además, ambos modelos eran incapaces de explicar el carácter discontinuo y característico de los espectros luminosos.

Para poder explicar dichos espectros Bohr en 1913 aplicó la nueva teoría cuántica de la radiación, es decir, la idea de fotones, al modelo nuclear de Rutherford.

A.6.Exposición por el profesor de los postulados de Bohr.

-----  
Comentarios A.6. Es conveniente explicitar todas las hipótesis de Bohr siguiendo, por ejemplo, a Eisberg (1974):

"1. En el átomo, un electrón se mueve en una órbita circular alrededor del núcleo (...) obedeciendo las leyes de la Física clásica.

2. Pero de la infinidad de órbitas que permite la Física clásica el electrón solo puede moverse en las que el momento angular orbital es  $mvr = nh/2\pi$ .

3. El electrón (...) se mueve en una órbita permitida sin radiar energía electromagnética. Así su energía total E permanece constante.

4. La emisión o absorción de energía radiante se realiza cuando el electrón pasa de una órbita a otra (...) La frecuencia de la radiación emitida es igual a la diferencia de energía entre ambas  $E_1 - E_2 = h\nu$ ."

Eisberg muestra claramente como Bohr "mezcla ideas clásicas y cuánticas", introduciendo hipótesis "ad hoc" para evitar los problemas planteados y como introduce la cuantificación tanto de la energía E como del momento angular L para los estados del electrón: el electrón solo puede estar en estados con la energía E y el momento angular L bien definidos.

-----  
Las hipótesis de Bohr aplicadas al átomo de hidrogeno posibilitaron el cálculo de las órbitas permitidas y de las energías correspondientes a las mismas para deducir por último la expresión de la longitud de onda de la radiación emitida al pasar de una órbita a otra y ver si esta de acuerdo con la fórmula empírica de Rydberg-Ritz. Abordaremos cualitativamente dicho problema en la actividad siguiente.

A.7. Utilizando las ideas de Bohr justificar los espectros de absorción y emisión.

-----  
Comentarios A.7. Los alumnos razonan que al hacer incidir luz los electrones sólo podrán absorber los fotones de energías iguales a las correspondientes a la transición de un nivel a otro superior y sólo emitirán cuando "caigan"

de dicho nivel a otro inferior.

El profesor señalara que la energía calculada por Bohr para el átomo de hidrógeno es  $E = -k/n^2$ , siendo n el número cuántico principal, que toma los valores de la serie de los números enteros y k una constante, en perfecta concordancia con los datos experimentales.

-----

Bohr pudo justificar así los espectros de emisión y de absorción para el elemento mas sencillo, el hidrógeno.

A.8. Exposición por el profesor de los éxitos y límites del modelo de Bohr.

-----

Comentarios A.8. El profesor mencionará como el modelo de Bohr pudo explicar los espectros de absorción y emisión del hidrógeno (las distintas series espectrales) y, sobre todo, superar -mediante el concepto de estados estacionarios de energía- el carácter autodestructivo del modelo de Rutherford. Sin embargo, a pesar de sus éxitos, pronto surgieron dificultades que obligaron a modificarlo (modelo de Sommerfeld) y finalmente a sustituirlo por otro, producto del establecimiento de la mecánica cuántica que supuso un cambio radical de los conceptos físicos. Entre las deficiencias del modelo de Bohr mencionaremos: no explicaba los espectros de los átomos polielectrónicos e, incluso, el espectro del hidrógeno, al utilizar espectroscopios más potentes o al aplicarle campos eléctricos o magnéticos, resultaba ser más complicado de lo previsto en la teoría (aparecían desdoblamientos de las rayas espectrales; tampoco explicaba la mayor intensidad de unas rayas sobre otras, la anchura de las rayas, la existencia de direcciones privilegiadas en los enlaces atómicos, etc).

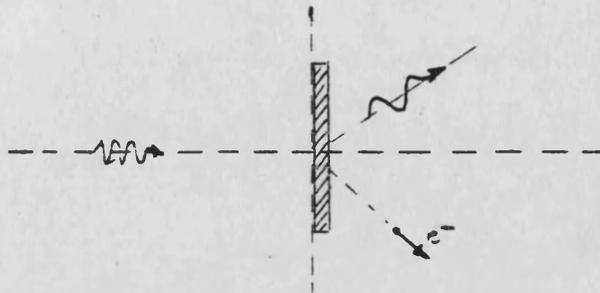
-----

### 2.3.2. El efecto Compton

El efecto Compton -denominado así por haber sido descubierto en 1923 por el físico americano A.H. Compton- consiste en el hecho de que las ondas electromagnéticas de frecuencia v elevada (por ejemplo, rayos X) que inciden sobre un obstaculo (por ejemplo, una fina lámina de calcita) son difundidas, además de con su propia

frecuencia  $\nu$ , con una frecuencia  $\nu'$  menor que la incidente. Por otra parte, de la calcita surgen algunos electrones libres, tal como se esquematiza en la figura.

Esto resulta sorprendente desde el punto de vista clásico porque según la teoría ondulatoria clásica la frecuencia de las ondas difundidas debe ser igual a la de las ondas incidentes.



A.9. Dar una interpretación cualitativa de dicho fenómeno y, en particular del hecho que la frecuencia difundida  $\nu'$  sea menor que la incidente  $\nu$ . ¿Qué conclusión extraemos respecto a la naturaleza de la luz?

-----

Comentarios A.9. Esta actividad conduce al alumno a interpretar el efecto Compton como una colisión de los fotones con los electrones, a los que transfieren parte de su energía por lo que pasan a tener una energía menor, es decir, una frecuencia menor. El profesor deberá completar señalando que estos electrones, al contrario que en el efecto fotoeléctrico, tienen una energía de enlace menor que la del foton, es decir, son prácticamente libres (Harvard 1970).

-----

### 3. EL ESTABLECIMIENTO DE LA FÍSICA CUÁNTICA

En el módulo anterior (Orígenes de la Física cuántica) hemos abordado algunos de los problemas que originaron la crisis de la Física clásica, marcando sus límites de validez, y pusieron en evidencia la necesidad de profundos cambios en ella.

Y aunque los primeros cambios aparecen históricamente como retoques, es decir, como hipótesis parciales que rectificaron el edificio teórico existente, pronto se vio la necesidad de un replanteamiento global, elaborándose un nuevo marco conceptual de la Física.

Este nuevo marco que ha llegado a sustituir a la Física clásica constituye lo que conocemos como Física cuántica cuyo establecimiento se inicia en cierto modo en 1924 con los trabajos del científico francés Luis De Broglie.

Desarrollaremos este tema de acuerdo con el siguiente índice:

3.1. Hipótesis de De Broglie. Contrastación experimental.

3.2. Conceptos fundamentales de la Mecánica cuántica.

3.2.1. Relaciones de indeterminación de Heisenberg.

3.2.2. La función de onda y la ecuación de Schrodinger.

3.3. La nueva imagen del comportamiento de la materia.

3.4. Actividades de recapitulación.

#### 3.1. HIPOTESIS DE DE BROGLIE. CONTRASTACION EXPERIMENTAL.

Aunque los trabajos de Planck, Einstein, Bohr y otros habían confirmado de manera rotunda la naturaleza cuántica, discontinua de la luz y de los sistemas atómicos, dichos trabajos sólo pudieron ser considerados como los orígenes de la nueva concepción de la materia que habría de sustituir a las teorías clásicas.

En efecto, podemos considerar que el establecimiento de la Física cuántica se inicia, como ya hemos dicho, en 1924 con los

trabajos de Luis De Broglie, en los que introduce una nueva y atrevida hipótesis consistente en atribuir a los electrones -y, en general, a cualquier objeto- un comportamiento ondulatorio, además de su evidente comportamiento corpuscular.

A.1. Indicar posibles argumentos en apoyo de la hipótesis de De Broglie.

-----  
Comentarios A.1. Los alumnos se refieren habitualmente a que los trabajos de Einstein, Compton, etc, habían mostrado que la luz poseía conjuntamente con sus evidentes propiedades ondulatorias, propiedades típicamente corpusculares; y si existen objetos materiales -los fotones- con esta doble característica ondulatorio-corpúscular, ¿por qué no concebir la posibilidad de que esto mismo se de en cualquier objeto material?.

El profesor puede plantear, para completar las consideraciones de los alumnos, cómo el carácter cuantizado de las órbitas electrónicas en el interior del átomo parece relacionarse con el único fenómeno de la Física clásica en el que aparecen valores discretos: las ondas estacionarias que se forman en un medio confinado.

-----  
De Broglie no se limitó, por supuesto, a enunciar una simple hipótesis cualitativa sino que trató de relacionar las magnitudes características del aspecto ondulatorio -la frecuencia o la longitud de onda- con las del corpuscular -la cantidad de movimiento-. Para obtener la expresión de De Broglie podemos seguir el siguiente camino: establecer la relación entre la longitud de onda y la cantidad de movimiento para los fotones, generalizando después el resultado para todos los objetos materiales.

A.2. Teniendo en cuenta que la energía de un fotón, según la hipótesis de Planck puede escribirse como  $E = h\nu$ , y según la Relatividad ha de ser  $E = mc^2$  establecer la relación existente entre la longitud de onda de un electrón y su cantidad de movimiento.

-----  
Comentarios A.2. Sustituyendo  $\nu$  por su valor en función de la longitud de onda resulta  $hc/\lambda = mc^2$ , de donde  $\lambda = h/mc$ , siendo  $mc$  la cantidad de movimiento del fotón. Generalizando la expresión anterior para cualquier partícula obtendremos  $\lambda = h/p$ . Este procedimiento para

introducir la ecuación de De Broglie es poco riguroso, pero resulta accesible a los alumnos.

-----

A.3. Calcular la longitud de onda de los siguientes cuerpos, comparandola con la de los rayos X (del orden de  $10^{-10}$  m:

a) La Tierra en su rotación alrededor del Sol ( $m = 6 \times 10^{24}$  kg y  $v = 3 \times 10^4$  m/s)

b) Un guijarro de 10 g lanzado a 1m/s.

c) Un electrón que sometido a un campo electrico ha adquirido la velocidad de  $6 \times 10^5$  m/s ( $m = 9.1 \times 10^{-31}$  kg)

-----

Comentarios A.3. Tiene interes calcular la longitud de onda predicha por la hipótesis de De Broglie para un electrón, viendo que resulta, en nuestra actividad del orden de  $10^{-9}$  m, comparable a la de los rayos X, pudiendose, pues, pensar en la posibilidad de detectar su existencia. Por el contrario, la longitud de onda de los objetos macroscópicos es tan pequeña (del orden de  $10^{-43}$  m para la Tierra y de  $10^{-32}$  m para el guijarro) que es impensable detectarla, lo que justifica el hecho de que dichos objetos no muestren comportamiento ondulatorio.

-----

Como muestra la actividad anterior, la longitud de onda correspondiente al movimiento de los objetos macroscópicos (incluso los mas diminutos) es tan pequeña que no puede producir efectos perceptibles. En cambio el valor predicho para la longitud de onda de un electrón que se mueva a velocidades moderadas resulta comparable a la de los rayos X, y cabe pues, pensar en la posibilidad de detectar la existencia de dichas ondas.

A.4. ¿A qué fenómenos convendría recurrir para poner en evidencia el comportamiento ondulatorio de los electrones? Describir detalladamente el posible experimento, prestando atención a las dificultades previsibles.

-----

Comentarios A.4. Los alumnos pueden señalar que conviene recurrir a un fenómeno típicamente ondulatorio, como es la difracción y también que para que se produzca esta es necesario encontrar obstáculos de dimensiones próximas a la longitud de onda del electrón. Seguidamente el profesor expondrá que esto era un problema análogo al que plantearon los rayos X en 1912 y la solución de Von Laue

fué recurrir a redes cristalinas. Sin embargo, los electrones plantean dificultades, dado que no pueden atravesar tan fácilmente un cristal como una radiación electromagnética. Por ello es necesario estudiar los electrones reflejados en superficies cristalinas o los transmitidos por hojas extremadamente finas. Tres años después, utilizando dichas técnicas, Davisson y Germer y Thomson obtuvieron diagramas que mostraban con toda evidencia la difracción de electrones. El profesor las presentará a los alumnos -mediante láminas, diapositivas, etc-, comparándolas con las figuras de difracción obtenidas con rayos X.

-----

Los experimentos de Davisson y Germer y Thomson en 1927 verificaron la hipótesis de De Broglie, ya que los cálculos realizados a partir de las figuras de difracción obtenidas proporcionaban valores de la longitud de ondas que correspondían con los predichos por la relación de De Broglie.

A.5. ¿Cómo se puede interpretar el comportamiento ondulatorio de objetos como los electrones? ¿En que pueden consistir dichas ondas?

-----

Comentarios A.5. Esta actividad es crucial en el planteamiento de este programa-guía. Pretende que los alumnos expongan sus ideas previas (por cursos anteriores o por los diversos medios de divulgación) para ver si alguna de ellas coincide con los errores que se cometieron durante la génesis de estos conceptos, lo que da pie a que el profesor exponga las diferentes interpretaciones:

1. La idea del propio De Broglie de "onda asociada", guía o piloto de la partícula, con una relación entre ellas similar a la existente entre las planchas de "surf" y las olas que las arrastran. Ahora bien, la imposibilidad de explicar la indisoluble unidad entre la onda y la partícula o como es engendrada llevaron al propio De Broglie a sustituir dicha interpretación por otra que mencionaremos en el punto siguiente.

Por ello, hablar de "ondas asociadas" es una mala terminología, porque "da la impresión de que hubiera un corpúsculo clásico moviéndose junto con una onda", cuando en realidad, como veremos, "la onda de De Broglie y la partícula son la misma cosa, no hay nada más. La partícula real (...) tiene propiedades ondulatorias y esto es un hecho" (Wichman 1972).

2. El nuevo error, que vino a sustituir al anterior, fue

reducir el aspecto corpuscular a un efecto puramente ondulatorio, considerando al electrón como un "paquete de ondas" -es conveniente que el profesor dibuje uno en la pizarra-. Sin embargo fue preciso abandonar esta idea porque los cálculos mostraban que un paquete de ondas, por muy compacto que sea, se difunde rápidamente por el espacio, desapareciendo cualquier posible comportamiento corpuscular (Eisberg 1974).

3. Otra forma de interpretar el comportamiento ondulatorio sería suponer que los electrones son simples corpúsculos y que el comportamiento ondulatorio aparece debido al gran número de ellos. Según esto, la difracción observada al hacer pasar los electrones por una fina lámina metálica no debería presentarse al trabajar con un número reducido de ellos. Sin embargo, la experiencia muestra que si se prolonga la exposición suficiente tiempo, un débil haz de electrones produce el mismo efecto, lo que prueba que la difracción y, por tanto, el carácter ondulatorio es consustancial a cada electrón individual y no es un efecto de la presencia de gran número de ellos (Messiah 1973).

Es decir, todos los intentos de reducir la complejidad onda/ corpúsculo a un sólo efecto fracasaron y necesitamos una nueva interpretación que, según Feynman (1971 b), podemos expresar así:

"Newton pensaba que la luz estaba compuesta de partículas, pero luego se descubrió que esta se comporta como una onda. Más tarde sin embargo (a principios del siglo XX) se descubrió que la luz algunas veces se comporta verdaderamente como una partícula. Históricamente, por ejemplo, se creía que el electrón se comportaba como una partícula pero luego se pensó que en algunos aspectos lo hacía como una onda. Pero, en realidad, este no se comporta como ninguna de ellas. Renunciando diremos: ¡No es como ninguna de las dos!

Sin embargo podemos decir algo más: Los electrones se comportan exactamente como la luz. El comportamiento cuántico de los objetos atómicos (electrones, protones, neutrones, fotones, etc) es el mismo para todos ellos. Todos son 'ondas de partículas' o como quieran llamarlas. De este modo, todo lo que aprendemos de las propiedades de los electrones (...) se lo aplicaremos también a todas las 'partículas' incluyendo los fotones de luz."

En resumen, "los electrones o los fotones, por ejemplo, no son ni pequeñas bolas (partículas) ni pequeñas olas (ondas) y deben ser absolutamente concebidos como objetos de tipo nuevo, los cuantones." (Levy-Leblond 1984). Por tanto, un cuantón no es ni una partícula clásica ni un campo clásico, que sólo son modelos aproximados que describen el comportamiento de un gran número de cuantones, aunque en circunstancias extremas se asemejen a

una partícula y en otras a un campo (Bunge 1978).

Las implicaciones de esto se desarrollarán en el siguiente apartado.

-----

### 3.2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

La hipótesis de De Broglie al establecer una relación entre el aspecto corpuscular y el ondulatorio para todos los objetos físicos, venía al mismo tiempo a invalidar las leyes clásicas de descripción del movimiento y exigía nuevos conceptos y nuevos principios, es decir, una nueva Mecánica, que incluyera la clásica como caso particular.

Esta teoría fue introducida en 1925 y sus fundamentos fueron desarrollados con gran rapidez durante los siguientes cuatro años por físicos como Heisenberg, Schrodinger, Dirac, Born y otros.

#### 3.2.1. Relaciones de indeterminación de Heisenberg

Como ya hemos visto, la Mecánica clásica permite, si conocemos la ecuación de movimiento  $\vec{r} = \vec{r}(t)$  y el estado del sistema en un instante dado, es decir, las condiciones iniciales, determinar el estado 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.

A.6. Mostrar a partir del carácter ondulatorio del electrón que no es posible determinar simultáneamente su posición  $\vec{r}$  y su cantidad de movimiento  $\vec{p}$  en cualquier instante, es decir, su movimiento a lo largo de una trayectoria.

-----

Comentarios A.6 Esta actividad pretende conducir al alumno a asociar, cualitativamente, el carácter ondulatorio del electrón a una cierta deslocalización que impide situar al electrón en un punto determinado e introduce, por tanto, una cierta indeterminación en el movimiento que puede seguir el electrón, por lo cual este carecerá de una trayectoria absolutamente determinada.

Entre los diversos posibles procedimientos para introducir la indeterminación de Heisenberg hemos utilizado este porque como señala Wichman (1972) "la idea de que, en general, no es posible atribuir una posición precisa a una partícula (en un instante dado) se sigue de modo natural conforme hemos visto, de la imagen en que se basa el modelo ondulatorio".

-----

A.7.Exposición por el profesor de las relaciones de indeterminación cuánticas y sus implicaciones.

-----

Comentarios A.7.En el razonamiento cualitativo anterior puede no quedar 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" (Wichman 1972). Por ello el profesor subrayará la imposibilidad de determinar simultáneamente con precisión absoluta la posición  $x$  y la cantidad de movimiento  $p$  del electrón, señalando que los límites de dicha precisión vienen dados por las relaciones de indeterminación de Heisenberg:

$$\Delta x \Delta p > h/2\pi$$

siendo  $\Delta x$  y  $\Delta p$  las imprecisiones de la posición y la cantidad de movimiento.

A continuación el profesor indicará que si el principio de incertidumbre establece límites a la precisión con que puede determinarse la posición y la velocidad de un objeto, cabe suponer que dicha imprecisión reaparecerá en la determinación de otras magnitudes cuyo producto tenga las mismas dimensiones que  $h$ , como por ejemplo, la energía y el tiempo. Efectivamente, Heisenberg estableció también que:

$$\Delta E \Delta t > h/2\pi$$

donde  $\Delta t$  no es una imprecisión sino un intervalo característico de la evolución del sistema (por ejemplo, la vida media de un estado) (Messiah 1973, Galindo y Pascual 1978).

El profesor puede aquí, o después de la siguiente actividad, el mismo o los alumnos, resumir brevemente las implicaciones de las relaciones de indeterminación, es decir:

- 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 (aspecto este que se completa en la siguiente actividad).

-----

A continuación proponemos la aplicación de las relaciones de indeterminación al mundo de los objetos macroscópicos y microscópicos, lo que nos permitirá comprobar como en el primer caso no se introducen modificaciones prácticas respecto a las predicciones de la Física clásica.

A.8. Considerar un grano de polvo (de  $10^{-6}$  m de diametro) que pese  $10^{-6}$  kg y avance a una velocidad de  $(1.00 \pm 0.01)$  m/s. ¿Cuál será la indeterminación en la posición?. Determinar igualmente la imprecisión en la posición de un electrón (cuyo tamaño convencional se puede considerar  $10^{-16}$  m) que avance con la misma velocidad. ¿Que importancia tendrá dicha imprecisión respecto al tamaño de ambos? (Dato:  $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$  kg)

-----

Comentarios A.8. Este ejercicio nos muestra que la indeterminación para los objetos macroscópicos ( $\Delta x = 10^{-25}$  m) es absolutamente despreciable frente al tamaño del objeto, al contrario de lo que sucede en los microscópicos, para el electron  $\Delta x = 0.1$  m, que es billones de veces superior al tamaño atribuido experimentalmente (F. Martin 1982). Por ello, el principio de indeterminación no juega ningun papel en las medidas de posición y velocidad a menos que se trate de objetos microscópicos.

La razón de esto es la pequeñez de  $h$ , que hace que los resultados del principio de indeterminación queden fuera de los límites de nuestras experiencias ordinarias, analogamente a como la pequeñez de  $v/c$  deja a la relatividad fuera de nuestras experiencias ordinarias (Resnick 1976, Harvard 1970).

Por ello, "las relaciones de indeterminación establecen los límites más allá de los cuales no se pueden aplicar los conceptos de la Física clásica" (Wichman 1972).

-----

A.9. Comentar las siguientes proposiciones señalando hasta que punto pueden considerarse correctas o incorrectas:

1. La indeterminación puede considerarse fruto de la imprecisión de los instrumentos y técnicas de medida utilizados y sólo es subsanable en la medida en que dichos instrumentos y técnicas se perfeccionan.

2. La indeterminación es consecuencia del mismo proceso de medida que, como toda interacción, perturba aquello que se observa (así para ver a un electrón hay que iluminarlo y al hacerlo se le comunica energía alterando su estado y modificando su posición). Según ello la indeterminación aparece indisociablemente unida a la observación.

3. La indeterminación hace referencia a la propia naturaleza de la materia, que no se presenta en forma de objetos con contornos absolutamente definidos, que siguen trayectorias perfectamente determinadas.

-----

Comentarios A.9. Esta actividad permite salir al paso del error, cometido durante la génesis de estos conceptos, de atribuir la indeterminación a faltas de precisión de los instrumentos de observación (como señala la primera frase de la actividad). En cuanto a la segunda proposición muestra como la relación de indeterminación ha contribuido a clarificar el hecho de que el proceso de medida es una interacción que modifica aquello que se observa, perturbación que también se verifica en Física clásica -recordemos, por ejemplo, el efecto de un termómetro en un sistema pequeño-, pero introduce el error de unir indisociablemente la indeterminación a la propia observación induciendo así a pensar que cuando no se está observando desaparecería la indeterminación. Se olvida así que la indeterminación tiene un origen mucho más profundo que hace referencia, como señala la tercera frase, a la propia naturaleza de la materia, a su carácter dual. Por otra parte esto hace referencia a la confusión, señalada por Bunge (1973, ver pag. 166-167 y 320-321), entre enunciados con significación objetiva y con significación empírica. Los primeros hacen referencia a objetos autónomos no perturbados por medición, como un átomo en estado estacionario (que no absorbe e irradia energía) o un fotón que viaja por un espacio vacío, en el cual ningún dispositivo puede detectarlo, absorbiéndolo. Los segundos a objetos en observación, medición o, en general, interacción con sistemas macroscópicos, como un haz de electrones que atraviesa un sistema de ranuras. Algunas interpretaciones de la teoría -las que, por ejemplo, atribuyen la indeterminación únicamente a la observación- intentan reducir esta a enunciados del segundo tipo, lo cual, si fuera verdad impediría la aplicación de la teoría cuántica a objetos como los mencionados en el primer tipo de enunciados o a la astrofísica.

-----

### 3.2.2. La función de ondas y la ecuación de Schrodinger

La crítica radical de los conceptos clásicos que realiza la Mecánica cuántica y de la que son expresión la ecuación de De Broglie o las relaciones de indeterminación de Heisemberg, exigen consecuentemente una modificación radical del formalismo matemático utilizado para describir el estado de un sistema y su evolución.

A.10. ¿Cómo podría describirse en Física clásica el estado de movimiento de una partícula? ¿Y el de una onda? Por el contrario, ¿Cómo podría describirse en Física cuántica el estado de, por ejemplo, un electrón?

-----

Comentarios A.10. Los alumnos indican que en la Mecánica clásica el estado de movimiento de una partícula en un instante determinado queda descrito por su posición  $\vec{r}$  y su velocidad  $\vec{v}$  (o cantidad de movimiento  $\vec{p}$ ) y, en cualquier instante, por su ecuación de movimiento  $\vec{r} = \vec{r}(t)$ .

Análogamente, el estado en un instante determinado de una onda viene dado por su amplitud  $E_0$ , su longitud de onda  $\lambda$  y su frecuencia  $\nu$  y, en cualquier instante, por su ecuación de onda  $E = E(\vec{r}, t)$ .

Esto da pie a que el profesor, apoyandose en los parrafos antes citados de Feynman, Levy-Leblond, señale que como los fotones, los electrones, etc, no son ni simplemente ondas ni simplemente partículas, "se necesita un modelo más general (...) para describir su comportamiento, aun cuando en situaciones extremas se pueda utilizar un simple modelo de onda o un simple modelo de partícula" (Resnick 1976).

Basándonos en estas ideas introducimos la función de ondas como un procedimiento para describir el estado de los objetos a escala atómica, distinto del procedimiento para describir el estado de las partículas clásicas (ecuación de movimiento) y de las ondas clásicas (ecuación de onda).

-----

Y dado que los electrones (o los protones, etc) no son ni simplemente ondas ni simplemente partículas es necesaria una nueva descripción del estado de un sistema cuántico. Para ello

Schrodinger introdujo una función de variable compleja  $\Psi$  a la que denominó función de ondas.

A.11. Breve introducción cualitativa por el profesor de la interpretación de la función de ondas y de la ecuación que permite calcularla.

-----  
Comentarios A.11. El profesor mencionara la interpretación probabilista de M. Born (1926), según la cual  $|\Psi|^2$  es "la probabilidad por unidad de volumen de encontrar al electrón allí (en un  $dV$ )" (Feynman 1971b) y su conexión con la dualidad y la indeterminación que, al impedir describir el estado del electrón en un instante determinado dando los valores de las coordenadas y las velocidades como en la Mecánica clásica, solo permiten predecir las probabilidades de los distintos valores que pueden obtenerse al medir las coordenadas -o la magnitud de que se trate-.

La ecuación de Schrodinger es una ecuación diferencial de segundo orden que, conocida la energía potencial, "debe resolverse para la función de onda desconocida  $\Psi$  y la energía total desconocida  $E$ . En general, hay diversas funciones posibles (correspondientes a valores propios de la energía) que son soluciones de esta ecuación" (Holton 1976).

Y estas soluciones deben cumplir en general que:  
Para valores de la energía  $E < 0$ , es decir, para estados ligados de la partícula, la ecuación de Schrodinger solo presenta soluciones distintas de cero para la función de ondas  $\Psi$  para determinados valores de la energía, haciéndose nula en los demás casos.

Por el contrario, para valores de energía  $E > 0$ , que corresponden a estados no ligados o libre, la ecuación de Schrodinger proporciona siempre una solución distinta de cero para la función de ondas  $\Psi$ , lo que significa que una partícula libre puede tomar cualquier valor de la energía (Messiah 1973).

-----  
Si aplicamos la ecuación de Schrodinger a un sistema ligado, como un electrón en un átomo, podemos extraer algunas consecuencias de las características generales de las soluciones.

A.12. Interpretar físicamente el hecho de que, en los estados ligados, la función de ondas sólo existe para ciertos valores

de la energía.

-----  
Comentarios A.12. Como ya hemos señalado, aparece la discontinuidad en los valores posibles de la energía que Bohr había obtenido. Pero estos niveles permitidos de energía surgen como consecuencia del carácter ondulatorio del electrón y no ligados a la supuesta existencia de órbitas electrónicas que carecen de sentido. En efecto, en vez de órbitas, la ecuación de ondas nos proporciona funciones de onda  $\Psi$ , que nos describen el estado de energía  $E$ , momento angular  $L$ , tercera componente del momento angular  $L_z$  y del spin  $S_z$  del electrón y cuyo módulo al cuadrado nos proporciona la probabilidad de encontrarlo en una determinada zona del espacio. Dichas funciones de estado son lo que se denomina habitualmente orbitales.  
-----

### 3.3.LA NUEVA IMAGEN DEL COMPORTAMIENTO DE LA MATERIA.

Para completar la imagen de la materia que la Física moderna proporciona hay que mencionar alguna de las nuevas ideas que fue necesario introducir para estudiar el complejo mundo de las partículas elementales -como los procesos de creación y aniquilación (con la idea de antimateria) o el concepto de interacción como intercambio de partículas-, que evidenciaron la necesidad de una síntesis de Relatividad y Cuántica para interpretar ciertos fenómenos. Dirac fue el primero que intentó dicha fusión porque la ecuación de Schrodinger no tenía en cuenta para nada los efectos relativistas de las elevadas velocidades del electrón en el átomo.

Un aspecto fundamental de la Física clásica, puesto en cuestión por la nueva Física, es la neta distinción entre corpúsculos y ondas electromagnéticas (designados a menudo respectivamente como materia y energía radiante).

A.13. Resumir los hechos y argumentos que la nueva Física introduce mostrando: a) El carácter corpuscular de la luz. b) El hundimiento de la barrera supuestamente existente entre corpúsculos y ondas.

Una de las implicaciones de mayor interés del "puente" establecido entre partículas y ondas fue la revisión del concepto de materia.

A.14. Enumerar las formas en que puede organizarse la materia. Indicar así mismo los posibles cambios entre ellas.

-----  
Comentarios A.13 y A.14. La primera de estas actividades es muy sencilla permitiendo que los alumnos hagan una recapitulación del efecto fotoeléctrico, el efecto Compton, la dualidad onda/corpusculo de De Broglie, etc y da paso a la segunda, en la que mencionan habitualmente los tres estados (sólido, líquido y gas) y, en algunos casos, el estado de plasma. Menos frecuente es que se hable de otras formas de organizarse la materia, como por ejemplo, el campo electromagnético. Es cierto que las partículas del campo electromagnético, los fotones, tienen una masa en reposo nula, pero a la velocidad de la luz, que es como realmente existen, tienen masa como prueba que el Sol pierda diariamente miles de millones de toneladas de materia a consecuencia de los fotones emitidos.

Por otra parte, en 1932 se descubrió la transformación de la materia ordinaria en campo y del campo en materia ordinaria (Ridnik 1978) en los procesos de "aniquilación" (en los que un positrón -antipartícula del electrón- interactúa con un electrón, desapareciendo ambas partículas y produciéndose fotones gamma) y "creación" (en los que desaparece un fotón, produciéndose un par electrón-positrón). Desde este punto de vista podemos interpretar estos procesos como cambios entre formas de organización de la materia.

-----  
Otro desarrollo de la Física moderna, que supuso en cierta medida el establecimiento de un nuevo "puente" entre partículas y ondas es el relativo a la interpretación del mecanismo de las interacciones.

A.15. Teniendo en cuenta los trabajos de Einstein, Compton, etc, sobre la luz, imaginar como dos cuerpos cargados interactúan. Comparar dicha idea de interacción con la clásica.

-----  
Comentarios A.15. Dado que dichos trabajos muestran que el campo electromagnético está constituido por fotones, esto

lleva a los alumnos a pensar que la interacción electromagnética entre dos partículas cargadas supone un intercambio de fotones, señalando que, por el contrario, clásicamente la interacción se describía mediante campos continuos.

El profesor completará esto explicando como en el siglo XIX los físicos, para evitar la idea newtoniana de interacción instantánea a distancia, introducen el concepto de campo que las masas o cargas crean a su alrededor. Si colocamos, por ejemplo, una carga  $q$  en un punto de un campo eléctrico, ésta interactúa con el campo en dicho punto, evitando así el problema de la distancia. Por otra parte si la carga  $Q$  que crea el campo cambia su estado de movimiento en un instante  $t$ , el campo en los puntos circundantes deberá cambiar también, pero con un tiempo de retardo  $t' = t + r/c$ , siendo  $r$  la distancia del punto a la carga  $Q$ , la que elimina el carácter instantáneo de la interacción newtoniana. (Halliday-Resnick 1982, Tipler 1978).

Además, es conveniente que el profesor haga referencia -sin entrar en detalles, en plan de divulgación- al creciente apoyo teórico y experimental a la concepción de la interacción como intercambio de los cuantos del campo (Lloret A. 1977). Así, podemos decir lo mismo de la interacción débil, cuyos cuantos, los bosones intermediarios han sido recientemente detectados. La interacción fuerte estaría asociada al intercambio de gluones entre los quarks y la gravitatoria al de gravitones que, sin duda debido a la debilidad de estas fuerzas no han podido aún ser puestos en evidencia.

Todo esto converge en la idea de que la interacción a distancia, sin sustrato material alguno debe, pues, ser desechada y dejar paso a la concepción del campo como una forma de existencia de la materia.

La otra idea que surge es que, así como la Física clásica distingue en la Naturaleza dos tipos de objetos, partículas y campos, caracterizadas las primeras por sus dimensiones definidas y por su movimiento en trayectorias exactamente determinadas y los segundos, por su carácter amorfo, fluido y sus movimientos ondulatorios, en la Física moderna estos contrarios pierden su carácter categórico, como muestran la dualidad de De Broglie, la transformación de la materia ordinaria en campo y del campo en materia ordinaria en los procesos de aniquilación  $e^+ + e^- = 2\gamma$  y creación  $\gamma = e^+ + e^-$  y los procesos de emisión y absorción de cuantos en las interacciones, que subraya el hecho de que las partículas y sus interacciones forman un todo inseparable.

Sin embargo, esta unidad no significa uniformidad

mecanicista. Así, las partículas materiales tienen masa en reposo y no pueden moverse con la velocidad de la luz (sin mencionar su carácter fermiónico) y los fotones, que no tienen masa en reposo, solo se pueden propagar con dicha velocidad (además de ser bosones como el resto de los cuantos de los campos).

-----

Para finalizar, otro aspecto de la Física clásica, superado por la moderna, es la concepción mecanicista de la materia, como resultado de la unión en proporciones variables de partículas "elementales" o "últimas". La búsqueda sistemática de dichas partículas ha conducido a mostrar niveles de comportamiento de la materia de extraordinaria complejidad y en definitiva a la crítica de la idea de últimas partículas realmente elementales.

A.16. Considerar posibles argumentos en contra de la existencia de partículas "elementales" si por tal se entiende a objetos perfectamente rígidos, sin partes ni estructura interna.

-----

Comentarios A.16. La Relatividad permite hacer una crítica del concepto de partícula elemental, partiendo del carácter límite de la velocidad de la luz. Este hecho es incompatible con el concepto de cuerpo rígido, absolutamente indeformable, lo que exigiría que todos sus puntos comenzaran a acelerarse simultáneamente en el momento en que aplicáramos una fuerza exterior sobre el mismo. Pero esto supondría que una señal -la acción de una fuerza exterior- se habría propagado con una velocidad mayor que la luz.

Por otra parte, la dualidad onda corpúsculo de la materia, en la que reside la causa profunda de la indeterminación cuántica, rompe con la idea de objetos perfectamente delimitados (bolas de billar microscópicas) que siguen trayectorias absolutamente definidas (Ridnik 1978, Capek 1973).

### 3.4. ACTIVIDADES DE RECAPITULACION

A modo de revisión se proponen las siguientes actividades.

A.16. Establecer las diferencias más notables entre la Física clásica y la Física moderna.

-----

Comentarios A.16. Se trata de que los alumnos resuman las diferencias entre ambas visiones del comportamiento de la materia. Entre las que dicen más habitualmente encontramos, brevemente, las siguientes:

1. Tiempo ( $t = t'$ ) y espacio absolutos ( $\Delta x = \Delta x'$ ) / Caracter relativo (dilatación de  $t$  y contracción de  $x$ ).
2. Masa constante de los cuerpos / Masa variable con la velocidad.
3. Conservación independiente de la masa y la energía / Equivalencia masa-energía (imposibilidad de la existencia de la una sin la otra).
4. Clásicamente las magnitudes energía  $E$  y momento angular  $L$  pueden tener cualquier valor / Caracter discreto de  $E$  y  $L$  en la cuántica.
5. Las cargas aceleradas, libres o ligadas, emiten radiación / Las cargas ligadas sólo emiten radiación en las transiciones de nivel energético.
6. Caracter continuo de la radiación electromagnética y discreto de las partículas clásicas / Carácter dual de los fotones y demás partículas.  
(Los alumnos mencionan el carácter corpuscular de la radiación y el ondulatorio de los electrones y demás partículas, por ello, es interesante que el profesor insista en la dualidad).
7. La imposibilidad -al contrario de lo que suponía la Mecánica clásica- de determinar simultáneamente con absoluta precisión, la posición y la velocidad de una partícula.
8. En consecuencia, no existen trayectorias definidas (por ejemplo, las órbitas de Bohr).
9. La idea de interacción como intercambio de partículas.
10. Los fenómenos de creación y aniquilación.  
Etc., etc.

-----

A.18. Establecer los límites de validez de la Física clásica, es decir, en que situaciones es aplicable como buena aproximación y en cuales no.

-----

Comentarios A.18. Los alumnos mencionan los siguientes:

1. El límite relativista: cuando las velocidades

involucradas son apreciablemente menores que la velocidad de la luz (aproximadamente cuando  $v$  es del orden de  $0.2c$ ) estamos en el dominio de la Física clásica. dado que  $(v/c)^2$  se hace muy pequeño.

2.El límite cuántico: cuando el producto de dos magnitudes conjugadas de un sistema físico toma un valor numérico superior a la constante de Planck estamos en el marco de la Física clásica (Wichman 1972).

-----

Digamos, por último, que la Física cuántica, junto con la Relatividad abrieron grandes posibilidades a nuevos desarrollos científicos y tecnológicos.

A.19. Enumerar, en conexión con los distintos niveles de organización de la materia, los desarrollos científicos y tecnológicos que puedan considerarse fruto de la nueva Física.

-----

Comentarios A.19. Esta actividad permite mostrar como la nueva física es capaz de explicar el conjunto de los fenómenos microscópicos, en particular, la estructura electrónica del átomo y el enlace químico (con lo cual, la Química moderna aparece como una aplicación de la Física cuántica), los sólidos y sus propiedades (conductividad, magnetismo..), la estructura del núcleo y el complejo mundo de las partículas elementales y, también, la evolución de las estrellas, las galaxias y el Universo (Astrofísica i Cosmología).

En cuanto a las aplicaciones mencionan las diversas de la Química moderna (nuevos materiales...), la electrónica, base de lo que se ha venido a denominar segunda revolución industrial, el laser, las de la Física nuclear (centrales, bombas, medicina nuclear...). (Acker 1985, Alonso y Finn 1971, Ducasse et al 1985, Leite-Lopes 1985, Levy-Leblond 1984, Schaeffer 1985, Tipler 1980).

## Capítulo 7.

### PRESENTACION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SEGUNDA HIPOTESIS

- 7.1. Presentación de los resultados obtenidos con los grupos experimentales
- 7.2. Análisis de los resultados obtenidos con los grupos experimentales

-----  
Cap 7. PRESENTACION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS  
GRUPOS EXPERIMENTALES  
-----

7.1. PRESENTACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS GRUPOS  
EXPERIMENTALES

Para contrastar la hipótesis de que es posible elaborar unos programas de introducción a la Física moderna tales que los grupos tratados con ellos (grupos experimentales) manifiesten diferencias significativas con respecto a los alumnos con el tratamiento habitual (grupos control), hemos utilizado como grupos experimentales:

-3 grupos de 2º de BUP con un total de 107 alumnos, para el nivel elemental, y un grupo de 3º y otro de COU con un total de 73, para el nivel superior, tratados por el propio autor de la tesis.

-Un grupo de 2º de BUP de 31 alumnos y otro de 3º de 38 alumnos, tratados por dos profesores de BUP del Seminario Permanente de Física y Química que habían participado en las discusiones para la elaboración de los programas -guía.

Lógicamente la elección de dichos grupos ha sido completamente aleatoria y no efectuada por nosotros, puesto que se trata de algunos de los grupos existentes en 3 Institutos de Bachillerato a lo largo de dos cursos académicos (1983-84 y 1984-85), en los que no se sigue ningún criterio basado en el mayor o menor rendimiento

académico de los alumnos a la hora de elaborar los grupos.

A los grupos tratados por el autor de la tesis se les impartieron los conceptos básicos de Física moderna mediante los programas-guía que se muestran en el capítulo anterior, eliminando aquellas actividades idénticas a los items presentes en el cuestionario para alumnos (Tablas 3.4.a y 3.4.b) para evitar la posibilidad de respuestas correctas por simple memorización. Los otros profesores también utilizaron los programas -guía en sus grupos, pero con un tratamiento menos detenido, suprimiendo actividades, etc.

A los alumnos de 2º de BUP se les pasó la 1ª y 2ª partes del cuestionario y a los de 3º y COU el cuestionario completo (ver cuadros 3.2.4 a, b y c), unas tres semanas después, para comprobar así la asimilación de los nuevos conceptos conflictivos en el esquema conceptual de partida del alumno.

Los resultados obtenidos se presentan en forma de tablas (7.1.a, b y c) que recogen los porcentajes de respuestas incorrectas y la desviación estandar de cada nivel. También se reproducen los resultados obtenidos por los grupos tratados por la enseñanza habitual para poder comparar ambos. Con objeto de facilitar la visualización de las diferencias se incluyen también las correspondientes graficas (7.1 a y b).

Se puede ver en dichas tablas que los resultados de grupos de distintos cursos (3º y COU) se presentan unificados, como pertenecientes a la misma población. La simple observación cualitativa (ver graficas 4.4.a y b) muestra que ello es posible, dado que no aparecen diferencias importantes entre los alumnos de-

3º y los de COU. Se puede realizar una comprobación más rigurosa de esto con el análisis estadístico mediante dos pruebas -cálculo de la  $\chi^2$  y de la t de Student- cuyos resultados (ver tabla 7.2.a), confirman plenamente la idea de que los resultados de los alumnos de 3º y COU pueden agruparse conjuntamente.

En efecto, la  $\chi^2$  muestra que no existen diferencias significativas entre los grupos de 3º y COU no tratados, ni siquiera aceptando un riesgo superior al 5 % de que las diferencias sean debidas a causas aleatorias ( $\chi^2 = 0.53$  es inferior al mínimo exigido, que según la tabla de  $\chi^2$  resulta en nuestro caso 11.07 para 5 grados de libertad y un porcentaje de error del 5 %). Esto permite considerar a los alumnos de 3º y COU no tratados como grupo control del nivel superior.

Esto se puede confirmar también mediante la t de Student. Así, la tabla 7.2.a muestra que no existen diferencias significativas entre los grupos de 3º y COU no tratados, ni siquiera aceptando un riesgo del 10 % de que las diferencias sean debidas a causas aleatorias, ya que las t calculadas para cada ítem son inferiores a 1.65, exigido para 345 grados de libertad y un porcentaje del 10 %.

Tabla 7.1a.- Resultados obtenidos por los grupos experimentales (tratados por el autor) y control del nivel elemental y del superior en la 1ª y 2ª parte del cuestionario.

Porcentaje de alumnos que:

- No conocen la crisis de la Física clásica (Item 1.1)
- No citan ninguno de los fenomenos que provocaron la crisis de la Física clásica (Item 2.1)
- No citan ninguna diferencia entre la Física clásica y la Física Moderna (Item 2.2)

Grupo encuestado	N	Item 1.1	Item 2.1	Item 2.2
		% S	% S	% S
2º BUP				
grupo de control	189	93.6 (1.8)	91.5 (2.0)	94.1 (1.7)
grupo experimental	107	30.8 (4.5)	17.8 (3.7)	29.9 (4.4)
3º BUP y COU				
grupo de control	347	85.9 (1.9)	82.7 (2.0)	87.0 (1.8)
grupo experimental	73	13.7 (4.0)	9.6 (3.4)	8.2 (3.2)

Tabla 7.1b.- Resultados obtenidos por los grupos experimental y control del nivel superior en la 3ª parte del cuestionario.

Porcentaje de alumnos que

- Desconocen la variación de la masa con la velocidad y el caracter limite de la velocidad de la luz (Item 3.1)
- Desconocen el comportamiento dual de los electrones (Item 3.2)
- No citan ninguna razón en contra de las órbitas de Bohr-Sommerfeld (Item 3.3)

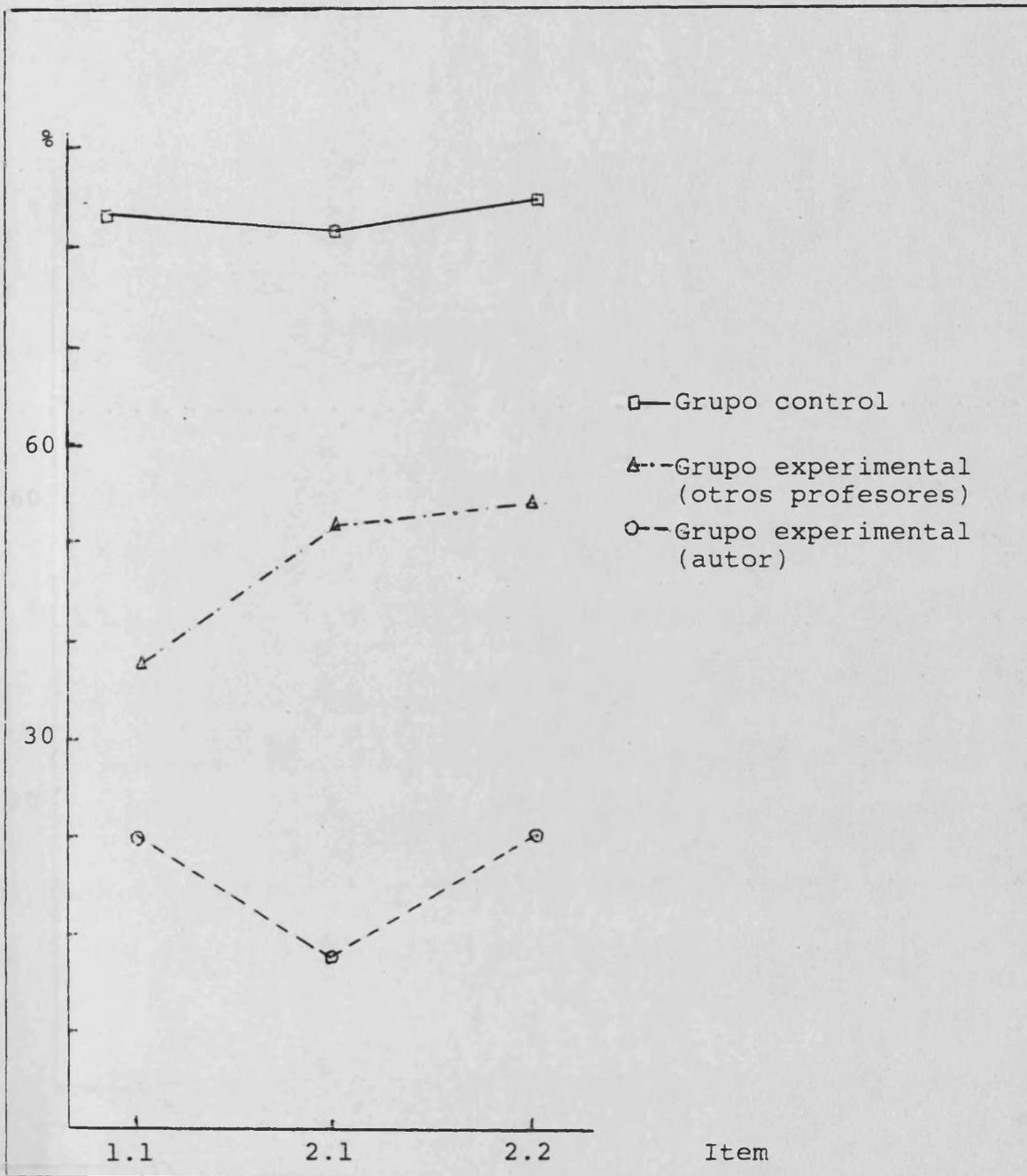
Grupo encuestado	N	Item 3.1	Item 3.2	Item 3.3
		% S	% S	% S
3º BUP y COU grupo de control	347	91.6 (1.5)	92.8 (1.4)	83.3 (2.0)
grupo experimental	73	41.9 (5.8)	34.2 (5.6)	31.5 (5.4)

Tabla 7.1c.- Resultados obtenidos por los grupos experimentales (tratados por otros profesores) y control del nivel elemental y del superior.

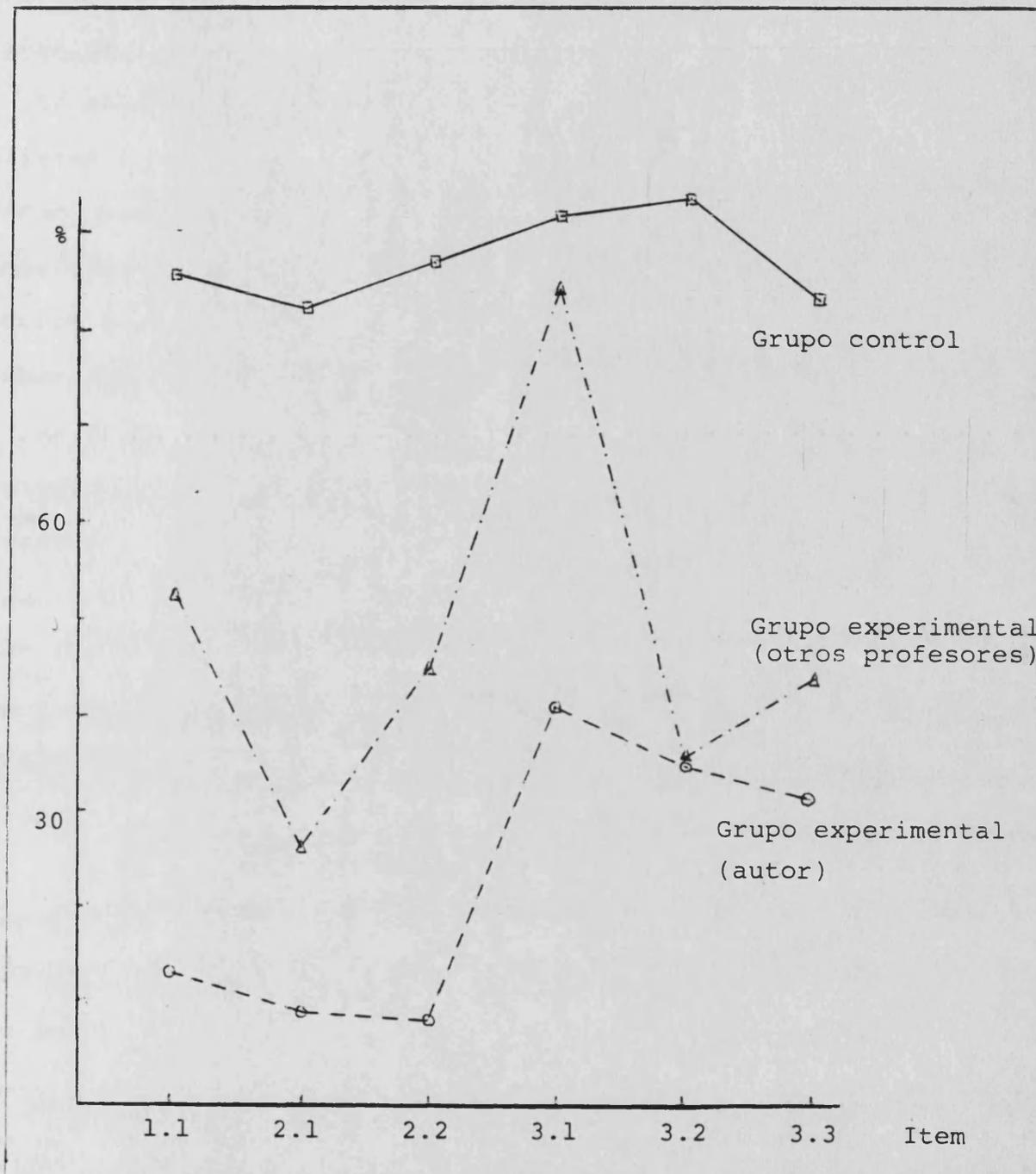
Grupo encuestado	N	Item 1.1		Item 2.1		Item. 3.1	
		%	S	%	S	%	S
2º BUP							
grupo de control	189	93.6	(1.8)	91.5	(2.0)	94.1	(1.7)
grupo experimental	31	48.4	(9.0)	61.3	(8.7)	63.9	(8.6)

3º BUP y COU							
grupo de control	347	85.8	(1.0)	82.7	(2.0)	87.0	(1.8)
3º BUP							
grupo experimental	38	52.6	(8.1)	26.3	(7.1)	44.7	(8.1)

Grupo encuestado	N	Item 3.1		Item 3.2		Item 3.3	
		%	S	%	S	%	S
3º BUP y COU							
grupo de control	347	91.6	(1.5)	92.8	(1.4)	83.3	(2.0)
3º BUP							
grupo experimental	38	84.2	(5.9)	34.2	(7.7)	44.7	(8.1)



Grafica 7.1.a.- Resultados obtenidos por los grupos experimentales y el grupo control del nivel elemental.



Grafica 7.1.b.- Resultados obtenidos por los grupos experimentales y el grupo control del nivel superior.

## 7.2. ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS GRUPOS EXPERIMENTALES

La observación de los resultados anteriores evidencia que existen diferencias muy significativas en los porcentajes de error para cada uno de los items, según se trate de grupos enseñados mediante la metodología habitual (grupo control) y los grupos enseñados mediante los programas-guía elaborados (grupos experimentales), de acuerdo con nuestra segunda hipótesis.

Se trata de señalar que incluso cuando el tratamiento es poco detenido, muy breve y con escasas actividades, se han logrado avances importantes en los grupos experimentales lo que mostraría hasta qué punto los resultados tan negativos obtenidos por los grupos control son debidos no a una especial dificultad de las cuestiones implicadas sino a una incorrecta orientación didáctica. Pasamos seguidamente a mostrar dichos avances:

a) Así, en lo que concierne al ítem 1.1, se puede observar que el porcentaje de alumnos que no mencionan la crisis de la Física clásica los grupos experimentales del autor -30.8 % (4.5) en 2º de BUP y 13.7 % (4.0) en 3º y COU- y de los otros profesores que realizaron un tratamiento menos detenido -48.4 % (9.0) en 2º de BUP y 52.6 % (8.1) en 3º-. Por el contrario en el grupo de control desconocen la crisis de la Física clásica el 93.6 % (1.8) en 2º y el 85.9 % (1.9) en 3º y COU.

Además se aprecia que los alumnos de los grupos experimentales que mencionan la crisis de la Física clásica también indican la de la aristotélica, contrariamente a los

grupos de control, lo que muestra que el grupo experimental tiene una visión más correcta del desarrollo de la ciencia y que el plantear la enseñanza para provocar cambios conceptuales ajustados a los grandes cambios de paradigma favorece la comprensión de los límites de la Física clásica.

b) Respecto al ítem 2.1 señalaremos la drástica reducción del % de alumnos que no son capaces de indicar ninguno de los fenómenos que provocaron la crisis de la Física clásica en los grupos experimentales del autor -17.8 % (3.7) en 2º de BUP y 9.6 % (3.4) en 3º y COU- y de los otros profesores -61.3 % (8.7) en 2º y 26.3 % (7.1) en 3º. Frente a esto, en los grupos de control no citan ninguno de dichos fenómenos el 91.5 % (2.0) en 2º y el 82.7 % (2.0) en 3º y COU.

Por otra parte más de la mitad de los alumnos de los grupos experimentales mencionan 2 o más fenómenos, lo que se traduce en que hay más tipos de contestaciones. A parte de las habituales -efecto fotoeléctrico y espectros continuos y discontinuos- se mencionan la inestabilidad del átomo de Rutherford, el efecto Compton y la inexistencia de sistemas de referencia en reposo absoluto (experiencia de Michelson).

c) Igualmente sucede en el ítem 2.2. Observamos, de acuerdo con nuestra hipótesis, una apreciable disminución de los alumnos que no indican ninguna diferencia entre la Física clásica y la moderna tanto en los grupos experimentales del autor -29.9 % (4.4) en 2º y 8.2 % (3.2) en 3º y COU- como en los que

realizaron el tratamiento menos detenido -63.9 % (8.6) en 2º y 44.7 % (8.1) en 3º-. Contrariamente, en los grupos control no mencionan ninguna diferencia el 94.1 % (8.6) en 2º y el 87.0 % (1.8) en 3º y COU.

Una parte considerable de los alumnos del grupo experimental que señalan alguna diferencia entre Física clásica y moderna indican 2 o más.

d) En el ítem 3.1 podemos apreciar una sensible disminución en el número de alumnos del grupo experimental del autor que desconocen la variación de la masa con la velocidad y el carácter límite de la velocidad de la luz: 41.9 % (5.8) frente al 91.6 % (1.5) del grupo control. El profesor del grupo experimental del nivel superior no impartió relatividad, lo que evidentemente imposibilita una contestación correcta -84.2 % (5.9)-.

e) En el ítem 3.2 observamos, de acuerdo con la hipótesis, una gran reducción del número de alumnos que desconocen la difracción de electrones en el grupo experimental del autor -34.2 % (5.6)- y en el del otro profesor -34.2 % (7.7)-. En cambio, en el grupo de control dicho porcentaje es el 92.8 % (1.4).

Por otra parte hay que señalar que en ambos ítems encontramos que una gran parte de los alumnos que contestan correctamente a la Física moderna también lo hacen con la clásica, lo que pone de manifiesto que la comprensión de la Física moderna favorece la de la clásica.

f) Finalmente, en el ítem 3.3 encontramos una estimable reducción del número de alumnos que son incapaces de dar razones en contra de las órbitas de Bohr-Sommerfeld tanto en el grupo experimental del autor -31.5 % (5.4)- como en el del otro profesor que realizó un tratamiento menos detenido -44.7 % (8.1)- frente al 83.3 % (2.0) del grupo de control.

Se puede realizar una comprobación cuantitativa del carácter significativo de dichas diferencias mediante el análisis estadístico.

Así, la utilización del método  $\chi^2$  permite constatar que existen diferencias significativas entre los grupos experimental (tratados por el autor) y control, con una probabilidad de que esas diferencias sean debidas al inferior al 0.1 % (muy superior al 5 % que se toma habitualmente como margen). En efecto,  $\chi^2$  para los grupos de 2º experimental y control es 134.57, muy superior al 13.82 exigido para 3 grados de libertad y un porcentaje del 0.1 %. Análogamente, para los grupos de 3º y COU experimental y control,  $\chi^2 = 200.74$ , mucho mayor que el 20.52 exigido para 5 grados de libertad y un porcentaje del 0.1 %.

Confirmando lo anterior, la  $t$  de Student verifica que existen diferencias significativas entre los grupos experimentales (tratados por el autor) y los grupos de control, con una probabilidad de que esas diferencias sean aleatorias menor del 1 %. En efecto, para los grupos de 2º de BUP las  $t$  calculadas al comparar los porcentajes de los grupos experimental y control son

Tabla 7.2.b.- t de Student obtenida comparando los porcentajes de respuestas incorrectas de los grupos de 3º y COU no tratados.

Item	1.1	2.1	2.2	3.1	3.2	3.3	t (gl=345; $\alpha=10\%$ )
t	0.47	1.12	0.99	1.10	0.25	0.35	1.65

Tabla 7.2.b.- t de Student obtenida comparando los porcentajes de respuestas incorrectas de los grupos experimentales (tratados por el autor) y control de 2º de BUP.

Item	1.1	2.1	2.2	t (gl=294; $\alpha=1\%$ )
t	13.12	17.50	13.51	2.59

Tabla 7.2.c.- t de Student obtenida comparando los porcentajes de respuestas incorrectas de los grupos experimentales (tratados por el autor) y del control de 3º y COU.

Item	1.1	2.1	2.2	3.1	3.2	3.3	t (gl=418; $\alpha=1\%$ )
t	16.29	18.26	21.41	7.24	10.24	8.94	2.59

Tabla 7.2.d.- t de Student obtenida comparando los porcentajes - de respuestas incorrectas de los grupos experimentales (tratados por otros profesores) y control de 2º BUP

Item	1.1	2.1	2.2	t(g1=225; $\alpha$ =1%)
t	4.94	3.36	3.47	2.59

Tabla 7.2.e.- t de Student obtenida comparando los porcentajes - de respuestas incorrectas de los grupos experimentales (tratados por otros profesores) y control de 3º de BUP.

Item	1.1	2.1	2.2	3.1	3.2	3.3	t(g1=383; $\alpha$ =1%)
t	4.01	7.60	5.12	1.21	7.49	4.64	2.59

superiores al 2.59 exigido para 249 grados de libertad y un grado de fiabilidad del 1 % -ver tabla 7.2.b-. Analogamente, para los grupos de 3º y COU las t calculadas son mucho mayores que el 2.59 exigido para 418 grados de libertad y un porcentaje de error del 1 % -ver tabla 7.2.c-.

Por otro lado, comprobamos con la  $\chi^2$  que también existen diferencias significativas entre los grupos experimentales (tratados por otros profesores con menos detenimiento) y los grupos de control, con una probabilidad de que esas diferencias sean aleatorias del 0.5 % en 2º y del 0.1 % en 3º. Para 2º,  $\chi^2 = 11.63$ , mayor que el 10.60 exigido para 2 grados de libertad y un porcentaje de error del 0.5 % y para 3º,  $\chi^2 = 101.87$ , superior al 20.52 exigido para 5 grados de libertad y un porcentaje del 0.1 %.

Finalmente las tablas 7.2.d y 7.2.e constatan la existencia de diferencias significativas entre los grupos experimental (tratado por otros profesores) y control, con una probabilidad de que esas diferencias sean debidas al azar inferior al 1 % en todos los items, salvo en el 3.1 de 3º, por la razón que ya indicabamos. En efecto, en los restantes items la t calculada es suficientemente mayor que el 2.59 exigido para un porcentaje de error del 1 %.

La simple visión comparativa de las tablas de t muestra, como cabía esperar, que existen diferencias entre los grupos experimentales, tanto los tratados por el autor como los tratados

por otros profesores, y los grupos de control. Cabe pensar que el uso de los programas-guía supone no sólo un cambio conceptual, sino también un cambio metodológico, que refuerza el conceptual.

Pero aún más interesantes son las diferencias entre los grupos de los otros profesores, tratados con menos detenimiento, y los grupos control, que confirman hasta que punto es fácil realizar una introducción estructurada de la Física moderna que permita mejorar sensiblemente los resultados obtenidos con el tratamiento usual.

Podemos concluir así que la elaboración de unos criterios y unos materiales didácticos que se planteen proporcionar una visión clara y elemental de la Física moderna que parta de la crisis de las concepciones clásicas y muestre cualitativamente algunas características del nuevo paradigma, en una perspectiva de cambio conceptual y metodológico, produce un considerable aumento de la comprensión que los alumnos alcanzan no sólo de la Física moderna, sino también de la clásica y una drástica reducción de errores en algunos conceptos de Física moderna.

Capítulo 8.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

-----  
Cap 8. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS  
-----

Las dificultades en aprendizaje de ideas y conceptos clave de la Física moderna que ha menudo se hace referencia en la literatura han sido interpretadas en este trabajo, a título de hipótesis como el resultado de un tratamiento didáctico incorrecto, consecuencia de los paradigmas de enseñanza/aprendizaje vigentes. Dicha hipótesis ha sido fundamentada y se han derivado consecuencias que han sido sometidas a contrastación. Los resultados obtenidos nos han permitido llegar a conclusiones que a continuación exponemos:

1. Puede afirmarse que, en general, los profesores y los libros de texto transmiten una imagen de la ciencia caracterizada por el empirismo y la visión acumulativa del desarrollo de los conocimientos.

1.1. Por ello, la gran mayoría de los textos (porcentajes que oscilan entre el 83.3 % y el 95.2 %) no realizan ni siquiera referencias puntuales al carácter no lineal del desarrollo de la ciencia, lo que se traduce en una introducción de la Física moderna que no toma como punto de partida las dificultades insuperables que originaron la crisis de la Física clásica, los límites de validez de ésta, ni intenta mostrar las diferencias entre la visión clásica y la moderna del comportamiento de la materia.

1.2. Además, un gran porcentaje de dichos textos (entre el

67.9 % y el 78.6 %) introducen graves errores conceptuales en aspectos clave de la nueva Física como las relaciones masa /energía, la dualidad onda /corpúsculo, las relaciones de indeterminación y la idea de partícula elemental.

1.3. Corroborando lo anterior, casi el 80.5 % del profesorado acepta acríticamente los temarios oficiales y no se plantea ninguno de los criterios del punto 1.1, es decir, no parte de las dificultades insuperables que originaron la crisis de la Física clásica, etc.

2. También podemos señalar que, como consecuencia de esta forma de introducción de la Física moderna los alumnos no alcanzan una mínima comprensión, ni siquiera cualitativa, de las ideas y conceptos fundamentales del nuevo paradigma. Además, dicha presentación, por su propia orientación que enmascara la ruptura conceptual que supone la Física moderna produce errores conceptuales en torno a conceptos básicos. Más concretamente:

2.1. Porcentajes de alumnos de 2º, 3º y COU que oscilan entre el 80 y el 94 % desconocen la existencia de crisis en la Física clásica, no citan ninguno de los fenómenos que provocaron dicha crisis y no mencionan ninguna de las diferencias entre Física clásica y moderna.

2.2. Además, porcentajes de alumnos de 3º y COU comprendidos entre el 62.7 % y el 93.1 % desconocen aspectos clave del comportamiento de la materia según la Física moderna, como la variación de la masa con la velocidad y el carácter límite de  $c$ , el comportamiento dual de los electrones o las razones contra

las órbitas de Bohr-Sommerfeld.

En resumen, el tratamiento didáctico habitual no hace referencias al carácter no lineal del desarrollo científico e introduce los elementos de Física moderna sin mostrar su radical novedad. Se pierde así una ocasión privilegiada para contribuir a dar una imagen más justa del trabajo científico y particularmente de la importancia de las revoluciones científicas, cuyas consecuencias en los alumnos se aprecian en el punto 2.

Seguidamente, apoyándonos en la idea de que es posible dar una imagen más coherente de la ciencia y conseguir un aprendizaje significativo de los conceptos de la Física moderna cuando se utilizan currículas de Física diseñados de acuerdo con un modelo de enseñanza /aprendizaje como cambio conceptual y metodológico que tenga en cuenta tanto las estructuras conceptuales previas de los alumnos como sus tendencias metodológicas habituales, hemos mostrado que:

3. Dichos cambios se facilitan diseñando currícula de Física que proporcionen una imagen menos lineal y más creativa de la ciencia y que, por tanto, permitan a los alumnos comprender, al menos cualitativamente cual es la visión del comportamiento de la materia contra la que se elaboró la Física clásica y los límites de validez de ésta que condujeron a la Relatividad y la Cuántica.

Esto se ha comprobado elaborando materiales didácticos con

esta orientación y aplicándolos a grupos de alumnos. Se ha encontrado, tanto en los grupos tratados por el autor de la tesis como en los grupos de otros profesores que realizaron un tratamiento más laxo, una visión más correcta de la Física moderna, una reducción drástica de los errores conceptuales y, en resumen, una significativa mejora en el aprendizaje.

Al comparar los resultados de dichos alumnos con los de los alumnos sometidos al tratamiento habitual no sólo hemos encontrado valores de  $\chi^2$  y de la t de Student muy por encima del mínimo exigido para que las diferencias observadas puedan considerarse como realmente significativas, con porcentajes de error menores que el 1 %, sino que también dichas diferencias eran realmente notables.

Estos resultados son bastante prometedores y confirman nuestra hipótesis. No obstante consideramos necesario, con el objeto de profundizar y ampliar este trabajo, trabajar en las siguientes perspectivas:

a. Diseñar currícula en los dominios de la Física (átomos, moléculas, sólidos, núcleos, partículas elementales y astrofísica) en que se aplican los conceptos ya introducidos de Física moderna.

b. Mostrar como la introducción de la Física moderna no sólo proporciona una imagen más coherente y creativa de la ciencia sino que también contribuye a la creación de actitudes más positivas en el alumno hacia la ciencia y su aprendizaje.

c. Profundizar en el cambio metodológico que supuso la nueva

Física.

d.Utilizar el ordenador como herramienta didáctica en este dominio por la gran dificultad y coste de las prácticas de laboratorio (básicamente para simular experimentos a partir de un determinado modelo, establecer modelos, etc).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ACKER A., 1985, Des particules aux molécules: l'organisation de la matière dans l'Univers, Bulletin de l'Union des Physiciens, 677, pag 1-34.

ALONSO M. y FINN E.J., 1970, Física. vol 1. Mecánica, (Fondo Educativo Interamericano : Panamá).

ALONSO M. y FINN E.J., 1971, Física. vol 3. Fundamentos cuánticos y estadísticos, (Fondo Educativo Interamericano : Panamá).

AUSUBEL D.P., 1978, Psicología educativa. Un punto de vista cognoscitivo, (Trillas : México).

AGUIRRE DE CARCER I., 1983, Dificultades en la comprensión de las explicaciones de los libros de texto de Física, Enseñanza de las Ciencias, 1, pp 83-92.

BACHELARD G., 1971, Epistemologie. Textes choisis, (PUF : París).

BALIBAR F. y LEVY-LEBLOND J.M., 1984, Voulez-vous apprendre quantique, Sciences et Avenir, nº 46, pp 88-92.

BARTELL L.S., 1985, Perspectives on the Uncertainty Principle and Quantum Reality, Journal of Chemical Education, 20, pp 192-196.

BELTRAN J., FURIO C., GIL D., LLOPIS R. y SANCHEZ A., 1976, Física y Química 2º, (Anaya : Salamanca).

BELTRAN J., FURIO C., GIL D., GIL G., GRIMA M.J., LLOPIS R. y SANCHEZ A., 1977, Física y Química 3º, (Anaya : Salamanca).

BERNAL J.D., 1976, Historia social de la Ciencia, (Península : Barcelona).

BULLEJOS J., 1983, Análisis de actividades en textos de Física y Química de 2º de BUP, Enseñanza de las Ciencias, 1, pp 147-158.

BRATTIN et al, 1983, Physics texts: An evaluative review, The Physics teacher, 20, pp 508-518.

BUNGE M., 1973, La investigación científica, (Ariel : Barcelona).

BUNGE M., 1978, Filosofía de la Física, (Ariel : Barcelona).

CALATAYUD L., GIL D. et al, 1980, Trabajos prácticos de Física, (ICE de la Universidad de Valencia : Valencia).

CALATAYUD L., FURIO C. et al., 1980, Trabajos prácticos de Química como pequeñas investigaciones, (ICE de la Universidad de Valencia : Valencia).

CAPEK M., 1973, El impacto filosófico de la física contemporánea, (Tecnos : Madrid).

CARNAP R., 1969, Fundamentación lógica de la Física, (Suramericana : Buenos Aires).

CARRASCOSA J. y GIL D., 1985, La "metodología de la superficialitat" i l'aprenentatge de les ciències, Enseñanza de las Ciencias, 3, pp 113-21.

CORTINI G., 1983, Sulla massa relativista in didattica, La Fisica Nella Scuola, 16, pp 61-63.

CHALMERS A. F., 1984, ¿Qué es esa cosa llamada ciencia?, (s XXI : Madrid).

CHEVALLEY C., 1984, Une nouvelle Science, Sciences et Avenir, nº 46, pp 18-25.

COLMEZ F., DELACOTE G. y RICHARD J.F., 1978, Status de l'observation et de l'activite experimentale chez l'eleve, Revue Francaise de Pedagogie, 45, pp 55-66.

DELIGEORGES S., 1984, La catastrophe ultraviolete, Sciences et Avenir, nº 46, pp 10-16.

DRIVER R., 1985, Cognitive psychology and pupil's frameworks in Mechanics, The many Faces of Teaching and Learning Mechanics, (Proceedings of 1984 GIREP Conference on Physics Education : Utrecht).

DUCASSE A., LALANNE J.R., LALANNE P. et RAYEZ J.C., 1985, Concepts modernes sur la structure électronique des molécules et la liaison chimique. Application pedagogie aux classes de seconde et première, Bulletin de l'Union des Physiciens, 678, pag 129-220.

EBISON M.G., 1981, Introducing the Uncertainty Principle, en Quantum Mechanics in the School, (Roland Eötvös University : Budapest).

EINSTEIN A. et al., 1975, La teoría de la relatividad, (Alianza : Madrid)

EISBERG R., 1974, Fundamentos de Física moderna, (Limusa : México).

FABRI E., 1981, Dialogo sulla massa relativistica, La Fisica nella Scuola, 14, p 25.

- FERNANDEZ E., 1979, Estructura y didáctica de las Ciencias, (Servicio de Publicaciones del MEC : Madrid).
- FEYERABEND P.K., 1974, Contra el método, (Ariel : Barcelona).
- FEYNMAN R.P., LEIGHTON R.B. y SANDS M., 1971 a, Física vol I. Mecánica, radiación y calor, (Fondo Educativo Interamericano : Panamá).
- FEYNMAN R.P., LEIGHTON R.B. y SANDS M., 1971 b, Física vol III. Mecánica cuántica, (Fondo Educativo Interamericano : Panamá).
- FOX D.J., 1981, El proceso de investigación en la educación, (EUNSA : Pamplona).
- FREDETTE N. y LOCHHEAD J., 1980, Students conceptions of electric current, The Physics Teacher, 18, pp 194-198.
- FRENCH A., 1981, Experimental Bases for Quantum Ideas, Quantum Mechanics in the School, (Roland Eötvös University : Budapest).
- FURIO C. y GIL D., 1978, El programa-guía. Una propuesta para la clase activa, ICE de la Universidad de Valencia : Valencia).
- GALINDO A. y PASCUAL P., 1980, Mecánica cuántica, (Alhambra : Madrid).
- GARCIA-CASTAÑEDA M., 1985, An abuse with the wave properties of matter, American Journal of Physics, 53, pp 373-374.
- GERTHSEN C.H., KNESER H. y VOGEL H., 1979, Física, (Dossat : Madrid).
- GIL D. et al, 1979, física COU. Programas-guía de trabajo para la clase activa, (ICE de la Universidad de Valencia : Valencia).
- GIL D., 1981, Evolución de la idea de materia, (ICE de la Universidad de Valencia : Valencia).
- GIL D., 1982, La investigación en el aula de Física y Química, (Anaya : Madrid).
- GIL D., 1983, Tres paradigmas básicos en la enseñanza de las Ciencias, Enseñanza de las Ciencias, 1, pp 26-33.
- GIL D. y CARRASCOSA J., 1985, Science Learning as a conceptual and methodological change, European Journal of Science Education, 7, pp 231-236.
- GIL D. y MARTINEZ J., 1983, A model for problem-solving in accordance with scientific methodology, European Journal of Science Education, 5, pp 447-455.

GIL D. y MARTINEZ J., 1984, Problem-solving in Physics: A critical analysis, Research on Physics Education, (Editions du CNRS : Paris).

GIL D. y PAYA J., 1984 a, Los trabajos prácticos en la enseñanza de la Física I. Un análisis crítico, Actas de las 1<sup>as</sup> Jornadas de Investigación Didáctica en Física y Química, (ICE de la Universidad de Valencia : Valencia).

GIL D. y PAYA J., 1984 b, Los trabajos prácticos en la Enseñanza de la Física II. Propuesta de Reorientación, Actas de las 1<sup>as</sup> Jornadas de Investigación Didáctica en Física y Química, (ICE de la Universidad de Valencia : Valencia).

GIMENO J., 1985, Teoría de la enseñanza y desarrollo del currículo, (Anaya : Madrid).

GIORDAN A., 1978, Observation-experimentation: Mais comment les élèves apprennent-ils?, Revue Française de Pédagogie 44, pp 66-73.

HABER-SCHAIM U., 1981, On the Teaching of Quantum Mechanics in the Senior High School, Quantum Mechanics in the School, (Roland Eötvös University : Budapest).

HARVARD PROJECT PHYSICS, 1970, Models of the atom. Unit 5, Holt, Rinehart Winston Inc, New York.

HALLIDAY D. y RESNICK R., 1982, Física, (CECSA : México).

HAWES J.L., 1981, Matter for illumination, Physics Education, 16, pp 178-185.

HELM H., 1980, Misconceptions in Physics amongst south african students, Physics Education, 15, pp 92-97.

HEMPEL C.G., 1976, Filosofía de la Ciencia, (Alianza : Madrid).

HEWSON P.W., 1981, A conceptual change approach to learning Science, European Journal of Science Education, 3, pp 383-396.

HEWSON P.W., 1982, A case study of conceptual change in Special Relativity: The influence of prior knowledge in learning, European Journal of Science Education, 4, pp 61-78.

HODSON D., 1985, Philosophy of science, science and science education, Studies in Science Education, 12, pp 25-55.

HOLTON G., 1976, Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas, (Reverté : Barcelona).

HOST V., 1978, Procédures d'apprentissage spontanées dans la formation du scientifique, Revue Française de Pédagogie, 43, pp 103-110.

- JACKSON J.D., 1980, Electrodinámica clásica, (Alhambra : Madrid).
- KITTEL C.H., KNIGHT W.D. y RUDERMAN M.A., 1982, Mecánica. Berkeley Physics Course vol IV, (Reverté : Barcelona).
- KUHN T.S., 1975, La estructura de las revoluciones científicas, (Fondo de cultura económica : Madrid).
- KUHN W., 1981, Quantum physics in the secondary school, Quantum Mechanics in the School, (Roland Eötvös University : Budapest).
- LAKATOS I., 1975 a, Historia de la Ciencia y sus reconstrucciones racionales, La crítica y el desarrollo del conocimiento, (Grijalbo : Barcelona).
- LAKATOS I., 1975 b, la falsación y la metodología de los programas de investigación científica, La crítica y el desarrollo del conocimiento, (Grijalbo : Barcelona).
- LATIMER C.J., 1983, Teaching Bohr theory, Physics Education, 18, pp 86-89.
- LALOE F., 1984 a, Le demi-siècle de fidélité d'une grande dame, Sciences et Avenir, nº 46, pp 75-78.
- LALOE F., 1984 b, La Mecanique Quantique a l'ordinaire des physiciens, Sciences et Avenir, nº 46, pp 92-97.
- LARKIN J.H. y RAINARD B., 1984, A research methodology for studying how people think, Journal of Research in Science Teaching, 21, pp 235-254.
- LEHRMAN R.L., 1982, Confused Physics: A tutorial critique, The Physics Teacher, 20, pp 519-523.
- LEITE-LOPES J., 1985, Les particules élémentaires et l'unification des interactions physiques, Bulletin de l'Union des Physiciens, 677, pag 1-34.
- LEVY-LEBLOND J.M., 1984, Le monde des quantons, Sciences et Avenir, nº 46, pp 180-187.
- LIJNSE P.L., 1981, On the dutch programme for the introduction of quantum mechanics at secondary schools, Quantum Mechanics in the School, (Roland Eötvös University : Budapest).
- LORIA A., MALAGODI C. y MICHELLINI M., 1981, School Quantum Physics, Quantum Mechanics in the School, (Roland Eötvös University : Budapest).
- LLORET A., 1977, Física pop. Una expedició al microcosmos, (62 : Barcelona).

- MARTIN F., 1982, La cromodinámica cuántica, Mundo científico, 1, pp 608-619.
- MARX G., 1981, Atoms in the school, Quantum Mechanics in the School, (Roland Eötvös University : Budapest).
- MESSIAH A., 1974, Mecánica Cuántica, (Tecnos : Madrid).
- MOTT N., 1981, On teaching quantum phenomena, Quantum Mechanics in the School, (Roland Eötvös University : Budapest).
- NOVAK J.D., 1982, Teoría y práctica de la educación, (Alianza : Madrid).
- NUFFIELD, 1974, Física. Unidad 2. Electricidad, electrones y niveles energéticos, (Reverté : Barcelona).
- NUFFIELD, 1975a, Física. Unidad 5. Estructura atómica, (Reverté : Barcelona).
- NUFFIELD, 1975b, Física. Unidad 10. Ondas, partículas y átomos, (Reverté : Barcelona).
- NUSSBAUM J. y NOVICK S., 1980, Brainstorming in the class-room to invent a model: a case study, Israel Science Teaching Centre, Jerusalem.
- OGBORN J., 1981, Introducing quantum physics, Quantum Physics in the School, (Roland Eötvös University : Budapest).
- OPEN UNIVERSITY, 1979, Research Methods in Education and Social Science, (Milton : Keynes).
- OSBORNE R. y WITTRICK M., 1983, Learning Science: a generative process, Science Education, 67, pp 490-508.
- PAIS A., 1984, La ciencia y la vida de Albert Einstein, (Ariel : Barcelona).
- PADLONI L., 1982, Classical mechanics and quantum mechanics: an elementary approach to the comparison of the two viewpoints, European Journal of Science Education, 4, pp 241-251.
- PIAGET J., 1970 a, La epistemología genética, (Redondo : Barcelona).
- PIAGET J., 1970 b, Piaget's theory, Carmichael's Manual of Child Psychology, (John Wiley Sons : New York).
- PIAGET J., 1975, Psicología y epistemología, (Ariel : Barcelona).
- PIAGET J., 1977, Psicología y pedagogía, (Ariel : Barcelona).

- POPPER K.R., 1962, La lógica de la investigación científica, (Tecnos : Madrid).
- PRICE D.J.S., 1973, Hacia una ciencia de la ciencia, (Ariel : Barcelona).
- POSNER G.S., STRIKE K.A., HEWSON P.W. y GERTZOG W.A., 1982, Accommodation of a scientific conception: towards a theory of conceptual change, Science Education, 66, pp 211-227.
- PHYSICAL SCIENCE STUDY COMMITTEE, 1980, Física, (Reverté : Barcelona).
- RESNICK R., 1976, Conceptos de Relatividad y teoría cuántica, (Limusa : México).
- RESNICK R., 1980, Misconceptions about Einstein, Journal of Chemical Education, 57, p 854.
- RIDNIK V., 1978, Leyes del mundo físico, (Mir : Moscú).
- ROGERS E.M., 1981, Comments on the future of quantum mechanics teaching, Quantum Mechanics in the School, Roland Eötvös University, Budapest.
- SCHAEFFER M., 1985, Quelques aspects experimentaux de la physique des particules, Bulletin de l'Union des Physiciens, 677, pag 35-96.
- SEMINARIO DE FISICA Y QUIMICA DEL ICE DE LA UNIVERSIDAD DE VALENCIA, 1983, Hacia un nuevo curriculum de Física y Química para el Bachillerato: Una consulta al profesorado, Enseñanza de las Ciencias, 1, pp 106-109.
- SEMINARIO DE FISICA Y QUIMICA DEL ICE DE LA UNIVERSIDAD DE VALENCIA, 1984, Criterios básicos para la elaboración de un curriculum de Física y Química, Enseñanza de las Ciencias, 2, pp 103-110.
- SERRAMONA J., 1980, Investigación y estadística aplicada a la educación, (CEAC : Barcelona).
- SOLIS R., 1984, Ideas intuitivas y aprendizaje de las Ciencias, Enseñanza de las Ciencias, 2, pp 83-91.
- STRNAD J., 1981, Quantum physics for beginners, Physics Education, 16, pp 88-92.
- TALL G., 1982, British science curriculum projects. How have they taken root in schools?, European Journal of Science Education, 3, pp 17-38.
- TEIXEIRA-DIAS J.J.C., 1983, How to teach the postulates of

quantum mechanics without enigma, Journal of Chemical Education, 6, pp 963-965.

TIPLER P.A., 1978, Física, (Reverté : Barcelona).

TIPLER P.A., 1980, Física moderna, (Reverté : Barcelona).

TOULMIN S., 1977, La comprensión humana I: El uso colectivo y la evolución de los conceptos, (Alianza : Madrid).

VIENNOT L., 1978, La raisonnement spontanée en dynamique elementaire; Revue Française de Pedagogie, 45, pp 16-23.

WARREN J.W., 1976, The mysteri of mass-energy, Physics Education, 11, pp 52-54.

WEISSKOPF V., 1981, Modern physics from elementary point of view, Quantum Physics in the School, (Roland Eötvös University : Budapest).

WICHMAN E.H., 1972, Física cuántica. Berkeley Physics Course vol IV, (Reverté : Barcelona).

WHEATON B.R., 1984, Le duc dans la Mecanique Ondulatoire, Sciences et Avenir, nº 46, pp 42-47.

YAGER R.E. y PENICH J.E., 1983, Analysis of the current problems with school science in the USA, European Journal of Science Education, 5, pp 463-469.