

***“Teorías y modelos
en la enseñanza -aprendizaje
de la Física Moderna”***

Tesis de Doctorado

Patricia Esther Fernández

(patricia@fceia.unr.edu.ar)

Directores:

Dr. Eduardo M. González (FaMAF- UNC)

Dr. Jordi Solbes Matarredona (Univ. de Valencia, ESP)

Facultad de Matemática, Astronomía y Física

Universidad Nacional de Córdoba

Febrero 27, 2014



“Teorías y modelos en la enseñanza -aprendizaje de la Física Moderna”
por Patricia Esther Fernández se distribuye bajo una [Licencia Creative Commonsution-
NonCommercial-SinDerivar 2.5 Argentina](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/arg/)

A Marcelo

Agradecimientos

La didáctica de la ciencia es una ciencia relativamente nueva y como todo campo en crecimiento ha tenido que luchar para obtener el reconocimiento de las disciplinas científicas que le dieron origen. Agradezco por ello a quienes abrieron el camino para que yo pudiera desarrollarme en esta área.

Al Dr. Alberto Maiztegui, un especial reconocimiento por ser un pionero que trascendió las fronteras de nuestro país y generosamente abrió puertas a muchos de los que intentamos seguir sus pasos. En mi caso particular, un agradecimiento especial por presentarme a mi director de tesis.

A Facultad de Matemática, Astronomía y Física (FaMAF-UNC) por su apertura hacia la Didáctica de la Ciencia.

A la Asociación de Profesores de Física (APFA) y por su intermedio a todos los profesores que abrieron camino y contribuyeron a forjaron para la enseñanza de la Física el lugar distintivo que hoy le es propio.

A mi Director de Tesis, el Dr. Eduardo González, por creer en mi proyecto, por su apoyo incondicional, por todo lo que generosamente me transmitió y por haberme presentado a mi Co-Director. Pero por sobre todo, le agradezco su paciencia, su buen humor, y por entender mis tiempos.

A mi Co-Director el Dr. Jordi Solbes por todas sus sugerencias y por compartir sus conocimientos, por darme la oportunidad de participar en enriquecedoras instancias de formación en la Universidad de Valencia y por su empuje permanente.

Al Dr. Roberto Rivarola (FCEIA, UNR) y Dr. Carlos Budde (FaMAF, UNC), mis asesores de tesis, por confiar en mí y allanarme el camino cada vez que lo necesité.

A mi familia que siempre me alentó a seguir, a mi esposo que nunca me dejó claudicar y a mis hijas. A mi padre y a mi madre por darme la posibilidad de estudiar respetando mi elección.

A mis amigos por estar.

Y a todos los que de una forma u otra me acompañaron y fueron parte de este proyecto.

Simply, gracias.

Presentación general:

La tesis doctoral que se presenta se fundamenta en la necesidad de analizar la formación de los Profesores de Física, en temas de Física Cuántica relativos a la visión de la estructura de la materia. Estos contenidos fueron incluidos en la currícula del nivel secundario de la escuela argentina a partir de la sanción de la Ley Federal de Educación Nro. 24195 en 1993, y no han sido modificados por la actual Ley de Educación Nacional Nro. 26.206¹. El tratamiento de la física contemporánea, además, forma parte de los estándares requeridos en las carreras de ingeniería de nuestro país a partir del proceso de acreditación vigente, es decir que, estos temas deberían estar incluidos tanto en el nivel secundario como en el universitario básico.

Los modelos actuales de la estructura de la materia han posibilitado innumerables avances tecnológicos que contribuyen a mejorar la calidad de vida de los ciudadanos y que hoy en día están al alcance de los estudiantes. Por ello entendemos que el tratamiento de los principios físicos que fundamentan estas teorías no puede quedar fuera de la enseñanza habitual. Pero por otro lado, somos conscientes de que su inclusión acarrea problemas nada simples que es necesario analizar minuciosamente. Si bien estos problemas radican en gran parte en la complejidad de los temas y en la necesidad de elaborar cuidadosas propuestas de trasposición didáctica, estamos convencidos también, que una pobre formación de los docentes en la temática, colabora en la postergación de su introducción en la currícula.

El tratamiento didáctico de la inclusión de la física cuántica en distintos niveles educativos de nuestro país no ha sido discutido lo suficiente, probablemente por no formar parte, hasta hace poco, de los contenidos curriculares tradicionales de ciencias para el

¹ Debemos aclarar que si bien se han gestado cambios importantes en la organización institucional a partir de la sanción la Ley de Educación Nacional Nro. 26.206 el 14 de diciembre de 2006, no se han discutido modificaciones en los contenidos y es de esperar que la intención de incluir en la currícula temas de física contemporánea se refuerce en procura de una adecuación de la formación general científica de los ciudadanos a los requerimientos del mundo actual.

nivel medio. Sin embargo, la comprensión de los fenómenos estudiados dentro de la llamada Física Moderna y en particular dentro de la Mecánica Cuántica (MQ), merecen una especial atención dado que su presentación involucra modelos muy poco intuitivos, alejados de la experiencia cotidiana, y que introducen dificultades específicas que es necesario superar.

Los estudios sobre los problemas que enfrentan los profesores en esta temática son escasos, pero investigaciones anteriores muestran que, en otras áreas, las dificultades detectadas en el nivel de los estudiantes no son exclusivas de los adolescentes sino que también se plantean en el nivel de profesorado e incluso en el universitario básico (Porlán, 1997). La física moderna no es ajena a esta realidad (Solbes et al., 1988). Los profesores enfrentan dificultades de comprensión específicas que obstaculizarán cualquier intento de transposición de estos temas al aula si no se las trata convenientemente y no se les brinda herramientas adecuadas.

Esta situación, resalta la importancia de investigar los modelos adquiridos por los profesores de ciencias durante su formación y las posibles estrategias didácticas que faciliten una presentación sencilla, pero significativa, de tópicos de interés de la Física Cuántica (FQ). Sólo entonces, con docentes formados, podrá encararse la transposición didáctica de estos temas al nivel del estudiantado.

El presente proyecto de tesis, intenta abordar esta problemática desde dos aspectos relacionados. Por un lado, caracterizar la formación de los profesores de física que deberán asumir el dictado de estos temas, sus dificultades en esta temática tanto para su comprensión como para su implementación en el aula y, por otro, plantear alternativas didácticas que faciliten la labor docente.

Si bien se han realizado algunos estudios en esta dirección, no hemos encontrado suficientes investigaciones que traten los problemas de formación a nivel del profesorado y que a la vez colaboren con sugerencias de implementación en el aula.

La didáctica de las ciencias aporta valiosos elementos de interpretación en este campo. A lo largo del desarrollo de esta tesis, intentaremos caracterizar los modelos intuitivos expresados por los profesores y describir cómo evolucionan a lo largo de una instancia de formación especialmente diseñada. También la epistemología de las ciencias contribuirá a esclarecer los cambios de paradigmas y los obstáculos cognoscitivos que es necesario superar. Analizaremos en qué casos se producen cambios conceptuales y cómo los modelos inicialmente intuitivos se acercan a los modelos consensuados por la ciencia.

La metodología utilizada para la búsqueda de resultados consistió en un abordaje del problema desde diferentes aspectos para los que se diseñaron múltiples instrumentos convergentes. Los recursos variaron desde encuestas con preguntas abiertas y semia-biertas, a entrevistas semiestructuradas y cuestionarios temáticos a partir de párrafos extraídos de la bibliografía tradicional en uso. Se diseñó además una alternativa didáctica que fue implementada en forma piloto y a partir de la cual se pudo estudiar la evolución de los modelos de los profesores en algunos tópicos particulares.

Finalmente presentamos las conclusiones arribadas y las perspectivas abiertas que se plantean a futuro.

Con el ánimo de ofrecer al lector una presentación organizada de este informe de tesis, la redacción se estructura en tres partes.

En la *Parte I* se contextualiza la investigación, se plantea el problema y se presenta el estado del arte. Esta primera parte consta de dos capítulos. En el *Capítulo 1* se plantea el problema a investigar y se comentan aspectos de la enseñanza de la Física Moderna como novedad curricular, por qué actualizar contenidos curriculares en el área, la enseñanza de la física en nuestro país a partir de la Reforma Educativa de los '90, la situación actual de los profesorados en física en nuestro país y las dificultades derivadas de la enseñanza aprendizaje de la FQ y de la formación de profesores. En el *Capítulo 2* se presenta el marco teórico y se describen: los aportes de la didáctica de las ciencias a la enseñanza y su evo-

lución desde el aprendizaje por recepción a las concepciones alternativas y las teorías implícitas hasta el nacimiento del cambio conceptual, los mecanismos de cambio conceptual y su naturaleza según diversos autores, las estrategias de cambio conceptual, en particular, la enseñanza a través de modelos y algunas investigaciones sobre EA de la FQ en otros países

La *Parte II* constituye la “primera etapa” de la investigación y en ella se caracteriza el pensamiento del profesor en temas de FQ. A través de instrumentos especialmente diseñados, se profundiza la caracterización en aproximaciones sucesivas que dividimos en dos etapas: una *caracterización inicial* del pensamiento de los profesores sobre la ciencia en general, su posicionamiento didáctico frente a la enseñanza, su opinión respecto a la propia formación y sobre aspectos generales de la formación en mecánica cuántica (capítulos 3 y 4), y una *caracterización específica* posterior, en la que se investigaron cuestiones particulares de la formación en MQ surgidas de la caracterización inicial (capítulos 5 y 6). Para cada instrumento de investigación utilizado se presenta: una descripción del instrumento tal como se lo presentó a los profesores, el objetivo general del instrumento (aspecto a investigar), el objetivo o propósito particular de cada pregunta (en caso de las encuestas) o de cada cuestión (en caso de entrevistas o situaciones problemáticas a resolver) y resultados obtenidos e interpretación.

La *Parte III* corresponde a la “segunda etapa” de la investigación. En ella se describe propuesta didáctica diseñada con el objetivo de superar algunas de las dificultades de comprensión detectadas en la caracterización realizada en la primera etapa (capítulo 7) y se analiza la evolución del pensamiento del profesor en temas de FQ (capítulo 8). Para concluir, se identifican etapas en el desarrollo del pensamiento de los profesores y se presentan los resultados a través de diagramas de evolución que describen el proceso.

Para terminar, en el capítulo 9, se presentan las conclusiones generales y sugerencias para futuras investigaciones.

INDICE

Presentación general	1
Índice de contenidos	5
PARTE I: Presentación, planteo del problema y estado del arte	9
Capítulo 1: Planteo del Problema	11
1.1 Enseñanza de la Física Moderna como necesidad curricular	13
1.1.1 Por qué actualizar contenidos curriculares en el área	13
1.1.2 La enseñanza de la física en nuestro país a partir de los '90	19
1.1.3 Los Institutos de Profesorado en física en nuestro país	23
1.2 Las dificultades en la enseñanza-aprendizaje de la FQ. Algo más que ampliación de contenidos	27
1.2.1 Dificultades propias de la Física Cuántica	28
1.2.2 La formación y capacitación de los docentes: una cuestión no trivial	30
1.2.3 El conocimiento didáctico del contenido.....	34
1.2.4 Las propuestas formativas	36
1.3 A modo de síntesis	38
 Capítulo 2: El estado del arte y presentación de hipótesis	 41
Presentación del capítulo y las hipótesis de la investigación.....	43
2.1 Aportes de la didáctica de las ciencias	45
2.1.1 Del aprendizaje por recepción a las concepciones alternativas y las teorías implícitas	45
- Características de la concepciones alternativas y las teorías implícitas	48
2.1.2 La idea de cambio conceptual	50
2.1.3 Los mecanismos de cambio conceptual y su naturaleza	52
- Más de un mecanismo de cambio conceptual	54
- Cuestionamiento a la idea de cambio conceptual como mero desplazamiento de ideas	57
- El cambio conceptual como cambio profundo que opera de modo gradual.....	59
- Otros mecanismos de cambio conceptual.....	61

2.1.4 Las estrategias del cambio	62
- La enseñanza a través de modelos	65
- La aproximación sociocultural.....	69
2.1.5 Algunas implicaciones para la educación.....	70
2.1.6 Síntesis del marco teórico	72
2.2 Las investigaciones sobre EA de la FQ en otros países	74
2.3 Síntesis del capítulo 2: Posicionamiento de la investigación	78
PARTE II: Primera etapa de la investigación: Caracterización del pensamiento del profesor en temas de FQ.....	81
Presentación de las etapas de la investigación	83
Capítulo 3: Caracterización inicial de las concepciones de los profesores (Instrumento de Análisis 1)	87
3. 1 Presentación del Instrumento 1: Encuesta FQ1	89
3. 2 Descripción y objetivos de cada cuestión	95
Capítulo 4: Caracterización inicial. Resultados y conclusiones	101
4.1 Introducción	103
4.2 Resultados de la caracterización inicial	104
4.2.1 Frecuencia de respuestas e histogramas	104
4.2.2 Resultados de la aplicación del análisis de componentes principales mediante SSPS.....	113
4.3 Análisis de los resultados de la caracterización inicial	115
4.3.1 Análisis de los resultados del cuestionario FQ1	115
4.3.2 Caracterización del pensamiento del profesor respecto a la ciencia y a la FQ (categorías obtenidas a partir del SSPS).	119
4.4 Síntesis del capítulo 4	122
Capítulo 5: Caracterización específica de las concepciones de los profesores (Instrumentos de Análisis 2, 3, 4 y 5)	125
5.1 Introducción	127
5.2 Instrumento 2: Cuestionario FQ2.....	128
5.2.1 El por qué de cada pregunta	130

5.3 Instrumento 3: Textos	133
5.4 Instrumento 4: Un experimento ideal (entrevista escrita)	139
5.5 Instrumento 5: Las entrevistas	141
5.6 Cierre del capítulo	145
Capítulo 6: Resultados de la caracterización específica, conclusiones y aportes para el diseño de la una propuesta didáctica	147
6.1 Introducción	149
6.2 Resultados de la caracterización específica	149
6.2.1 La encuesta FQ2	149
6.2.2 Los textos y sus respuestas	163
6.2.3 Un experimento ideal	165
6.2.3 Las entrevistas	168
6.3 Discusión final de los resultados y aportes para el diseño de una propuesta didáctica	193
Parte III: Presentación de la propuesta didáctica y análisis del pensamiento del profesor en temas de FQ	193
Capítulo 7: Presentación de la propuesta e instrumento didáctico.....	199
7.1 Introducción	201
7.2 Marco conceptual general de la propuesta	202
7.3 Metodología	205
7.4 La propuesta	209
7.4.1 Módulo 1: Presentación del curso y relevamiento de expectativas y concepciones iniciales	209
7.4.1a Objetivos del módulo inicial	209
7.4.1b Comentarios generales sobre las actividades del módulo 1	210
7.4.1c Actividades del módulo 1: actividades 1 a 6.....	210
7.4.2 Módulo 2: La evolución de los modelos de la ciencia. El caso de los modelos para la luz	219
7.4.2a Generalidades y objetivos del módulo 2	219
7.4.2b Comentarios generales sobre las actividades del módulo 2	220
7.4.2c Actividades del módulo 2: contenidos, introducción y actividades 7 a 9	221
7.4.3 Módulo 3: Partículas y ondas, dos modelos de la física clásicos	232

7.4.3a Generalidades y objetivos del módulo 3	232
7.4.3b Comentarios generales sobre las actividades del módulo 3.	232
7.4.3c Actividades del módulo 3: contenidos y actividades 10 a 14	233
7.4.4 Módulo 4: El nuevo objeto cuántico	250
7.4.4a Generalidades y objetivos del módulo 4	250
7.4.4b Comentarios generales sobre las actividades del módulo 4	251
7.4.4c Actividades del módulo 4: contenidos, introducción y actividades 15 a 21	252
7.5 Cierre del capítulo	268
Capítulo 8: Resultados de la intervención didáctica y análisis de la evolución del pensamiento de los profesores	271
8.1 Introducción	273
8. 2 Análisis de Pre y pos encuesta. Resultados y Diagramas de evolución	275
8.3 Análisis Global de resultados	325
Los mayores avances	328
Las mayores resistencias	330
8.4 Avances y permanencias en dos estudios de caso	332
- El caso de Sandra	334
- El caso de Daniel	347
8.5 Comentarios de final del capítulo	356
Capítulo 9 final: Síntesis y planteo de perspectivas a futuro	357
Recapitulación y perspectivas.....	359
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	367

PARTE I

Presentación, planteo del problema y estado del arte

Capítulo 1: Planteo del problema

Capítulo 2: El estado del arte y presentación de hipótesis

Capítulo 1

Planteo del problema

CAPÍTULO 1: Planteo del problema

1.1 Enseñanza de la Física Moderna como necesidad curricular

Una de las novedades que planteó la reforma educativa de los noventa, fue la inclusión de contenidos de física moderna en la currícula general. Lamentablemente, la formación de los docentes no pudo acompañar esta propuesta, las instancias de capacitación no dieron los frutos esperados y el tratamiento de la *estructura de la materia* se limitó a una visión general de la composición de los átomos y moléculas desde la fisicoquímica o el tradicional modelo semiclásico de Bohr, y el alcance del concepto de dualidad se restringió únicamente al comportamiento de la radiación. En el mejor de los casos, algunos libros introdujeron un capítulo en que presentaron una descripción del modelo standard con una presencia casi nula de las discusiones epistemológicas de los puntos clave de la mecánica cuántica que motivaron la ruptura con la física clásica, en particular la indiferenciación onda-partícula en el caso de la materia.

1.1.1 Por qué actualizar contenidos curriculares en el área

Como decía Albert Einstein, “la Física es una aventura del pensamiento”, y junto con otras ciencias forma parte de la cultura universal. En efecto, la Física desarrolla la creatividad de los alumnos, incentiva su curiosidad, despliega su imaginación, alienta al razonamiento y por tratarse de una ciencia basada en la explicación de los fenómenos natura-

les y en la experimentación para corroborar los modelos formulados por los científicos, permite el desarrollo de diversas habilidades y destrezas.²

En la actualidad, el mundo cotidiano nos inunda de avances en las telecomunicaciones, la computación, la biología y la medicina, que afectan de manera cada vez más notable nuestras vidas, modelando nuestras costumbres y nuestro accionar diario. Los medios de comunicación nos presentan tecnologías que apenas comprendemos, descubrimientos incesantes y nuevas teorías cada vez más alucinantes. La visión del mundo y de la realidad, se ha modificado de un modo extraordinario tanto para las personas que pertenecen al campo de la ciencia como para el ciudadano común. Lamentablemente, la incesante producción de nuevos conocimientos acontecida durante esos años no fue acompañada de una actualización en la alfabetización científica general.

En octubre de 2005, en el diario español *La Vanguardia*, el profesor Mario Redondo Ciercoles afirmaba³:

“...Es imprescindible que todas las personas posean una mínima formación científica que les permita comprender los grandes hitos, tanto del pasado como del futuro, es decir, un mínimo conocimiento que les capacite para interpretar el mundo que nos rodea. El saber científico debe ser reconocido como expresión cultural y humanista por la sociedad...”

Y más adelante agregaba:

“...si queremos formar ciudadanos verdaderamente críticos y capaces de entender los cambios tan importantes que se están produciendo en el mundo, no debe existir, como hasta ahora, una distancia insalvable entre los avances científicos y el conocimiento que los ciudadanos tienen de ellos. La ciencia constituye en sí un lenguaje que es necesario conocer. Es una de las mayores fuerzas liberadoras de mitos y manipulaciones de todo tipo que padece la especie humana...”

Resaltaba, además, la necesidad comenzar con la formación en ciencias en los niveles más elementales de la enseñanza secundaria.

En los National Science Education Standards, también puede leerse:

² Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, la Asociación de Profesores de Física de la Argentina (APFA) y la Asociación Física Argentina (AFA), (2005), Declaración conjunta en el Año internacional de la Física.

³ Diario *La Vanguardia Digital*, 04/10/05, Peligroso analfabetismo en ciencias. Autor: Mario Redondo Ciercoles (Profesor de Física y Química. Presidente de la Comisión de Enseñanza de la Anque)

“la alfabetización científica se ha convertido en una necesidad para todos: todos necesitamos utilizar la información científica para realizar opciones que se plantean cada día; todos necesitamos ser capaces de implicarnos en discusiones públicas acerca de asuntos importantes que se relacionan con la ciencia y la tecnología; y todos merecemos compartir la emoción y la realización personal que puede producir la comprensión del mundo natural”.

En la Conferencia Mundial sobre la ciencia para el siglo XXI, auspiciado por la UNESCO y el Consejo Internacional para la ciencia se declaraba:

“para que un país esté en condiciones de atender a las necesidades fundamentales de su población, la enseñanza de las ciencias y la tecnología es un objetivo estratégico” (Declaración de Budapest, 1999).

Asistimos, hoy, a una demanda social creciente de educación científica actualizada. La importancia concedida a la alfabetización científica de todas las personas es un tema abordado por investigadores como Bybee y DeBoer (1994); Bybee (1997) y Marco (2000) entre otros muchos. En particular, Rocard et al (2007) puntualizan que la ciencia es una necesidad para todos los ciudadanos y declaran que:

“es absolutamente necesario preparar a los jóvenes para un futuro que exigirá un buen conocimiento científico y una comprensión de la tecnología. La alfabetización científica es importante para entender las cuestiones medioambientales”

y más adelante continúan diciendo:

“el conocimiento científico y tecnológico está llamado a desempeñar un papel cada vez más importante en el debate público, la toma de decisiones y la legislación. Para poder entender las cuestiones que se le plantean y tomar decisiones fundadas, aunque no necesariamente técnicas, el ciudadano necesita tener un conocimiento básico en matemáticas y en ciencias”

Contradictoriamente, a pesar del reconocimiento internacional de este reclamo, los contenidos escolares han quedado detenidos en el tiempo, limitados a la descripción de los principios clásicos desarrollados hasta el siglo XIX, reservando para los especialistas la interpretación de los nuevos modelos que explican el mundo en que hoy vivimos.

Actualmente, se están llevando a cabo reformas educativas, en muchos países, que contemplan la alfabetización científica y tecnológica como una de sus principales finalidades. La importancia concedida a las inversiones en educación para hacer posible el desarrollo *futuro* de un país intenta atender la cuestión. Aún así, la realidad sigue mostrando un grave fracaso escolar, acompañado de actitudes negativas hacia la ciencia y un creciente rechazo de los estudios científicos, principalmente en el nivel medio.

Debemos aclarar, que la alfabetización científica no debe entenderse como una simple ampliación de los contenidos sino, en un sentido más amplio, una oportunidad que habilite a los futuros ciudadanos a desarrollar criterios prácticos y fundamentados sobre la ciencia y el aprovechamiento de sus desarrollos, y a la toma de decisiones adecuadas. Una “verdadera alfabetización científica”, no debería limitarse a la explicación de lo cotidiano y el saber por qué suceden las cosas, debería ser capaz, además, de generar en los jóvenes actitudes críticas frente a la ciencia y el aprovechamiento de sus avances, y favorecer el desarrollo personal del individuo como ciudadano responsable del mundo en que vive. Una alfabetización científica que atienda estas necesidades, no puede entonces dissociarse de un enfoque de ciencia viva, en constante evolución, desarrollándose en un medio social y tecnológico que no sólo condiciona su avance, sino que, a su vez, se ve permanentemente afectado por ella.

Son numerosos los autores que desde hace tiempo insisten en la necesidad de ir más allá de la habitual transmisión de conocimientos científicos, de incluir una aproximación a la naturaleza de la ciencia y a la práctica científica y, sobre todo, de poner énfasis en las relaciones ciencia-tecnología-sociedad (CTS) con vistas a favorecer la participación ciudadana en la toma fundamentada de decisiones (Aikenhead, 1985, Solbes y Vilches 1989 y 1997). La alfabetización científico-tecnológica multidimensional que señala Bybee (1997), “se extiende más allá del vocabulario, de los esquemas conceptuales y de los métodos procedimentales” y contempla otras dimensiones referidas a la historia y la naturaleza de las ciencias que “podrían ayudar a los estudiantes a alcanzar una comprensión y apreciación global de la ciencia y la tecnología como empresas que han sido, y continúan siendo, parte de la cultura”. El reconocimiento de la importancia de la educa-

ción científica y de las dificultades encontradas para su extensión a la generalidad de los futuros ciudadanos y ciudadanas ha impulsado la investigación en torno a la educación científica y tecnológica. De hecho, los logros alcanzados en apenas dos décadas han sido realmente impresionantes (Gabel 1994; Fraser y Tobin 1998; Perales y Cañal 2000). Se plantea de este modo, una escuela más integrada a los intereses de los alumnos y al mundo cotidiano en continuo cambio y evolución.

No podemos ignorar, sin embargo, quienes en una posición discordante, como Feshman (2002b), sostienen que en los movimientos que propician una alfabetización científica general para todos se superponen dos objetivos; uno pragmático (tener un conocimiento básico de los productos científico tecnológicos) y uno democrático (participar de las discusiones sobre las decisiones que las sociedades deben tomar sobre cuestiones científicas y tecno ambientales). Junto con otros autores, consideran que una alfabetización científica y tecnológica para el conjunto de la población es un mito o un objetivo muy difícil de alcanzar (Fensham 2002a y 2002b, Shamos, 1995) e incluso afirman, que cualquier intento en este sentido es un despilfarro de recursos. Las afirmaciones de Fensham se basan en la complejidad de los conceptos científicos implicados y en el hecho de que la mayoría de los productos tecnológicos están concebidos para que los usuarios no tengan ninguna necesidad de conocer los principios científicos en los que se basan para poder utilizarlos. Asimismo, sostiene que el conocimiento científico susceptible de orientar la toma de decisiones, exige una profundización que sólo es accesible a los especialistas. Sin embargo, en relación a esta última afirmación, la historia ha demostrado que la posesión de profundos conocimientos específicos, como los que tienen los especialistas en un campo determinado, no siempre ha garantizado la adopción de decisiones adecuadas.

Hoy, habiendo transcurrido ya algunos años, estas afirmaciones están tan vigentes como en el momento de su publicación.

Podemos preguntarnos entonces, ¿qué Física deben aprender nuestros alumnos y por consiguiente, qué debemos enseñar? La respuesta a esta cuestión es seguramente muy

compleja. Particularmente, desde nuestra posición, entendemos que, sin dejar de reconocer algunas de las afirmaciones anteriores, se necesitan enfoques que contemplen los problemas en una perspectiva más amplia, analizando las posibles repercusiones a medio y largo plazo. La alfabetización científica no debe apuntar a lograr la excelencia, lo cual es claramente imposible en el nivel escolar, sino a brindar un mínimo de conocimientos científicos específicos sobre la problemática estudiada a quienes no serán especialistas en el futuro a fin de que puedan comprender las opciones en juego y participar en la adopción de decisiones fundamentadas, pero que a su vez sirva de umbral para los interesados en profundizar su formación posterior.

En el ámbito educativo, la necesidad de transformar la currícula de Física, y, en general, de las ciencias naturales, a fin de incorporar al aula de secundaria (y aún de primaria), los contenidos actuales elaborados por la comunidad científico tecnológica se ha generalizado en el pensamiento de muchos educadores. Sin embargo, no son menores los obstáculos que deben ser superados para poder cumplir con los objetivos de actualización curricular, entre ellos: a) la gran variedad y cantidad de novedades y temas a introducir y la carencia de diseños que los contemplen, b) las dificultades para comprenderlas con un mínimo nivel de rigor o formalidad, c) las carencias de docentes capacitados suficientemente en estas temáticas y, d) la falta de tradición y recursos adecuados para realizar la innovación en las instituciones educativas.

En referencia a esto último, debemos reconocer como ya dijimos, que los temas involucrados en la comprensión del mundo físico actual requieren construir nuevos conceptos y modelos, aún más alejados de las percepciones intuitivas y del sentido común que los de la física clásica. El reconocimiento de estas dificultades exige de la investigación en didáctica de las ciencias un estudio detenido de cómo lograr dicho objetivo y, muy particularmente, de cuáles son los obstáculos específicos que se oponen a su consecución. A la vez, la formación de docentes actualizados y motivados por su labor es un verdadero problema que también debe ser abordado en mayor profundidad. (Maiztegui et al., 2000).

1.1.2 La enseñanza de la física en nuestro país a partir de los '90

Durante la década de los noventa, Argentina puso en marcha un proceso global de transformación educativa en consonancia con las grandes demandas a nivel mundial de una enseñanza para la comprensión y la alfabetización científica de todos los ciudadanos (Fourez, 1997; Porlán, 1998)

La Reforma Educativa iniciada con la sanción de la Ley Federal de Educación Nro. 24195, el 14 de abril de 1993 introdujo profundas transformaciones en los diseños curriculares y en la propia estructura de la escuela argentina. La Resolución 30/93 del Consejo Federal de Cultura y Educación citaba entre sus finalidades "...la incorporación de los avances científicos y tecnológicos que son imprescindibles hoy para una formación actualizada y para un eficiente desempeño productivo...". El objetivo pretendido fue brindar, a través de la enseñanza, una visión de fundamento más actualizado y una visión más práctica del mundo, con la intención de capacitar a los estudiantes para un desempeño social autónomo y reflexivo, el ejercicio de sus derechos y el cumplimiento de los deberes propios de ciudadanos/as protagonistas en una sociedad moderna y democrática.

En el área de ciencias naturales en particular, se planteó la necesidad de sentar en los alumnos las bases de principios físicos que rigen las nuevas tecnologías, como así también de las teorías científicas actuales, proponiendo, de este modo, una escuela más integrada a los intereses de los alumnos y al mundo cotidiano en continuo cambio y evolución, y una adecuación a la demanda mundial de alfabetización científica. A la vez, se intentó aprovechar la fuerte motivación que algunas cuestiones de la física actual generan en los estudiantes, tanto para la discusión de temas específicos, como de aspectos relacionados con la repercusión social e histórica de la ciencia, tal como ya lo proponía Solbes en 1992.

En el nivel de profesorado, se pretendía una formación de excelencia, estableciéndose la articulación horizontal y vertical de los institutos de formación docente con las univer-

sidades y la especialización en una única disciplina por carrera. Así, los profesorados en Física y Química, o en Física, Matemática y Astronomía, debían optar por una única área de especialización para garantizar una formación más profunda en la especialidad elegida, pero incluyendo también algunos aspectos generales vinculados a otras áreas del saber.

Lamentablemente, los resultados de la transformación educativa no tuvieron los efectos esperados. Si bien hubieron avances importantes, como la ampliación del período de escolaridad obligatoria, la instalación de una noción de currículo más abierto y flexible, una preocupación por la actualización del docente en servicio, también deben consignarse ciertos vaciamientos en el área social en algunos casos, o un enciclopedismo en cuanto a contenidos mínimos en otros, que evidencian, en cierto modo, una incapacidad para definir prioridades de enseñanza (Maiztegui et al., 2000; De Longhi, 2000).

Como producto de esta indefinición, contradictoriamente a la intención primera de lograr la excelencia en la formación y una adecuada actualización en la enseñanza básica y polimodal, durante la implementación de la reforma la enseñanza de la Física, y de otras ciencias, perdió espacios importantes en la currícula. Evidencia de ello es la importante reducción en la carga horaria asignada y una reorganización de contenidos generales en la que Física debió compartir espacios comunes con Química y Biología o, en la que se priorizaban otras áreas según la terminalidad. Esta reducción de horas y consecuente pérdida de status de la física en la currícula marcó consecuencias inmediatas en la demanda laboral que, sumado al carácter unidisciplinar de los profesorados propiciado por la reforma, provocó una disminución muy importante en la matrícula de los profesorados en Física, incluso la desaparición de muchos de ellos. En la provincia de Santa Fe, por ejemplo, sólo una institución en toda la provincia mantuvo el profesorado en Física (Concari et al., 2011). Por otro lado, la transferencia de los servicios educativos nacionales a las provincias, donde la problemática del Nivel Medio concentraba la mayor atención y en las que no siempre se disponía de una estructura propia para la gestión del Nivel Superior, favoreció la fragmentación entre niveles y la desconexión en la enseñanza entre las diferentes provincias del país. Las instituciones transferidas a cada jurisdicción,

modificaron y actualizaron los planes de estudio en base a los recursos disponibles y a los Acuerdos Federales, dando como resultado una amplia heterogeneidad y dispersión de planes de estudio. El análisis de las distintas propuestas muestra que se mantienen debilidades y se sostienen tendencias curriculares históricamente consolidadas, probablemente originadas en las tradiciones previas.

Luego de una década de la puesta en marcha de estos cambios los resultados no fueron los previstos y las consecuencias de este sistema resultaron realmente alarmantes. Esta situación no sólo se evidenció en el fracaso de los alumnos que pretendían ingresar a las diversas carreras universitarias, sino también en la formación integral de los jóvenes, situación que pone a nuestra juventud, y por tanto a la nación, en una posición de gran desventaja frente a los países desarrollados. La formación docente, a su vez, se desarrolló mucho más próxima a la retórica sobre la importancia de la formación que a una sólida planificación de su desarrollo.

Actualmente, en nuestro país, se presenta una nueva oportunidad de transformación de la institución educativa a partir de la sanción de Ley de Educación Nacional Nro.22.206 el 14 de diciembre de 2006. La propuesta dada a conocer por el Ministerio de Educación de la Nación, plantea una estructura unificada del Sistema Educativo Nacional, organizada en cuatro niveles y ocho modalidades. Mientras que los niveles ordenan, organizan y articulan los diferentes tipos de educación común - Educación Inicial, Educación Primaria, Educación Secundaria y Educación Superior -, las modalidades atienden particularidades personales, y/o contextuales. La escolaridad obligatoria se extiende dos años alcanzando la Educación Inicial, Primaria y Secundaria y se reivindican las disciplinas por sobre las áreas. En el nivel secundario, se establecen dos (2) ciclos: un (1) Ciclo Básico, de carácter común a todas las orientaciones y un (1) Ciclo Orientado, de carácter diversificado según distintas áreas del conocimiento, del mundo social y del trabajo.

La aprobación de la Ley de Educación Nacional 26.206, junto con la creación del Instituto Nacional de Formación Docente, constituyeron una importante oportunidad para el despliegue de políticas de formación docente de alcance nacional.

Al día de hoy, la implementación de la propuesta ha sido efectivizada fundamentalmente a nivel de la reorganización de los ciclos de estudios, pero este proceso no viene siendo acompañado de una suficiente discusión crítica de contenidos. La Física enseñada, si bien algunas terminalidades disponen de algunas horas específicas más, sigue estando limitada a los contenidos clásicos en la gran parte de las instituciones. A nivel del profesorado, a pesar de que todos los planes de estudio han incrementado especialmente el tiempo dedicado a la formación en las prácticas docentes, aún se requiere un mayor fortalecimiento en la formación de competencias profesionales específicas, en particular, la formación en didáctica general, se presenta debilitada y las horas de las didácticas específicas muchas veces suplen la falta de contenidos (Resolución CFE Nro. 23/07)

Asimismo, las acciones del INFOD dirigidas a la actualización profesional de los profesores de los Institutos Superiores de Formación Docente (programas de formación específicos de postítulos) no han tenido un impacto significativo en las prácticas. Lamentablemente, a pesar de las múltiples instancias ofrecidas desde instituciones estatales, privadas y universitarias, la escasa planificación y evaluación, resultó en un mercado de ofertas dispersas y desarticuladas, que no lograron mejorar substancialmente la formación integral del profesorado y ni superar el credencialismo individual sin prospectivas. (Resolución CFE N°23/07. op cit)

Por nuestra parte, es nuestro anhelo poder contribuir, desde nuestro ámbito, a una mejor y más actual formación científica de los ciudadanos, al alcance de todos, que, sin pretender formar especialistas, colabore en el desarrollo de estructuras conceptuales adecuadas para comprender el mundo en que vivimos y logre sentar las bases de los modelos científicos actuales. Esta tesis, pretende aportar algunos elementos para ser utilizados en este sentido.

1.1.3 Los Institutos de Profesorado en física en nuestro país

El sistema de Educación Superior en Argentina está integrado por dos subsistemas de nivel superior; un sector está a cargo de Institutos de Educación Superior (Institutos Superiores de Formación Docente e Institutos Superiores de Formación Técnico Profesional) con dependencia de los Ministerios o Secretarías de Educación Provinciales y del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, y otro sector está a cargo de instituciones universitarias (Universidades e Institutos Universitarios) dependientes del Ministerio de Educación de la Nación. Giuliano et al (2011), relevan, 1955 institutos de nivel no universitario y 106 universitarios.

También estos institutos han sufrido cambios importantes a partir de la última reforma de la educación. Como decíamos en la sección anterior, a partir de los años noventa, se desdoblaron los profesorado propiciando la especialización en una única disciplina y se establecieron áreas que comparten una formación básica común, privilegiándose una fuerte formación disciplinar. En el caso de la Física, los tradicionales profesorado en Física, Matemática y Cosmografía, debieron optar por una única especialidad, volcándose la mayoría por Matemática, posiblemente por ser ésta la que ofrece mayor salida laboral dado la cantidad de horas asignadas en la currícula. Esta situación ha contribuido para que Física sea la disciplina con la menor matrícula en las Ciencias Básicas en los últimos años y en la que se ha evidenciado la mayor contracción en el período 2001-2008 comparándola con Biología, Matemática y Química (Giuliano et al., 2011)

Según Concari et al (2012), las instituciones de Educación Superior de gestión estatal que ofrecen carreras que *habilitan* para la enseñanza de Física son 69, de las cuales 21 pertenecen a la Educación Superior Universitaria (ESU) y están localizadas en 18 jurisdicciones nacionales, y 48 pertenecen a la Educación Superior no Universitaria, distribuidas en 15 jurisdicciones. Existen sólo dos jurisdicciones (Tierra del Fuego y Santa Cruz) que no ofrecen este tipo de formación. En la provincia de Santa Fe, en particular, luego de la Reforma de 1993, sólo permaneció en actividad un profesorado en Física en la ciudad de Rosario y recientemente, desde 2011, la ciudad de Santa Fe cuenta con una carrera de

profesorado en Física que aún no completa su primera cohorte de promoción. Esta situación, se repite en otras jurisdicciones y motiva que la enseñanza de la Física en el nivel secundario argentino no siempre haya estado, ni esté actualmente, en manos de profesores formados en la docencia en Física, sino que en muchos casos sean profesores con títulos habilitantes, o profesionales a veces sin formación docente quienes ejercen la docencia en el área (Marchisio et al., 2006, Concari et al 2011).

En lo que hace a la formación pedagógica general, tradicionalmente se ha intentado reparar carencias de la enseñanza habitual fuertemente influenciada por una reducción a los conceptos y al formalismo (González, 2000). Sin embargo, en la mayoría de los casos se evidencia un déficit en los desarrollos de didácticas específicas que establezcan mediaciones entre las áreas disciplinares y las didáctico pedagógicas (Furió, 1994; González, 2001). En este sentido, acordamos con Viennot (1997) en que es necesario superar la dicotomía entre la formación científica y la formación pedagógica reconociendo la necesaria imbricación entre la reflexión educativa y la reflexión sobre el contenido.

Atendiendo a estas cuestiones, y con el objeto de establecer estándares generales para la acreditación de los profesorado universitarios, el Comité Ejecutivo del Consejo Interuniversitario Nacional dispuso en 2012 la creación de una Subcomisión de Acreditación de las Carreras de Profesorado integrada por representantes de diferentes universidades del país (Res. C.E.N° 787/12). Los lineamientos generales para la formación docente propuestos por este organismo mantienen la propuesta de profesorado unidisciplinarios y establecen una organización de las dimensiones para la formación en cuatro campos (tabla 1.1):

- Campo de la formación disciplinar específica
- Campo de la formación pedagógica
- Campo de la formación general
- Campo de la práctica profesional docente

El número de horas de cursado se eleva a dos mil seiscientas para el profesorado para el nivel secundario, reservando mil ochocientas horas para la formación específica y tres-

cientas veinte para la formación pedagógica. Dentro de cada campo, a su vez, se definen Ejes Organizadores que identifican los temas, problemas o procesos centrales de la formación y, con relación a cada Eje Organizador, se definen Bloques y Núcleos Temáticos que especifican los tópicos, problemas de conocimiento y prácticas de formación que deben abordarse.

Tabla 1.1: Campos de la formación docente y carga horaria de Profesorados de Educación secundaria

	Profesorado de Educación Secundaria y Superior	Profesorado de Educación Secundaria
Campos	Carga horaria mínima (hs reloj)	Carga horaria mínima (hs. reloj)
Formación disciplinar específica	1.800	1.600
Formación pedagógica	180	150
Formación general	320	290
Práctica profesional docente	400	360
Horas de asignación libre	200	200
Carga horaria total	2.900	2.600

En cuanto a los contenidos de la formación disciplinar específica en Física, propuestos por los especialistas que trabajaron en el *Proyecto de Mejora para la Formación Inicial de Profesores para el Nivel Secundario* (Secretaría de Políticas Universitarias), los mismos se organizan en cinco núcleos o ejes principales: Mecánica, Electricidad y Magnetismo, Fenómenos Ondulatorios, Termodinámica y Física del Siglo XX, dentro de los que se identifican bloques de contenidos específicos, y núcleos temáticos, como se detalla en la tabla 1.2.

Tabla 1.2: Contenidos sugeridos para la formación específica por el Proyecto de Mejora para la Formación Inicial de Profesores para el Nivel Secundario

Ejes	Bloques	Núcleos temáticos
1. Mecánica	Relación fuerza-movimiento	- Leyes de Newton. Fundamentos de la mecánica newtoniana para cuerpos puntuales y extensos
	Principios de conservación	- Conservación del momento y conservación de la energía

	en la física clásica	para cuerpos puntuales y extensos.
2. Electricidad y Magnetismo	La interacción eléctrica	Fundamentos de Campo Eléctrico: cargas eléctricas, Campos Eléctricos, Energía y trabajo eléctricos, Potencial Eléctrico
	La interacción magnética	- Fundamentos de Campo Magnético: Campos Magnéticos, Corrientes e imanes, Energía en sistemas magnéticos
	Campos estáticos	- Ley de Gauss, Ley de Ampere. - Propiedades eléctricas de la materia. - Propiedades magnéticas de la materia
	Campos Dinámicos	- El campo electromagnético. - Ecuaciones de Maxwell. - Inducción. - Ondas electromagnéticas
3. Fenómenos Ondulatorios	Descripción del movimiento ondulatorio	- Concepto de onda, Propagación. - Ondas transversales y longitudinales, Polarización. Ondas periódicas, Parámetros relevantes, Espectro eletromagnético. - Efecto Doppler.
	Superposición de ondas	- Reflexión, refracción y superposición, Interferencia, Ondas estacionarias. - Principio de Huygens, Interferencia de 2 fuentes, Interferencia en películas delgadas, Difracción. Redes de difracción.
	Óptica geométrica	- Concepto de rayo. Sombras. - Reflexión y refracción de la luz. Reflexión en espejos planos y esféricos. Fórmula de Descartes
4. Termodinámica	Temperatura	
	Calor	
	Leyes de la Termodinámica:	- Primer y segundo principio
	Introducción a la Mecánica Estadística	- Gases ideales - Teoría cinética de los gases ideales - Mecánica estadística
5. Física del Siglo XX	Teoría Especial de la Relatividad	- Revisión de los Principales conceptos de la mecánica newtoniana y de electromagnetismo necesarios para interpretar la TER - Tópicos de Teoría de la Relatividad Especial
	Mecánica cuántica	- La cuantización de la materia, la carga eléctrica y la energía - Fundamentos de la mecánica cuántica y la interpretación de la estructura de la materia
	Astrofísica	- El sistema solar - Estructura estelar - Cosmología

Si bien los contenidos básicos de la formación disciplinar barren las principales áreas de Física, están ausentes algunos conceptos clásicos que consideramos importante consolidar previamente, para fundar la base de los modelos cuánticos. Es el caso, por ejemplo, de pulsos (superposición de ondas de frecuencias cercanas) y las relaciones entre el ancho del pulso y el rango de frecuencias involucrado, conceptos vinculados a la descripción ondulatoria de la materia. Respecto a los conceptos de Física del Siglo XX que han sido tenidos en cuenta, los contenidos propuestos siguen el orden histórico tradicional e incluyen tópicos vinculados a la física cuántica, la relatividad y la cosmología, con fuerte énfasis en el comportamiento corpuscular de la radiación y pocas referencias a la dualidad de la materia y las discusiones epistemológicas que suscitaron la aparición de la mecánica cuántica en la primeros treinta años del siglo XX, lo cual no favorece la evolución del pensamiento clásico hacia los modelos cuánticos. El detalle de estos contenidos, está disponible en el documento citado en el párrafo anterior.

1.2. Las dificultades en la enseñanza-aprendizaje de la FQ. Algo más que ampliación de contenidos.

Los contenidos de Física Cuántica presentan nuevos conceptos que ofrecen especial atractivo, tanto para los alumnos como para los profesores. Sin embargo, esta avidez por conocer no siempre ha sido satisfecha desde la escolaridad. El mayor grado de abstracción de los modelos y conceptos a definir y la falta de una adecuada formación docente, sumada a la extensión y a veces excesiva rigidez de las currículas, ha colaborado para que la información sobre ciertos temas quedara reservada exclusivamente a fuentes extraescolares como revistas de divulgación, programas televisivos, multimedia, etc. (Utges G. et al, 1996 y 1997a), favoreciéndose la desintegración con el conocimiento adquirido en la escuela.

En las dos secciones que siguen, describiremos algunas de las dificultades a las que nos referimos. En primer lugar, las dificultades propias de la física cuántica y a continuación,

las derivadas de la formación de los docentes. Queda también por considerar las dificultades institucionales, pero este aspecto no será profundizado en esta tesis, no por carecer de importancia sino por exceder el campo de investigación que hemos elegido.

1.2.1 Dificultades propias de la Física Cuántica.

“La mecánica cuántica es la descripción del comportamiento de la materia y de la luz en todos sus detalles y, en particular, de los acontecimientos a escala atómica. Las cosas a escala muy pequeña se comportan de forma muy diferente de lo que ustedes puedan imaginar aún. No se comportan como ondas, o como partículas, no se comportan como nubes, o como bolas, tampoco lo hacen como resortes, o como algo que se haya visto alguna vez”
R. Feynman (1971).

Si bien el interés que suscita en los alumnos el tratamiento de temas de ciencias de gran actualidad es una ventaja a la hora de encarar la tarea, la comprensión de la física cuántica exige un nivel de abstracción mayor que otras áreas de la física y un cambio epistemológico que no siempre es tenido en cuenta.

Estos problemas no son exclusivos de los alumnos. Solbes et al., ya en 1987, advierten que la dificultad que tiene la introducción cualitativa de tópicos de FQ asociados a un aparato matemático muy complejo hace que la enseñanza-aprendizaje de estos temas tenga un carácter problemático tanto para alumnos como para profesores. Esto se debe, por un lado, a que las dificultades de comprensión que enfrentan los profesores durante su formación son similares a las detectadas en los alumnos (Porlán, 1997, op. cit), y por otro lado, a la escasez de propuestas de enseñanza de la FQ para el nivel medio, lo cual, a la larga, se traduce en un rechazo o falta de interés por la enseñanza de estos temas.

Las secuencias tradicionales de enseñanza de los fenómenos cuánticos, en su mayoría incluyen presentaciones “iniciales” que parten de niveles concretos de razonamiento en los que necesariamente se recurre a la búsqueda de “analogías”, “imágenes” o “mode-

los intuitivos” tomados de contextos que poco tienen que ver con el mundo de las micropartículas. Incluso en los libros de texto, son usuales las presentaciones de los modelos atómicos cuánticos en las que se recurre a conceptos clásicos para explicar los fenómenos que justamente obligaron a abandonar dichas concepciones (Solbes et al., 1987). Esta contradicción, genera representaciones que no siempre facilitan una comprensión significativa en acuerdo con las concepciones consensuadas por la comunidad científica y que, por el contrario, funcionan como obstaculizadores del aprendizaje (este tratamiento es común incluso en la enseñanza superior). Por otro lado, preconcepciones adquiridas en forma extraescolar a través de revistas de divulgación, material informativo diverso, videos documentales, interacción entre pares, etc., refuerzan la resistencia natural a abandonar la seguridad de concepciones intuitivas por modelos de carácter más axiomático, propios de esta área (Martín Díaz y Bacas, 1996).

Por otro lado, tampoco hay consenso entre los investigadores en relación a la introducción de modelos atómicos. Así, Fischler y Lichtfeldt (1992) se manifiestan en contra el uso del modelo de Bohr u otras descripciones del átomo que incluyan órbitas y por el contrario, Petri y Niedderer (1998) piensan que el modelo de Bohr constituye un paso necesario en el camino del aprendizaje del estudiante. Algunos autores, aprecian el modelo de Bohr como un paso histórico importante por entender los átomos (Blanco y Níaz, 1998; Justí y Gilbert, 2000), y otros, lo valoran como una herramienta útil que permite introducir de forma sencilla el concepto de estado, caracterizado por los valores definidos de unas magnitudes, la energía y el momento angular (Kalkanis et al. 2003; Solbes, 1996; Solbes y Sinarcas, 2009).

La FQ supone la propuesta de nuevos modelos explicativos y la definición de nuevos conceptos alejados de la experiencia cotidiana que no son fáciles de asimilar. Así, las partículas ya no siempre pueden localizarse, su velocidad y posición no pueden determinarse simultáneamente, la masa y la energía son entes equivalentes, los “objetos” ya no tienen el carácter material y concreto de la física clásica, se desvanece la división tradicional entre la física de los campos y ondas por un lado y la mecánica de la partícula por otro. Si bien algunos conceptos de la FQ tienen un fuerte anclaje en la física clásica (mu-

chos de ellos ya han sido definidos dentro de la mecánica o el electromagnetismo como la posición, la cantidad de movimiento, el momento angular, carga eléctrica, momento magnético, etc.), tienen ahora connotaciones diferentes, y o extrapolan significados de los campos de conocimiento en que fueron creados (longitud de onda, paquete de onda, frecuencia, amplitud de onda, noción de probabilidad, etc.). Esta dificultad lleva a algunos autores a considerar que la plausibilidad y la potencialidad explicativa de la física cuántica recién pueden apreciarse cuando se ha adquirido un buen manejo del formalismo (Fischler, 1992).

Por nuestra parte, estamos convencidos que, al menos para el nivel medio, es necesaria una presentación de la Física Cuántica que prescinda en lo posible del formalismo que la caracteriza, sin incurrir en errores conceptuales ni epistemológicos. Por ello, antes de diseñar cualquier estrategia de enseñanza, debemos analizar cuidadosamente cuáles son las ideas básicas que quieren enseñarse y que constituyen la piedra basal de la física cuántica. Debemos tener en cuenta que la comprensión de los modelos de la FQ implica además cambios epistemológicos y la superación de obstáculos de aprendizaje que será necesario caracterizar, antes de plantear cualquier solución.

1.2.2 La formación y capacitación de los docentes: una cuestión no trivial

La incorporación de nuevos contenidos a enseñar plantea diversas dificultades que deben ser abordadas específicamente y que no pueden ser soslayadas si quiere garantizarse el éxito de cualquier transformación. Atender la enseñanza de la Física Moderna desde un punto de vista didáctico nos lleva, entonces, a considerar como aspecto prioritario la formación de los profesores (Solbes, 1986).

Son muchos los autores que se preocupan por las actitudes de los profesores ante cambios curriculares que impliquen modificaciones en su formación. Por un lado, existe cierta resistencia entre los docentes a la ampliación de contenidos, independientemente

del área de que se trate. A. Oñorbe (1996), destaca entre las razones que suelen esgrimirse en contra de la introducción de nuevos conceptos en los currículos, las siguientes:

- las nuevas teorías son muy complicadas,
- se necesitan muchos conocimientos previos para poder comprenderlas,
- los programas son muy extensos,
- es preferible enseñar los fundamentos clásicos en un orden histórico,
- los profesores no tienen la formación específica adecuada,
- los profesores no disponen de mecanismos para adaptar los nuevos conocimientos a la comprensión de los alumnos.

A su vez, Solbes (1996), comenta que *todo tema nuevo* suele ser considerado difícil y no apto para la enseñanza. Señala que algo similar ya ha sucedido con tópicos de otras ramas de la Física hoy tradicionales pero controvertidos en su momento, como lo fueron la teoría electromagnética, los campos y ondas, etc. Advierte, además, que algunas veces, se atribuyen las dificultades a la matemática y se considera que debe reservarse el tratamiento del tema para la universidad. Tal suele ser el caso de la Física Moderna.

No menos importante, es la cuestión que la investigación sobre la formación de profesores ha puesto de manifiesto respecto de las ideas con las que los profesores llegan al aula. Así como los alumnos llegan al aula con ideas elaboradas sobre el mundo, los profesores tienen concepciones propias sobre la ciencia, la enseñanza, el aprendizaje y la evaluación, que determinan cómo enseñan ciencia y qué ciencia enseñan (Porlán et al., 1997). En tal sentido, la investigación educativa ha puesto de manifiesto la importancia de considerar dichas preconcepciones docentes (ideas, comportamientos y actitudes) como un factor decisivo para el éxito de una verdadera transformación. Las instancias de formación que no tienen en cuenta este aspecto no logran los resultados esperados, los profesores modifican su discurso, pero las modificaciones en su práctica son temporales (Angulo Delgado, 2003).

Un verdadero proceso de transformación implica tener en cuenta además otros aspectos específicos. Al respecto Mc Dermott (1990), ha señalado la necesidad de superar una

concepción de la formación de profesores como una mera suma no integrada de saberes disciplinares y pedagógicos. Briscoe (1991), por otro lado, advierte que a pesar del gran entusiasmo que adquieren los docentes en los programas de capacitación, al cabo de poco tiempo, muchos de ellos se desilusionan y terminan regresando a las prácticas habituales. A su vez, Cronin-Jones (1991) señala como obstáculo las grandes brechas que suelen existir entre los diseños curriculares y lo que efectivamente se implementa en el aula. En este sentido, Roccard et al (2007), afirman que a menudo los profesores se resisten a los cambios y escogen la metodología tradicional.

Se plantea así la necesidad de profundizar la alfabetización científica de los profesores, generando estrategias tendientes a:

- sentar las bases en los docentes de la necesidad de un verdadero proceso de cambio didáctico y metodológico,
- transformar sus concepciones respecto de la capacitación y enseñanza tradicionales,
- investigar y desarrollar estrategias específicas que aporten herramientas facilitadoras de la trasposición didáctica,
- establecer modos de relación entre investigadores y maestros, profesores, formadores de formadores, etc., de forma tal de complementar esfuerzos para llevar adelante la transformación.

Estas cuestiones forman parte de una problemática muy vasta e importante que va más allá del contenido específico de que se trate.

En el caso de la física cuántica en particular, se suman otras varias cuestiones que deberemos tener en cuenta. Diversas opiniones recogidas entre profesores de institutos de formación coinciden en que si bien en la currícula tradicional de los profesorado, se incluían temas de Física Moderna, estos han sido muchas veces relativizados en su importancia pues se los considera necesarios para la *cultura científica* del profesor pero no siempre se piensa en abordarlos en la práctica docente en el nivel medio (Fernández et al., 1997). Simultáneamente, la amplitud enciclopédica de las currículas, sumada a la

escasez de tiempo y una veloz secuenciación de contenidos, se constituye en obstáculo, no sólo para una formación disciplinar sólida en estos temas, sino para la discusión de la transformación de concepciones que supone la interpretación del mundo natural desde la visión de la ciencia actual.

Por otro lado, los estudios publicados referidos a los problemas que suscita la enseñanza aprendizaje de los conceptos de la física cuántica, y que detallaremos en las secciones que siguen, generalmente tratan la cuestión desde la perspectiva del alumno. Si bien hoy sabemos que muchas de las dificultades de comprensión detectadas no son exclusivas de los adolescentes sino que también se plantean en el nivel de formación docente (Solbes et al., 1988), la problemática es más amplia e involucra aspectos vinculados al desarrollo de las didácticas específicas. Las investigaciones que abordan las dificultades que enfrentan los docentes desde una perspectiva amplia que considere la elaboración de modelos y conceptos, el relevamiento de obstáculos epistemológicos, el diseño de herramientas didácticas y de alternativas de implementación son escasas.

En este sentido, debemos rescatar la necesidad de desarrollar una didáctica específica para la enseñanza de la física cuántica. La investigación educativa cuestiona los modelos en que la formación se reduce a una “sumatoria” de conocimientos disciplinares y pedagógicos (McDermott, 1990, Maiztegui et al. 2000) con poca vinculación a la realidad del aula (Moreira, 1995) y cada vez son más los sectores que encuentran en las didácticas específicas un campo específico de desarrollo de conocimientos y un eje estructurante para el proceso formativo (Brousseau, 1990; Furió, 1994, Viennot, 1997)

La física del mundo contemporáneo, aún no tiene en la investigación en didáctica de las ciencias un espacio suficientemente importante. En atención a esto, nuestro interés es aportar sugerencias para una formación amplia y coherente de los futuros docentes, que les facilite arbitrar estrategias didácticas para una presentación sencilla pero significativa de los tópicos de la Física Cuántica. En esta investigación nos proponemos analizar los modelos de los profesores en formación en temas de Física Cuántica, como punto de partida para el diseño de una propuesta curricular en el tema.

1.2.3 El conocimiento pedagógico del contenido

En el apartado anterior insistimos en que la formación y capacitación de los docentes no es una cuestión simple de resolver y es una línea de investigación muy importante en enseñanza de las ciencias (González 1994). Los docentes enfrentan múltiples carencias y dificultades al abordar una tarea de enorme complejidad. Estos problemas ha sido estudiado por diversos autores (Maiztegui et al 2000; Mellado, 2001; Porlán et al, 2010). Sin embargo, es desde la aportación de Shulman (1986) sobre el Conocimiento Didáctico del Contenido (CDC) – (Pedagogical Content Knowledge) que la formación del profesorado se ha orientado hacia un mayor compromiso con el contenido concreto a enseñar.

Dar sentido al conocimiento pedagógico en relación con la docencia de un área de conocimiento, requiere un proceso complejo de reflexión en la acción que lleva a establecer nuevas concepciones epistemológicas y un conocimiento diferenciado de lo pedagógico y de lo disciplinar para una problemática también diferenciada (la enseñanza de la disciplina) (Porlan et al. 2010).

Shulman (1986) considera que el CDC incluye también las formas de representar y formular el contenido para que sea comprensible a otros. Así mismo incluye una comprensión de los aspectos que facilitan o dificultan el aprendizaje de temas concretos: las concepciones y preconcepciones de los estudiantes cuando se enseñan estos temas.

En la medida que ha ido avanzando la investigación en formación del profesorado y en sus concepciones, estos conocimientos han ido ampliando su significado. Actualmente se habla de Conocimiento Práctico Profesional (CPP) (Porlan et al 1996, Bradbury 2010). El CPP no es una mera aplicación de la teoría en la acción educativa, sino que como cualquier otro conocimiento profesional surge de la investigación y resolución de problemas relevantes del ámbito disciplinar o profesional (Schön 1992).

Una de las dificultades para el cambio educativo son las creencias docentes de sentido común o *epistemología personal docente*, construidas a partir de su experiencia como

alumno, y posteriormente, como profesor (Gil 1991b, Bryan y Abell 1999, Munby y Russel 1998). Dichas creencias o visiones se reciclan acríticamente en la práctica institucional (Van Driel 2001). Entre los principales obstáculos para el cambio epistemológico del profesorado se encuentran (Maiztegui 2000, Mellado 2003, Porlán y Martín del Pozo 2004, Guisasola y Morentin 2007, Fernández et al. 2002): a) la creencia que enseñar es fácil y que basta con la transmisión de los contenidos; b) el desconocimiento de la existencia e importancia de las ideas previas de los estudiantes que condicionan y contextualizan su aprendizaje; c) sus visiones deformadas sobre la ciencia, cargadas de empirio-inductivismo, academicismo-elitismo, donde el conocimiento es considerado un producto cerrado y verdadero que no tiene en cuenta su progresión epistemológica y su permanente cambio; d) la aceptación de un currículo amplio y superficial con objetivos principalmente propedéuticos frente a un currículo coherente y adaptado al contexto social del estudiante.

En coincidencia con Valbuena (2007) consideramos que el Conocimiento Profesional Docente debe asumirse desde una perspectiva evolutiva, como una hipótesis de progresión en la que se reestructura el conocimiento “de hecho” del profesor hacia un conocimiento de mayor complejidad. Numerosos autores reconocen al conocimiento didáctico del contenido (CDC) como componente central del conocimiento profesional docente (Shulman, 1989; Gess-Newsson y Lederman, 2003; Michelini et al., 2013).

Teniendo en cuenta las contribuciones de la investigación educativa respecto al conocimiento profesional del profesorado (Gil 1991b; Abell, 2007; Furió y Carnicer 2002; Solbes et al., 2012 y 2013), debe entenderse que el CPP incluye:

- el conocimiento de la disciplina, referido a la cantidad de contenidos y organización de los mismos; lo que incluye a su vez conocer además la historia de las ciencias; las metodologías que los científicos utilizan para resolver los problemas y construir conocimientos; las interacciones CTS; los desarrollos científicos recientes y sus perspectivas; y seleccionar y secuenciar los contenidos didácticos adecuados.

- el conocimiento pedagógico, referido a la gestión de aula, los principios instruccionales, los objetivos educativos, etc. Aquí incluiríamos la utilización de las TIC, no consideradas por Shulman por las fechas en que desarrolló el modelo.
- el conocimiento didáctico del contenido (CDC), es decir, las formas de presentar y formular la materia de forma que la haga comprensible, que pueden provenir de la investigación o de su propia práctica reflexiva. Incluye estos 5 aspectos:
 - *orientaciones hacia la enseñanza de las ciencias*, que hace referencia al conocimiento más general para enseñar, a la visión y propósito de la enseñanza de la ciencia
 - *conocimiento sobre el currículo de ciencias*, entendido como la programación de la materia que se ha de enseñar y la variedad de materiales disponibles para su enseñanza, así como las características que permiten determinar qué programar y qué aspectos trabajar o no en cada circunstancia particular.
 - *conocimiento sobre estrategias de instrucción para enseñar ciencia* referido a estrategias de cambio conceptual o enseñanza orientada en base a preguntas o estrategias para ayudar a entender un concepto determinado.
 - *conocimiento sobre los estudiantes de ciencias* que implica conocer lo que sabe un estudiante sobre un concepto, las posibles concepciones alternativas y los aspectos que le pueden crear dificultades, así como motivación, estilo de aprendizaje, intereses o niveles de desarrollo de los estudiantes.
 - *conocimiento sobre evaluación en ciencias*, que supone saber qué es importante evaluar y conocer los métodos por los que el aprendizaje puede ser evaluado, para lo que se necesita conocer los instrumentos y actividades específicas.

1.2.4 Las propuestas formativas

Recientemente Lynn Taylor y Rege Colet (2010) señalan críticas al concepto de desarrollo docente y teorizan el concepto de “desarrollo educacional” como el más acorde con la realidad actual, y que recoge todos los aspectos (instruccionales, profesionales, curri-

culares, académicos y organizativos) que permiten a las universidades constituirse en organizaciones que optimizan su capacidad de enseñar y aprender (Senge, 1996).

En el área de la formación docente se ha empezado a comprender que los esfuerzos de innovación en la enseñanza de las ciencias pierden gran parte de su capacidad transformadora si quedan en aportaciones puntuales ("preconcepciones", "prácticas de laboratorio", "enfoque CTS"...) (Furió y Carnicer, 2002; Furió et al., 2008). Por otro lado, se evidencia la escasa efectividad de la *transmisión* al profesorado de las propuestas para su aplicación. Como ha indicado Briscoe (1991), es necesario que los futuros profesores *participen en la construcción* de los nuevos conocimientos didácticos, abordando los problemas que la enseñanza plantea. La investigación señala que, pese a que los cursos y seminarios de corta duración son los más comunes, las estrategias más efectivas están a menudo asociadas con intervenciones que exigen el aprendizaje activo y experiencial a lo largo del tiempo (Prebble et al. 2004; Steinert et al., 2006; Solbes et al 2011; Stes, Clement y Van Petegem, 2011). La relación efectiva entre pares e iguales, tutorías, intervenciones bien diseñadas de acuerdo con los principios del aprendizaje y la enseñanza, el trabajo prologando donde los docentes pueden replantear sus concepciones a partir de reflexionar sobre su práctica y sobre actividades concretas de enseñanza (Solbes et al 2011, Garmendia et al 2013) y el uso de diversos métodos educativos, son especialmente relevantes para un efectivo desarrollo docente (Steinert et al. 2006, Guisasola et al 2007).

La investigación educativa ha mostrado también la eficacia de conformar grupos con docentes de una misma institución, facilita la aplicación de las propuestas en sus lugares de trabajo (De Longhi, 2007; González 2010), en el sentido de generar comunidades de práctica (Greca y González, 2002) o ampliar y consolidar una genuina *comunidad de Formadores de Formadores* como la denominan Furió y Gil (1989).

Para el caso específico que se considera en esta tesis, es decir, para la formación en el conocimiento didáctico o práctico profesional en temas de física cuántica, las dificultades pueden ser aún mayores, ya sea por su carácter anti intuitivo y que requiere

de un conocimiento muy amplio de la física clásica, como porque exige una ruptura epistémica. A tales fines, la tarea formativa puede valerse de distintas estrategias: presentaciones de algunas experiencias que resolvieron problemas cruciales, tratamientos cualitativos con la menor dificultad matemática posible, considerar distintas aplicaciones tecnológicas e incluso abordar debates actuales de interpretación que están en los medios de comunicación masiva y en Internet. En todos estos casos se debe ofrecer una mirada de conjunto que pueda servir de anclaje o de integrador, que es la noción de ruptura del objeto clásico y la emergencia de la dualidad onda partícula.

1.3 A modo de síntesis

En síntesis, reconocemos la necesidad de una alfabetización científica actualizada, pero somos conscientes de que una efectiva implementación implica considerar varias cuestiones dignas de ser analizadas. Si bien existe consenso respecto de la necesidad de actualizar y profundizar los contenidos de ciencias, el camino para conseguir este objetivo no está definido.

Nos interesan, en particular, los conceptos y modelos de la física cuántica, por ser ésta un área desarrollada en el último siglo a la que aún no se le ha reconocido un espacio en la enseñanza y porque sus modelos han posibilitado un crecimiento exponencial de la ciencia y la tecnología. Este crecimiento fue acompañado de la generación de innumerables aplicaciones que día a día mejoran la calidad de vida del hombre y posibilitan, a su vez, avances en otras ramas de la ciencia, como en el caso de la medicina, la biología y las comunicaciones entre otras.

La física cuántica proporciona los fundamentos de muchos de los adelantos tecnológicos que nos rodean y que fascinan a los estudiantes, sin embargo, la comprensión de los conceptos y modelos involucrados ofrecen especiales dificultades. Algunas de estas dificultades tienen su raíz en la complejidad de los temas, la abstracción de los conceptos, la definición de nuevos modelos, el formalismo, pero no son estos los únicos aspectos

tos ni los más importantes. La profundización en contenidos no puede por sí sola garantizar el éxito de cualquier innovación.

La investigación didáctica nos ha mostrado que deben tenerse en cuenta otros aspectos, además de la formación académica. Las concepciones de los profesores, sobre el mundo y sobre la enseñanza de las ciencias, sus actitudes frente a la enseñanza, su concepción del aprendizaje, podrían constituirse en verdaderos obstáculos para el aprendizaje si fuesen ignoradas. Algunas de las dificultades mencionadas han sido caracterizadas para el nivel de estudiantes, pero necesitamos establecer si estas dificultades de los estudiantes se reproducen en la formación docente. Por ello, la enseñanza de la física cuántica ofrece un campo de estudio y aún no ha sido suficientemente explorado.

Por otro lado, desde el ámbito institucional, ha habido algunos intentos de actualizar la currícula de ciencias, pero las propuestas de transformación no han aportado cambios importantes hasta el momento.

A partir de estos enunciados es nuestro interés investigar:

- ¿Cuáles son las concepciones y los modelos de los futuros profesores de Física respecto de la Ciencia y particularmente sobre la Física Cuántica?
- ¿Cuáles son sus dificultades en cuanto a la comprensión de estos temas y para establecer un puente entre el conocimiento científico y el conocimiento escolar deseado?
- ¿Qué estrategias didácticas podrían sugerirse para facilitar la transposición didáctica y el acercamiento de los profesores a una mejor comprensión de los modelos de la Física Cuántica (relaciones de incerteza, concepto de localización, dualidad onda-corpúsculo, orbitales, etc.)?

Como dice Deligeorges (1990), *"...no nos engañemos, la mecánica cuántica es muy abstracta, difícil, sin relación alguna con nuestras intuiciones sobre la materia, sobre las «cosas». Un desafío, porque presenta delicadas dificultades de interpretación, un tupido bosque de interpretaciones con frecuencia divergentes entre sí. Esto es suficiente para excitar nuestra curiosidad, y partiendo de ello nos hemos lanzado el reto..."*

Capítulo 2

Estado del arte

y

presentación de hipótesis.

CAPÍTULO 2: El estado del arte y presentación de hipótesis.

Las hipótesis de la investigación

Como decíamos en el capítulo anterior nos interesa investigar:

- ¿qué dificultades enfrentan los docentes que se proponen enseñar física cuántica en un nivel medio avanzado o universitario básico?
- ¿cuáles son sus causas?
- ¿cómo podrían superarse esas dificultades?, y
- ¿cómo facilitar la implementación del tema en las aulas?

Las dificultades que enfrentan los profesores las hemos dividido en dos tipos: las referidas a la formación específica y las derivadas de la carencia de propuestas concretas para la implementación del tema en las aulas.

En este sentido, también hemos dividido las hipótesis que guían esta investigación en dos campos que intentarán responder a las preguntas planteadas en el capítulo 1 y resumidas en el párrafo anterior:

Primera hipótesis: existen concepciones alternativas y carencias formativas en los docentes de nivel medio referidas a las ideas básicas de la física cuántica, las cuales actúan como obstáculo para la enseñanza de dichos temas.

Segunda hipótesis: es posible avanzar en el conocimiento de los aspectos básicos de la física cuántica por los profesores de física de nivel medio, mediante actividades formativas orientadas como situaciones problemáticas a resolver o modelar donde se tomen en cuenta los obstáculos mencionados en la primera hipótesis.

En cuanto a la primera hipótesis, nuestro planteo indica claramente que el problema radica, no sólo en una falta de formación, sino también en la existencia de concepciones

o preconcepciones que funcionan como obstaculizadores del aprendizaje. Entendemos que, si bien algunas de estas concepciones surgirían a partir de conocimientos adquiridos en forma extraescolar, otras son fruto de elaboraciones personales a partir de una formación incompleta y otras son extrapolaciones de conceptos definidos en la física clásica, extendidos más allá de los límites de validez. Debemos agregar que en alguna medida estos problemas son consecuencia de una falta de formación en la propia física clásica. En ese sentido, la formación de los docentes en los temas de la cuántica incluyen una demanda adicional de formación en otras ramas más básicas.

Además de estas limitaciones, una idea simplista de la de ciencia, como conocimiento cierto y cerrado, acabado, funciona también como barrera para visualizar que existen límites de validez para los modelos clásicos, y que han sido necesarias verdaderas rupturas epistemológicas a lo largo de la historia para posibilitar el nacimiento de la física cuántica. En la primera parte de nuestra investigación, nos proponemos caracterizar las principales dificultades que ofrecen algunos tópicos considerados pilares de la física cuántica.

En cuanto al segundo tipo de dificultades, creemos que, si identificamos los núcleos que ofrecen mayores dificultades de comprensión, es posible diseñar una alternativa didáctica que colabore en superar los obstáculos detectados y, a la vez, permita a los docentes generar sus propios diseños para llevar al aula. Dicha propuesta estará orientada por visiones actualizadas de la investigación educativa en ciencias. En ese sentido nos hemos apoyado en diferentes líneas de investigación surgidas a partir del desarrollo de la didáctica de la ciencia en los últimos años y, más concretamente en investigadores anteriores en distintos países sobre los contenidos que nos interesan. Ello será contextualizado a través del análisis de los contenidos de física propuestos para los profesorados en física en nuestro país.

Desarrollamos a continuación la fundamentación de las hipótesis planteadas, desde estas perspectivas.

2.1 Aportes de la didáctica de las ciencias.

En esta sección introducimos algunos aportes de investigaciones que servirán de fundamento de las hipótesis de trabajo. Incluimos aspectos de la evolución histórica del área con el ánimo de mostrar los importantes avances de la didáctica de las ciencias en las últimas décadas (Porlán 1988, Aduriz Bravo 2002, Solbes 2009 a y b, Duit 2009), en las cuales se han logrado consensos importantes en el sentido de cómo orientar la enseñanza para lograr mejorar la calidad formativa de docentes y estudiantes y donde se han puesto en evidencia algunos de los capítulos fundamentales de un saber en desarrollo.

2.1.1 Del aprendizaje por recepción a las concepciones alternativas y las teorías implícitas

La tendencia dominante hasta aproximadamente fines de los setenta, era considerar al estudiante como una “tabula rasa” sobre la que el docente podía “imprimir” los conocimientos a enseñar (Pinker, 2000). Desde esta perspectiva el aprendizaje se basaba en atender, entender y repetir. Sin embargo, la experiencia mostraba que esta descripción era al menos incompleta ya que un gran porcentaje de estudiantes no lograba comprender los conceptos científicos más básicos a pesar de la insistencia y repetición con que habían sido enseñados.

Debemos reconocer que, si bien ésta era la tendencia dominante, ya entonces había en desarrollo todo una serie de estudios y corrientes educativas que cuestionaban estas visiones simplistas y que, desde la psicología del aprendizaje o desde la pedagogía, insistían en la necesidad de considerar al sujeto de aprendizaje haciendo hincapié en la interacción y en la actividad del mismo (Piaget 1969, Gimeno Sacristán y Pérez Gómez 1995), cuestionando la obsesión por objetivos, el modelo proceso producto y todas aquellas orientaciones donde no se consideraba el desarrollo del sujeto. Aparecía entonces la idea de organizar la enseñanza por actividades, las que, en palabras de Cañal

(2001) son conjuntos organizados y orientados de tareas escolares, realizados por los alumnos o el profesor.

En el campo específico de la enseñanza de las ciencias, diferentes estudios emprendidos a principios de la década de los ochenta, pusieron en evidencia que, por el contrario de los formatos de tabula rasa, los alumnos llegan a la instrucción con algún tipo de conocimiento previo sobre los fenómenos y conceptos a ser enseñados. Por esa misma época Viennot en 1979, probaba en Francia estos hechos en su tesis e iniciaba, así, una nueva línea de investigación sobre lo que inicialmente se denominaron *errores conceptuales* que ocupó gran parte de la investigación didáctica de los años siguientes, intentando indagar las causas de los mismos y desarrollar propuestas de enseñanza para superarlos.

Durante más de tres décadas, los investigadores han buscado concepciones preinstruccionales de los estudiantes, referidas a la Física (por ejemplo, circuito eléctrico, la fuerza, la energía), la química (por ejemplo, enlace químico, combustión, la naturaleza de la materia) y la biología (por ejemplo, fotosíntesis y la respiración, la genética, la evolución) (Duit, 2009). Estos estudios pusieron en evidencia, entonces, que los estudiantes poseen creencias, construidas a lo largo de su vida, arraigadas profundamente y que defienden con argumentos que revisten verdadera coherencia para ellos, aunque no siempre son compatibles con las ideas de la ciencia (Carrascosa, 2005; Pinto et.al, 1996; Solbes, 2009 a y b). Confirmando esta hipótesis, Gilbert et al. (1982) mostraron que los estudiantes no son aprendices pasivos y que la manera en que dan sentido a sus experiencias los lleva a construir un tipo de conocimiento denominado por estos autores “*children’s science*”, que resulta ser consistente con sus creencias pero suele diferir, e incluso a veces estar en franca contradicción, con los modelos que desde la instrucción se pretende enseñar. Además, estos puntos de vista a menudo se sostienen firmemente, son resistentes al cambio y presentan difíciles desafíos para los profesores de ciencias y los investigadores de la educación científica.

La diversidad de estudios emprendidos por diferentes autores y en diferentes países, generó una diversidad terminológica para referirse a las ideas de los niños previas al

aprendizaje escolar (preconceptos, preconcepciones, ideas previas, ideas alternativas, teorías implícitas, teorías ingenuas, ciencia de los niños, esquemas conceptuales alternativos, representaciones, etc.) que motivó a Wandersee et al. (1994), a proponer denominarlas genéricamente concepciones alternativas, independientemente de cómo fueron adquiridas. Abimbola (1988), llegó a detectar hasta 28 términos distintos para nombrarlas.

La caracterización de este conocimiento previo no es nada fácil ya que las ideas que los alumnos (o profesores) expresan en cuestionarios y entrevistas no son concepciones reales sino manifestaciones externas mediatizadas por el contexto y la tarea, entre otros factores. En palabras de Oliva (1999) “las concepciones que se detectan no son sino la punta del iceberg que asoma sobre la superficie del agua”. De ahí que siempre exista cierto grado de indeterminación entre lo que los alumnos (o profesores) manifiestan y el conocimiento que realmente hay detrás (Dykstra et al., 1992).

Casi paralelamente, en la década de los noventa comenzaron a surgir estudios que desde la psicología cognitiva, incorporaron aspectos vinculados a la cognición social y el pensamiento colectivo, como el concepto de *teoría implícita*. Autores como Pozo et al. (1992 y 1995) y Rodrigo et al. (1993) resumen el paralelismo entre las características de las concepciones alternativas y las teorías implícitas como representación de las teorías personales de los individuos en el marco de la enseñanza de la ciencia. Pozo (1992), establece la existencia de estructuras o esquemas con cierto grado de generalidad que explicarían las regularidades encontradas en el pensamiento intuitivo en diversas ocasiones. Por su parte, Rodrigo et al. (1993), analizan las diferencias entre las teorías científicas y las teorías implícitas, las cuales resultan ser, en algún sentido, análogas a las diferencias entre expertos y novatos, de ahí que algunos entiendan el aprendizaje de contenidos científicos, como un proceso de explicitación de las teorías personales y su transformación hacia posiciones más próximas a la ciencia formal.

Mucho tiempo antes que la investigación educativa se interesara por los conocimientos implícitos, en 1838, Bachelard afirmaba “me ha sorprendido siempre que los profesores

de ciencias, en mayor medida, si cabe, que los otros, no comprendan que no se comprenda [...] No han reflexionado sobre el hecho de que el adolescente llega a la clase de física con conocimientos empíricos ya constituidos: se trata, pues, no de adquirir una cultura experimental, sino más bien de cambiar de cultura experimental, de derribar los obstáculos ya acumulados por la vía cotidiana”, (Bachelard, 1968). También Ausubel (1978) se pronunciaba diciendo: “si yo tuviera que reducir toda la psicología educativa a un solo principio, enunciaría este: averígüese lo que el alumno ya sabe y enséñese consecuentemente”.

Otro enfoque teórico, emparentado con las teorías implícitas, toma de la psicología computacional, la idea de *modelos mentales* (Greca y Moreira 2002). Las investigaciones advierten, en este caso, que los modelos mentales intuitivos no son tan precisos ni completos como los científicos, son modelos funcionales, construidos *in situ*, para cada ocasión y consecuentemente, de coherencia limitada.

Características de las concepciones alternativas y las teorías implícitas

Como decíamos antes, existe una gran diversidad terminológica utilizada para referirse a las ideas construidas antes de la instrucción. García Hourcade y Rodríguez de Ávila (1988) presentan un trabajo intentando clarificar las diferentes acepciones sobre el tema. No es objeto de esta tesis realizar una distinción exhaustiva entre estos términos, simplemente nos limitaremos a decir que consideraremos como una preconcepción o una teoría implícita toda idea organizada dentro de un sistema de conocimientos previos más o menos articulados, sea o no correcta desde el punto de vista científico, y concebida por los profesores que participaron en este estudio, con anterioridad a esta investigación. Reconocemos en estas ideas y teorías personales, las características expuestas en los párrafos anteriores en cuanto a su poder organizativo, su persistencia y resistencia al cambio y fundamentalmente, destacamos la necesidad de identificarlas y explicitarlas para lograr un aprendizaje satisfactorio.

Señalaremos a continuación, las características más resonantes de las concepciones alternativas y teorías implícitas.

Estabilidad:

Una de las propiedades más importantes de las teorías implícitas es que resultan ser bastante estables y resistentes al cambio ya que perduran después de una enseñanza tradicional e incluso después de intervenciones educativas realizadas para erradicarlas. Furió et al. (2006) señalan que las concepciones alternativas más estables están organizadas en esquemas conceptuales coherentes y son más resistentes a la enseñanza habitual. Por ejemplo, la idea de fuerza como causa del movimiento o las ideas sobre la estructura de la materia (continuidad, imposibilidad del vacío, inmaterialidad de los gases), etc. Esta persistencia puede deberse a que desde el punto de vista de los alumnos sus propias teorías les brindan seguridad, les facilitan la toma de decisiones y están basadas en el sentido común.

Espontaneidad:

Las concepciones alternativas son construidas en forma personal por cada individuo, en la interacción cotidiana con el mundo que les rodea y, aunque suelen ser incoherentes desde el punto de vista científico, no lo son desde el punto de vista del alumno ya que tienen cierto carácter predictivo. Dado su origen en las experiencias cotidianas (desde la más temprana infancia) o en el propio lenguaje ordinario (Llorens et al. 1989), las concepciones alternativas están presentes en el aprendizaje de las diferentes áreas científicas.

Universalidad:

Estas teorías son comunes a sujetos de diferentes países, edades, culturas, etc. Investigaciones como la de Driver (1986, 1988 y 1989) o la de Shipstone (1988) avalan esta afirmación. Sin embargo, otros autores, como Hewson y Hamlyn, (1984), indican que cuando los contextos son distintos la ideas pueden ser distintas.

Carácter implícito:

Como su nombre lo afirma, estas teorías presentan un carácter implícito. Es decir; muchas veces los sujetos que las sostienen no son conscientes de ellas (Gil et al 1991). Este es un aspecto muy importante pues, de no hacerlas explícitas pueden actuar internamente como obstaculizadores del aprendizaje.

Funcionalidad:

Las teorías elaboradas por los sujetos buscan una cierta utilidad antes que una verdad científica y, en algunas ocasiones, presentan cierta semejanza con teorías propuestas a lo largo de la historia de las ciencias (Saltiel y Viennot, 1985; Driver op. cit.). Un ejemplo son las ideas que tienen los alumnos sobre la “pesadez” de los cuerpos, según la cual, los gases son inmateriales y tienden a elevarse (Furió 1987). Esta idea coincide totalmente con la idea que tenían los aristotélicos sobre el tema.

2.1.2 La idea del Cambio conceptual.

La caracterización con cierto detalle de las concepciones alternativas de los estudiantes en diferentes áreas ha sido un disparador para intentar introducir mejoras significativas en la enseñanza. Así es como comenzaron a abrirse nuevos interrogantes, principalmente referidos a cómo podía describirse el proceso de cambio de las ideas de los alumnos desde el conocimiento ingenuo e intuitivo previo, a los modelos y conceptos de la ciencia.

Apareció entonces la propuesta de considerar el aprendizaje como un *cambio conceptual*, la cual ejerció una particular influencia en el replanteamiento de la enseñanza de las ciencias. Esta propuesta se fundamentaba en la analogía existente entre el aprendizaje individual y el cambio conceptual en las disciplinas científicas que, como señalaba

Hewson (1981) fue muy fructífera y propició un marco adecuado para el análisis del aprendizaje en ciencias. Es decir, se establecieron relaciones entre las investigaciones en didáctica de las ciencias (ideas alternativas, cambio conceptual), la psicología cognitiva (en especial con autores como Ausubel, Piaget, Vigotsky) y la filosofía de las ciencias (Bachelard, Kuhn, Lakatos, Toulmin). Según esto, el cambio conceptual se consideró semejante, en cierta forma, a los cambios de paradigma en las ciencias señalados por Kuhn. Se relacionó el cambio conceptual con los procesos de acomodación de Piaget, sin los que no parecía posible el aprendizaje significativo de Ausubel. Se admitió que si no había interacción entre la estructura conceptual previa y la nueva información se producía el aprendizaje repetitivo.

La versión más difundida ha sido la propuesta por Posner, Strike, Hewson and Gertzog (1982), y modificada y ampliada por Hewson (1981, 1982, 1996), Hewson and Hewson (1984; 1988; 1992), Strike and Posner (1985, 1992). El modelo propuesto por estos autores toma como punto de partida la insatisfacción de los estudiantes con sus ideas previas como motor generador de una fuerte reestructuración de las mismas. Plantea que un verdadero proceso de acomodación podría ser posible si se conduce al alumno a una situación en la que se sienta insatisfecho con sus propias ideas y a la vez se le ofrezca una visión alternativa *inteligible, plausible* y más *fructífera*. Es decir, propone que si el alumno encuentra que la nueva concepción no ofrece contradicciones, es comprensible, inteligible, le resulta convincente y le permite resolver nuevos problemas, estará más abierto para desechar las viejas ideas y construir un marco conceptual más apropiado.

Driver (1988), propuso un modelo para la enseñanza de las ciencias basado en el cambio conceptual y estructurado en torno a una secuencia de actividades específicamente elaboradas para conseguir dicho cambio. La secuencia constaba esencialmente de 4 fases:

Orientación: Destinada a despertar la atención y el interés de los alumnos por el tema.

Explicitación: Consiste en la exposición por los alumnos de sus ideas.

Reestructuración: Donde han de modificarse las ideas de los alumnos por medio de diferentes estrategias que pueden incluir el uso combinado de contraejemplos o actividades destinadas a provocar insatisfacción con las propias ideas, modelos, analogías, diseño de experiencias para ayudar a clarificar y diferenciar ideas, etc. Dentro de esta fase se incluyen también diversas oportunidades para que los alumnos prueben y apliquen sus concepciones revisadas.

2.1.3 Los mecanismos del cambio conceptual y su naturaleza

Vosniadou (2008) nos recuerda que el término cambio conceptual fue introducido por Thomas Kuhn (1971) para indicar que los conceptos involucrados en una teoría científica cambian sus significados cuando la teoría (o el paradigma) cambia. Es decir, cuando un marco teórico cambia, el significado de los conceptos subsumidos también cambia haciendo que los mismos sean *incommensurables* con los mismos conceptos subsumidos en el marco teórico anterior.

Para que esto suceda Posner propone que el nuevo concepto debe ofrecer inteligibilidad y plausibilidad. Sin embargo, reconocer la inteligibilidad y plausibilidad de un concepto no siempre es fácil debido a diferentes y variados compromisos epistemológicos a los que Toulmin (1972), llama ecología conceptual. Strike and Posner (1992, pp. 216–217) incluyen dentro de esta categoría las anomalías, analogías y metáforas, imágenes, experiencias pasadas, compromisos epistemológicos, creencias metafísicas y conocimientos en otros campos. Por estas razones, entre otras, el objetivo de acercar a los estudiantes a los modelos y conceptos aceptados científicos no es algo simple, no siempre se alcanza (Duit y Treagust, 1998) y puede suceder que a pesar de la instrucción, no logren reemplazarse totalmente las viejas ideas y éstas sobrevivan, reapareciendo en contextos particulares. Gilbert, et al., 1982 y Jung 1992 afirman que, en estos casos, parte de una idea inicial se fusiona con una nueva para formar una idea híbrida, en lo que Chinn &

Brewer (citado por Duit y Treagust, 2003), han dado en llamar cambio conceptual periférico.

Los cambios conceptuales pueden suceder ya sea a través de la utilización de mecanismos implícitos y aditivos, o desde mecanismos de aprendizaje intencional, suponiendo por supuesto una interacción continua entre el individuo y un gran entorno cultural. Ejemplos de lo primero pueden ser mecanismos como la asimilación y acomodación piagetiana y el uso de similitudes basadas en el razonamiento analógico (internalización de Vigotsky 1978) y la apropiación de las prácticas culturales de las teorías situadas (Rogoff 1990). Ejemplos de lo segundo son la utilización deliberadas de analogías y modelos que permiten mapear la construcción de pensamiento experimental, limitados análisis de casos y la traslación desde el lenguaje de la física al de la matemática (Carey y Spelke, 1994; Neressian 1992; Vosniadou 2007).

En los casos en que la nueva información está en conflicto con lo que ya se sabe, el uso de *mecanismos de enriquecimiento, aditivos*, puede llevar solamente a pequeños cambios del aprendiz, los cuales pueden ya sea fragmentar lo sabido, creando piezas de inconsistencia en el conocimiento o, en el mejor de los casos, llevando a la creación de modelos o preconcepciones alternativas o "modelos sintéticos". Los mecanismos tipo enriquecimiento pueden ser muy exitosos en muchos casos de adquisición de conocimiento que no está en contradicción con lo anterior, pero fallan en situaciones que requieren cambio conceptual radical. El cambio conceptual es un proceso gradual (Vosniadou 2008) y continuo que involucra muchas partes interrelacionadas del conocimiento y que requiere de mucho tiempo para ser alcanzado.

Es importante mencionar varias clases de mecanismos sociales que pueden facilitar el cambio conceptual, como la colaboración (Miyake 2008) y las discusiones de clase (Iganaki y Hatano 2008).

Carey y Spelke (1994) discuten las evidencias de cambio conceptual espontáneo en términos de ciertos mecanismos de mapeo en diferentes dominios de pensamiento.

Para los partidarios del cambio conceptual, los debates posteriores se han centrado en los mecanismos a través de los cuales un individuo decide cambiar una vieja concepción por otra más prometedora. ¿Existe un único mecanismo de cambio conceptual? ¿Es este cambio gradual, paulatino, implica una evolución de las concepciones del individuo, o supone una sustitución drástica de los viejos modelos por las nuevas ideas? ¿Cuál es la naturaleza del proceso de cambio? ¿Puede el modelo de cambio conceptual ser una estrategia eficaz para el cambio de ideas? Éstos han sido algunos de los interrogantes que los investigadores han intentado dilucidar a lo largo de los últimos años de investigaciones en el tema y que intentaremos desarrollar en lo que sigue.

Más de un mecanismo de cambio conceptual

En la visión radical originaria de Posner et al. (1982), el modelo de aprendizaje por cambio conceptual se centraba principalmente en los procesos de acomodación. Hewson (1981) propone una variante que ajustaba muy bien para el caso en que las nuevas ideas no fueran totalmente incompatibles con las visiones previas. En esta variante, a la que llama *captura conceptual*, juegan un rol principal los procesos de *asimilación*.

Por otra parte algunas teorías computacionales como la teoría de los esquemas de Norman Rumelhart focalizaron su atención en la existencia de períodos de crecimiento y ajuste de esquemas y períodos de reestructuración en el aprendizaje. Luffiego et al. (1994) fundamentan su *modelo de evolución conceptual* sobre estas teorías. Según estos autores, los sistemas conceptuales evolucionan en cadena, de forma que en cada etapa se incorpora nueva información cuyo producto puede resultar diferente de la mera suma al estado anterior de la información añadida. En las fases que llaman de estabilidad el sistema adopta un comportamiento no lineal poco pronunciado, mostrándose resistente a los cambios a gran escala y verificándose en ellos solamente procesos de acumulación y refinamiento a partir de un atractor conceptual que sirve de anclaje para la información que entra. Pero en algunos casos, el carácter no lineal del proceso de adquisición de información se agudiza y el sistema puede volverse inestable y evolucionar a partir de un atractor caótico que lleva al fenómeno a convertirse en impredecible. En esta fase,

cantidades mínimas de información o pequeñas fluctuaciones en las condiciones iniciales pueden verse amplificadas en un proceso parecido a los fenómenos físicos de resonancia. Cuando estos cambios adquieren significatividad cristalizan en un nuevo sistema de ideas.

Carey (1991), en una postura algo más cercana a la tradicional, distingue entre *procesos de reestructuración fuerte y de reestructuración débil* según se verifique un cambio que afecte al compromiso ontológico del individuo o simplemente a la adquisición de nuevos conocimientos y a la diferenciación e integración de nociones que ya posee. Esta autora proveyó evidencia empírica que avalaban que estos cambios ocurren espontáneamente en el curso del desarrollo cognitivo y que ello involucra también la diferenciación y coalescencia de conceptos (por ej., la diferenciación entre calor y temperatura o entre peso y densidad).

Otros investigadores han interpretado el término cambio conceptual más ampliamente para indicar todas las diferentes clases de cambio conceptual que ocurren en los procesos de desarrollo y de aprendizaje tanto como en la historia de la ciencia y no solamente aquellos que acompañan los cambios de teoría (Thagard, 1992 y 2008). Este autor aportó una lista de cambios conceptuales, partiendo de algunos muy simples, es decir aquellos que involucran añadir alguna instancia o alguna regla al concepto existente y terminado con algunos muy radicales.

Chi (2008) también distinguió entre tres clases de cambio conceptual que suceden en el proceso de aprendizaje: revisión de creencias, transformación de modelo mental y corrimiento categorial. Para Chi, la categorización es un poderoso proceso que juega un rol importante en el aprendizaje. Conocer que un objeto pertenece a una dada categoría nos permite inferir ciertas características del objeto que pueden ya sea soportar u obstaculizar el aprendizaje si la categoría asignada es inadecuada. Por ejemplo, los niños usualmente categorizan las plantas como seres no vivientes. Sin embargo, la experiencia de todos los días con las plantas, tales como regar las plantas, hace que crezcan o que mueran, en el contexto de la cultura y el lenguaje de los adultos, pueden llevar lenta-

mente a los niños a comprender que las plantas son similares a los animales en ciertas propiedades, tales como alimentarse, crecer o morir. Estas similitudes pueden llevar a los niños a re categorizar las plantas como seres vivos más que como objetos inanimados más allá de que las mismas no pueden realizar movimientos auto iniciados. Estos cambios de categorías pueden describirse como salto de rama (Thagard 1988) o como un corrimiento de categoría ontológica (Chi 1992, 1994). Precisamente, en esta tesis asistimos a cambios categoriales u ontológicos al pasar del objeto clásico al cuántico.

Vosniadou et al. (2008) analizaron lo que se ha dado en llamar cambio conceptual inducido para compararlo con la clase de cambio conceptual que sucede en el desarrollo espontáneo. En el núcleo de su aproximación teórica está la idea de que la explicación de las visiones ingenuas iniciales en física no son observaciones fragmentadas sino que forman un conjunto coherente, una teoría marco. Los cambios en las teorías marco son difíciles puesto que las mismas ofrecen un sistema de explicaciones coherentes. Interpreta esta autora que estas visiones ingenuas están presentes aún en los estudiantes de los colegios más brillantes. Ausencia de pensamiento crítico, conocimientos fragmentados, pérdidas de transferencias y preconcepciones, caracterizan el razonamiento y la resolución de problemas de muchos estudiantes, especialmente en aquellos casos donde la información nueva a ser adquirida choca con la estructura de conocimientos subyacentes.

La aproximación de las teorías marco

Las teorías marco son construidas tempranamente y están basadas en las interpretaciones de los niños de sus experiencias comunes del día a día y en el contexto cultural. La aproximación de las teorías marco está basada en la investigación del desarrollo cognitivo e intenta proveer de una comprensión de como es alcanzado el cambio conceptual en el proceso de enseñanza. Brevemente, se sostiene que hay suficiente investigación empírica para sostener que los conceptos están insertos en teorías marco de dominios específicos que sustentan explicaciones diferentes a las corrientemente aceptadas en la ciencia y la matemática (Carey y Spelke 1994; Hatano 1994; Keil 1994).

Muchas teorías de aprendizaje y desarrollo, tales como las de Piaget y Vigotsky, procesamiento de la información y las teorías socioculturales, son de dominio general. En contraste, las aproximaciones de dominio específico se enfocan en la descripción y explicación de los cambios que tienen lugar en el contenido y estructura del conocimiento con el aprendizaje y el desarrollo, así como en los mecanismos y estrategias que son específicos a tales cambios.

Pareciera que al menos hay cuatro dominios de pensamiento bien definidos, los cuales pueden ser considerados en forma grosera como teorías marco, en la física, la psicología, las matemáticas y el lenguaje. Cada uno de estos dominios tiene una ontología única, que se aplica a distinto tipo de entidades. Cada dominio está gobernado por su sistema distinto de principios y reglas de operación. Una vez que está categorizada la entidad hereda todas las propiedades de las entidades que pertenecen a ese dominio. La categorización es un mecanismo muy importante para este fin.

En síntesis, el análisis más frecuente plantea la existencia de dos tipos de cambio conceptual denominados *reestructuración débil del conocimiento*, *asimilación* o *captura conceptual*, *corrimiento categorial*, por un lado y *reestructuración fuerte* o *radical del conocimiento*, *acomodación* o *intercambio conceptual (conceptual exchange)* o *recategorización*. Si bien otros autores utilizan otros términos, en general todos acuerdan en mayor o menor grado con estos tipos de cambios conceptuales. En todos los casos, el cambio conceptual denota itinerarios de aprendizaje de los estudiantes desde concepciones anteriores a la enseñanza, hacia representaciones más cercanas a las consensuadas por la comunidad científica. El modelo plantea además que los cambios conceptuales producidos pueden resultar permanentes, temporales o demasiado tenues para ser detectados.

Cuestionamiento a la idea de cambio conceptual como mero desplazamiento de ideas

La visión “clásica” del cambio conceptual como la entiende Posner et al., (1982), está, hoy en día, algo alejada de las visiones predominantes en la actualidad. Smiths et al. (1993) cuestionan la propuesta de Posner sobre la base que presenta una visión estre-

cha del aprendizaje focalizando exclusivamente en los errores cualitativos cometidos por los estudiantes en su aprendizaje anterior a la instrucción e ignoran sus *ideas productivas*, las que pueden ser la base para alcanzar una más sofisticada comprensión científica y matemática. Smith et al (1993) argumentan que las preconcepciones pueden ser vistas como expresiones faltantes, que no siempre son resistentes al cambio y que la instrucción que está concebida para confrontar las preconcepciones y reemplazarlas es torpe y con poca probabilidad de éxito.

A la vez, el constructivismo subraya que el conocimiento no se recibe pasivamente sino que es construido por el sujeto cognoscente y que la función de la cognición es adaptativa y permite que el alumno construya explicaciones viables de la experiencia (Driver et al., 1989). Las posturas que proponen tener en cuenta la complejidad del proceso de enseñanza y aprendizaje de la ciencia a través del tratamiento de aspectos que superan el mero cambio conceptual son coherentes con este planteo.

Asimismo, en una revisión reciente de investigación de Ciencias de la educación, Fensham (2001) afirma que: "otra debilidad en la gama de concepciones alternativas es el foco que ponen la mayoría de los estudios en conceptos aislados de la ciencia, en lugar de los contextos y los procesos de conceptualización y nominalización que condujeron a su invención en la ciencia" (p. 30).

Por su parte, Gil et al., (1991), plantean sumar al cambio conceptual, los cambios metodológicos (superación de los razonamientos de sentido común, de la metodología superficial); procedimentales (referidos a la adquisición de procedimientos generales de trabajo intelectual); y epistemológicos, que son los más polisémicos, ya que algunos autores los refieren a cambios en las estrategias de razonamiento, otros a cambios en las visiones sobre la naturaleza de la ciencia y, por último Vosniadou (1994), a cambios en los principios que restringen la información procesada.

Por otra parte tenemos el cambio actitudinal que tiene en cuenta los intereses de los alumnos, sus actitudes hacia la ciencia y su aprendizaje, etc., y que también puede denominarse axiológico para incluir valores y normas (Solbes, 2013 a y b).

Finalmente, si bien el enfoque clásico de cambio conceptual incluía implícitamente variables afectivas como factores podían influir en el cambio conceptual, Pintrich, Marx, y Boyle (1993) sostienen expresamente que variables tales como intereses, concepto de sí mismo, las emociones, la motivación y los aspectos sociales del trabajo en grupo son “esenciales” para proveer el cambio conceptual. Dando aún más credibilidad al dominio afectivo, Zembylas (2005) abogó por la necesidad de vincular las variables cognitivas y emocionales en la enseñanza de la ciencia, de manera que a ambas variables se les dé la misma consideración en el proceso de aprendizaje.

El cambio conceptual como cambio profundo que opera de modo gradual

Si bien ante esta indeterminación en el marco teórico muchos investigadores identifican el cambio conceptual con *desplazamiento de una idea por otra* (cambio por sustitución), otros autores, en oposición, como Linder (1993) o el propio Hewson (Hewson y Hewson, 1992) sostienen que el proceso de cambio consiste en la distinción entre los contextos en los cuales una idea puede o no resultar útil, de un modo similar a lo que ocurre con los modelos científicos. Linder (1993) señala que incluso en la evolución histórica de la ciencia, la aparición de nuevas teorías más completas, como la teoría de la relatividad de Einstein o la mecánica cuántica, no implica el descarte total y el desmantelamiento absoluto de teorías anteriores, como la mecánica newtoniana. El cambio conceptual no se trataría, entonces, de un proceso de sustitución traumática de unas ideas por otras sino el responsable de propiciar que ambos sistemas explicativos convivan y que sea el alumno el que controle y decida convenientemente qué argumentos puede y debe usar en cada momento. En consecuencia, el fin de la escuela debería ser el de proporcionar a los estudiantes las capacidades necesarias para distinguir entre diferentes conceptualizaciones de una manera adecuada según el contexto específico (Linder, 1993; Ebenezer y Gaskell, 1995).

Treagust y Duit (en Vosniadou y Oannides, 1998), por su lado, afirman que el aprendizaje en ciencias debe ser entendido como un proceso gradual durante el cual, las estructuras conceptuales iniciales de los estudiantes, construidas en su experiencia cotidiana, se enriquecen y reestructuran en forma continua. La perspectiva del cambio como algo gradual parece estar en consonancia con posturas epistemológicas más recientes como las de Laudan (Duschl y Gitomer, 1995). Mientras autores como Khun y Lakatos asumen un enfoque radical del cambio en las ideas y una visión jerarquizada del conocimiento en la que lo conceptual prima sobre los procedimientos e intenciones, para Laudan, las teorías, métodos y objetivos de las ciencias forman un entramado complejo y articulado en el que, más que una relación de subordinación entre esos elementos, se verifica una relación de interdependencia e influencia mutua.

Otra evidencia a favor de la idea de cambio gradual la encontramos en datos procedentes de investigaciones emprendidas en la propia didáctica de las ciencias. En efecto, los estudios sobre la evolución en las ideas de los estudiantes (Nussbaum, 1989) y otras emprendidas sobre la influencia del contexto parecen poner de manifiesto que las ideas intuitivas y esquemas alternativos evolucionan poco a poco, de una forma progresiva más que de un modo brusco y revolucionario como lo hacen los cambios de paradigmas a lo largo de la historia de las ciencias. Así, la mayoría de las veces las ideas cambiarían de un modo paulatino y gradual siendo frecuente la aparición de concepciones híbridas entre las de sentido común y las científicas (Galili y Bar, 1997). Desde este punto de vista el cambio conceptual no siempre implicaría un cambio hacia la *verdad científica*, sino que podría también involucrar cambios parciales hacia posiciones intermedias que sirviesen de puente entre la visión intuitiva de partida y la noción científica que se desea enseñar. En este sentido, para Kattmann (2008), el término “reconstrucción conceptual” indica más apropiadamente el significado real que se indicó anteriormente y recomienda a futuro el uso de este último término para referirse al aprendizaje conceptual (Treagust y Duit, 2008 b)

El modelo de reconstrucción educativa presenta dos facetas clave. En primer lugar, el aprendizaje es visto como la labor de estudiantes que construyen sus propios conocimientos sobre los cimientos de un saber ya preexistente. Las concepciones y creencias

que ellos traen consigo al mundo de la enseñanza no son consideradas como obstáculos para el aprendizaje, sino puntos de partida para guiarlos hacia el saber científico por conseguir (Driver y Easley, 1978). En segundo lugar, el saber científico es visto como una construcción humana (Abd-El-Khalick y Lederman, 2000); es decir, este modelo parte del punto de vista de que no existe ninguna estructura de contenidos “verdadera” para un área específica. Lo que se suele llamar comúnmente la estructura de los contenidos científicos es considerada como el consenso de una comunidad científica específica.

Por consiguiente, tampoco la estructura de los contenidos científicos para la enseñanza es algo simplemente “dado” por la estructura de los mismos. Debe ser construida por el que elabora el plan de estudios o por el maestro, con base en los objetivos vinculados con la enseñanza de un contenido específico. En otras palabras, la estructura de los contenidos científicos debe ser reconstruida desde una perspectiva educativa. Ésta es la esencia del término “reconstrucción educativa”.

Clement (2010) también acuerda que el conocimiento se adquiere en forma gradual y procede desde las creencias construidas e forma extraescolar hacia los modelos esperados, pasando por sucesivos modelos intermedios y Buckley (2010) describe un ejemplo en relación a modelos biológicos.

En resumen, podemos decir que el cambio conceptual, más que como un proceso súbito y radical, podría explicarse mejor como un debilitamiento del *estatus* de las concepciones previas y un fortalecimiento simultáneo del *estatus* de las nuevas (Hewson y Thorley, 1989).

Otros mecanismos de cambio

DiSessa (1988, 1993, 2008) ha avanzado una propuesta diferente para la conceptualización del desarrollo del conocimiento de la física. Este autor argumenta que el sistema de conocimiento de los novatos consiste en una colección de muchos elementos simples no estructurados nombrados como primitivos fenomenológicos p-prims que se originan en una interpretación superficial de la realidad física. Se supone que los p-prims están orga-

nizados en una red conceptual y que son activados a través de un mecanismo de reconocimiento que depende de la conexión de los p-prims con los otros elementos del sistema. De acuerdo a esta posición, el proceso de aprendizaje de la ciencia es uno que colecta y sistematiza las piezas en grandes totalidades. Esto sucede porque las p-prims cambian su función desde entidades relativamente aisladas auto explicativas para convertirse en piezas de un sistema más grande, de estructuras de conocimiento complejo como las leyes de la física.

Smith et al (1993) argumentan que las preconcepciones pueden ser re concebidas como extensiones defectuosas del conocimiento productivo, que no siempre son resistentes al cambio y que la enseñanza que confronta las preconcepciones con una visión que debe reemplazarlas difícilmente tendrá éxito. Vosniadou (2008) apoya el llamado de Smith et al (1993) a los investigadores para que vayan más allá de la identificación de preconcepciones hacia una investigación que focalice sobre la evolución del conocimiento experto y particularmente sobre descripciones detalladas de la evolución de sistemas del conocimiento sobre duraciones mucho más largas que las que han sido típicamente detalladas en los estudios recientes.

Una diferencia consistiría en que Vosniadou entiende que las p-prims se organizan en estructuras de conocimiento mucha antes de lo que cree diSessa. Si esto es así, el proceso de aprender física no es el de una simple organización de los p-prims no estructurados en la leyes de la física sino más bien uno durante el cual ellos necesitan reorganizarse como una teoría científica. Este será un proceso gradual y lento, precisamente porque estamos tratando con muchos elementos de conocimiento.

2.1.4 Las estrategias del cambio.

Las estrategias de cambio conceptual propuestas por el modelo clásico desarrollado en los ochenta y principios de de los noventa ponen énfasis fundamentalmente en las ideas de conflicto cognitivo. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que esta metodología

no ha dado los resultados contundentes que se esperaba en la enseñanza (Gil et al. 1991).

En relación a esta cuestión, Vosniadou y Ioannides (1998), entre otros, afirman incluso, que la aplicación sistemática de estrategias que pretenden suscitar el cambio conceptual a partir del conflicto planteado entre las expectativas de los alumnos (basadas en sus ideas previas) y las evidencias empíricas, no suelen llegar a modificar las antiguas concepciones con el éxito esperado. Las ideas previas han mostrado ser más resistentes al cambio de lo esperado y en general se encuentra que, las viejas ideas conviven y coexisten con las nuevas y que no llegan a ser del todo erradicadas, incluso aún después de completada la instrucción. De ahí que autores como Gutwill y otros (1996) concluyan que el contraste de pareceres a través de la experiencia no sea suficiente para mejorar el aprendizaje y que sea necesario adiestrar a los alumnos para que sean capaces de aportar explicaciones desde variados puntos de vistas que resulten coherentes entre sí.

En respuesta a estas críticas, otros autores han propuesto estrategias alternativas al conflicto cognitivo como motor del cambio conceptual. Entre ellas cabe citar la perspectiva propuesta por Duschl (1995) o el modelo de enseñanza por investigación (Gil, 1996; Furió et al. 1994). Estos modelos comparten un interés por implicar a los alumnos no sólo en la tarea de utilizar el conocimiento científico, sino también en las estrategias propias de la ciencia a la hora de abordar problemas. En este modelo, los autores no proponen el cambio conceptual mediante el llamado conflicto cognitivo entre las concepciones de partida y las concepciones aceptadas científicamente, sino a través del planteo y resolución de situaciones problemáticas abiertas. Esta problematización es la que permitirá generar cierto interés en el estudiante y facilitar una explicitación y tratamiento de las preconcepciones en relación funcional con el problema, sin someter a los estudiantes a condiciones donde sus ideas son sistemáticamente cuestionadas. Se propicia que estas situaciones problema sean resueltas en un entorno colaborativo mediante estrategias similares a las habitualmente desarrolladas en el trabajo de los científicos: delimitación del problema, definición del marco teórico, formulación de hipótesis, elaboración de estrategias de resolución, etc. (Gil y otros 2005 UNESCO).

Otros autores sostienen que la finalidad de los eventos discrepantes no es promover una discusión con las preconcepciones existentes, sino introducir una cuestión en una discusión activa. Buscando la disonancia óptima para la motivación en el aprendizaje, Iganaki y Hatano (1977) mostraron que la comprensión de los estudiantes puede ser apuntalada solicitándoles que realicen predicciones sobre un experimento o evento que se discute.

Otro aspecto que ha sido altamente considerado en las propuestas de enseñanza para el cambio conceptual es la utilización de analogías (Mellado 2003). Una analogía es una comparación entre dos situaciones o dominios de conocimiento distintos que mantienen una cierta relación de semejanza entre sí (Aragón et al., 1999). Desde el constructivismo se considera que los significados se construyen de una forma activa, relacionando lo nuevo con las ideas que se poseen, por un proceso generalmente analógico, como también indica la teoría de esquemas o el proceso de equilibración de Piaget. La propia ciencia utiliza habitualmente modelos analógicos en el contexto del descubrimiento, muchos de los cuales permanecen a lo largo del tiempo (por ejemplo, la analogía del modelo planetario para el átomo de Bohr o de las líneas de fuerza para el campo eléctrico, entre otras) y cualquier profesor experto conoce la utilidad de las buenas analogías en las clases de ciencias. Una analogía no es una equivalencia ni una justificación, ya que es una comparación entre dos dominios esencialmente diferentes, y pretender establecer identidades entre los dominios suele acabar ocasionando más problemas que ventajas.

Por otra parte, analogías apropiadas ayudan a los estudiantes a hacer conexiones entre conocimientos familiares y nuevos conceptos de la ciencia. Por consiguiente, basarse en una instrucción analógica puede generar interés, así como los logros cognitivos medidos por un enfoque de cambio conceptual. La investigación ha demostrado que los enfoques de enseñanza analógica pueden mejorar el aprendizaje del estudiante, a pesar de que las analogías en enseñanza y en aprendizaje pueden ser un amigo o un enemigo en función del enfoque adoptado por el maestro (

La enseñanza a través de modelos:

Una alternativa a las estrategias de cambio conceptual basadas en analogías, es la enseñanza a través de modelos. La teoría de modelado no sólo describe el mecanismo y la dinámica del cambio conceptual como un fenómeno cotidiano sino también ofrece estrategias para mejorar el aprendizaje conceptual en la enseñanza de las Ciencias (Hestenes, 1987; Lehrer & Schauble, 2007).

La teoría exige especificar el modelo objetivo del aprendizaje o estado de conocimiento a lograr luego de la instrucción. Este puede no ser tan sofisticado como el modelo de consenso aceptado por los científicos. El marco incluye un mapa de ideas preconcebidas y de procesos de razonamiento natural que están en conflicto con el modelo de destino, y conceptos útiles que sean compatibles con los modelos científicos y que pueden utilizarse como bloques de construcción para desarrollar el modelo de destino.

Los mecanismos de cambio a tener en cuenta incluyen, además, los procesos que pueden llevar al estudiante desde ideas preconcebidas, a los modelos objetivos de aprendizaje. Esto puede ocurrir a través de uno o más modelos intermedios que sirven como parciales modelos sobre la manera de desarrollar el modelo de destino.

La secuencia de pasos intermedios para el alcance del modelo objetivo forman a lo que Scott (1991) y Niedderer y Goldberg (1995) han llamado una vía de aprendizaje. Para cualquier tema en particular, una vía tal, proporcionaría tanto una teoría de la instrucción como una guía para los profesores y los desarrolladores del currículo. Los estudiantes arriban al conocimiento final esperado, transitando un proceso de evolución durante el cual construyen modelos simplificados, intermedios y parcialmente correctos (Steinberg y Clement, 1997).

En acuerdo con esta teoría, para Mellado (2003), la elaboración y evolución de los modelos mentales en el alumno no es el producto de un proceso de transmisión de significados, sino consecuencia de la evolución cognitiva que resulta de la interacción entre los modelos mentales del alumno y las representaciones didácticas de los modelos científicos.

cos (Gutiérrez y Ogborn, 1992; Vosniadou, 1994). En dicha evolución, cada uno de los modelos que se va generando deja una huella que no termina por desaparecer cuando se pasa al estadio siguiente, por el contrario, se mantiene latente dentro del repertorio que puede utilizar la persona en cada momento. El cambio conceptual, visto de esta forma, se trataría más de la elección de una opción u otra dentro del repertorio de modelos alternativos de que se dispone, que de la sustitución de un modelo por otro.

Por su parte, Pozo y et al. (1995) retoman algunas contribuciones surgidas en trabajos de otros autores e identifican otra vía de cambio basada en la instrucción a través de modelos. Difiere de los modelos basados en el conflicto conceptual en que ahora el debilitamiento de las ideas intuitivas, y su diferenciación de las teorías científicas, se produce a través de las contradicciones que el alumnos observa en sus razonamientos cuando compara los argumentos que se derivan de sus ideas previas y de los modelos científicos que han aprendido; y, sobre todo, a través de la consistencia y organización interna que detectan en las ideas científicas en comparación con su punto de vista intuitivo. El metaconocimiento reemplaza al descubrimiento dirigido como herramienta de búsqueda de la validez de los argumentos, y los procesos de asimilación del nuevo conocimiento se implementan mediante estrategias de instrucción directa, lo que no debe entenderse según Pozo y otros (1995), como un regreso a los métodos de enseñanza tradicionales. En palabras del propio Pozo “... la instrucción debe partir de un modelo de cambio conceptual, y tras la presentación de un modelo o teoría, seguir los pasos o fases necesarios para alcanzar el cambio conceptual” (Pozo et al., 1995, p. 173). Con ello la noción de conflicto adquiere una dimensión diferente, y ahora sirve como referente de organización interna y no tanto como fuente de desestabilización a partir de referentes externos al individuo, aunque éstos evidentemente también sean necesarios.

Clement (2008) también desarrolla una propuesta que se basa en la utilización de analogías y modelos explicativos. El núcleo de su perspectiva teórica consiste en mirar los *modelos explicativos* como el núcleo del significado de las teorías científicas y el centro que da sentido a los estudiantes. Los modelos explicativos son los organizadores del currículum de enseñanza. Más concretamente Clement (2008) sostiene que la utilización

conjunta de analogía y disonancias pueden llevar a resultados positivos en el cambio conceptual. Se trata de una estrategia sutil de presentar evidencia a los estudiantes que les permita descubrir las inconsistencias de su propio modelo.

Nernessian (2008), por su lado, se pregunta ¿cómo podría llegarse desde el modelaje mental al cambio conceptual? Su respuesta es que la construcción y manipulación de modelos, que incluyen las analogías, la imaginación y los procesos de simulación, abstraen e información desde múltiples fuentes específicas a la situación de resolución de problemas, lo cual permite que ocurra una más novedosa combinación, es decir, que emerjan estructuras que no estaban representadas en el modelo.

Los modelos juegan un rol fundamental en la ciencia, en el currículo de ciencias y en el aprendizaje de los alumnos. Por una parte, desempeñan una función esencial en la estructura y evolución de la ciencia y son parte integral del pensamiento y funcionamiento científico (Halloun, 2004 y 2007; Gilbert, Boulter y Rutherford 1998 a y b; Nernessian, 1992 y 2008). En este sentido, puede considerarse a las ciencias como grandes constructoras y manipuladoras de modelos (Martinand, 1986), suponiendo para el científico el instrumento que le permite representar sus teorías, para cuya labor puede servirse de diferentes lenguajes, como el matemático, el conceptual, el gráfico, el analógico, etc.

Harrison y Treagust (1996) señalan que modelar es la esencia de pensar y trabajar científicamente, y Gilbert (1993 y 1998) afirma que la ciencia y sus modelos son inseparables, porque los modelos son los productos de la ciencia y, a la vez, sus métodos y herramientas de trabajo. De hecho, los modelos pueden considerarse como las unidades básicas del razonamiento del científico, permitiendo a este comprender la situación que está investigando, y en ocasiones, incluso, adelantarse a los hechos manipulando mentalmente los mismos para averiguar su comportamiento sin necesidad de recurrir a un experimento real (Nernessian, 1992 a y b).

Grosslight et al. (1991), han caracterizado las creencias de los estudiantes respecto el uso de los modelos en tres niveles. Para los estudiantes en el nivel 1, los modelos son copias incompletas de la realidad, del objeto real. Para quienes han alcanzado el nivel 2, los modelos mantienen el carácter anterior, son representaciones de entidades concretas y su función es comunicar alguna idea (no se le confiere al modelo poder exploratorio de nuevas ideas). El nivel 3, sería el de los expertos, quienes confieren al modelo un carácter múltiple: son herramientas de pensamiento y pueden ser manipulados para satisfacer necesidades epistemológicas. La caracterización de los alumnos según estos niveles indicaría diferentes epistemologías y ontologías que el estudiante debería modificar en el transcurso del aprendizaje de la ciencia.

Una forma algo diferente de describir la forma en que los estudiantes conceptualizan los modelos es a través del enfoque epistemológico propuesto por el propio Bachelard (1968). Para este autor, las personas poseen más de una manera de describir los objetos y procesos, dependiendo la descripción elegida fuertemente del contexto y esto sería especialmente cierto en el caso de la ciencia. Así, algo que puede parecer ser un cambio en una concepción de un modelo, podría ser simplemente una manera diferente de describir un fenómeno, basada en el contexto en que se presenta y la preferencia de una conceptualización o modelo, sobre por otro.

Otra de la líneas que ha captado el interés de los investigadores es la de los modelos mentales Johnson-Laird, P.N. (1983). En esta línea se interpreta el pensamiento de los estudiantes, al enfrentar una tarea específica o al intentar comprender un concepto complejo, en términos de modelos mentales. El aprendizaje de las ciencias implicaría un proceso de cambio de los modelos mentales de los estudiantes, desde aquellos propios del pensamiento de sentido común, a los científicos.

Más recientemente Moreira (2002), ha planteado la articulación de la teoría de los modelos mentales y la teoría de los campos conceptuales de Vergnaud (1993,1994,1996) como un referencial teórico válido para la investigación de las ideas de los alumnos y la descripción de ciertos procesos cognitivos.

La aproximación sociocultural o socioconstructivista

Las críticas desde las teorías socio-constructivistas puntualizan que el cambio conceptual no es un proceso individual, interno y de una perspectiva puramente cognitiva. Más bien, ellos piensan que debe ser considerado como una actividad social que tiene lugar en un complejo sociocultural que también involucra el uso de lenguajes simbólicos, herramientas y artefactos. Ellos también creen que es importante considerar el rol de las prácticas socioculturales, las herramientas y los contextos en la resolución de problemas y de razonamiento.

Sin embargo, esto dejaría sin consideración el rol crucial que las mentes individuales juegan en el funcionamiento intelectual. Como Hatano (1994) expresó, "aunque la comprensión es un proceso social, también involucra mucho procesamiento como actividad individual de la mente. El sistema pos cambio conceptual, no sólo debe tener coherencia, sino también necesidad subjetiva".

Una segunda crítica que viene desde teorías socio constructivistas más radicales sostiene que el conocimiento no es algo que pueda ser adquirido, desarrollado o cambiado, sino "un proceso, una actividad que tiene lugar entre los individuos, las herramientas y los artefactos que utilizan y las prácticas de las que participan" (Greeno et al, 1996, p20).

Algunos investigadores plantean una visión altamente contextualizada del conocimiento que se da como un proceso de participación en actividades socioculturales (Sfard, 1998).

Finalmente, la tercera crítica que viene del socio constructivismo radical, es la negación de las representaciones y modelos mentales. Vosniadou sostiene que hay evidencias en contrario que muestran que se pueden objetivar estas representaciones en la creación de herramientas y artefactos que pueden ser utilizados como aparatos o prótesis externas de pensar. El socio constructivismo enfatiza la importancia de los artefactos culturales pero no explica, según Vosniadou, como la cultura humana creó esos artefactos en primer lugar.

2.1.5 Algunas implicaciones para la educación

Para Vosniadou (2003) la enseñanza para el cambio conceptual requiere que los profesores presten atención a los conocimientos anteriores que los estudiantes traen a las tareas de clase y hallar las maneras no sólo de enriquecer los conocimientos anteriores, sino también de cambiarlos llevando eventualmente a la formación de nuevas estructuras. Ello requiere el diseño de currículos y de una instrucción adecuadas que sumen hacia la creación de aprendizajes motivados y prolongados, que incluyan el necesario darse cuenta metacognitivo y estrategias intencionales de enseñanza que involucren en prolongados aprendizajes significativos.

Define entonces dos direcciones que se pueden tomar para promover la enseñanza hacia el cambio conceptual. Una dirección es tratar de achicar el hueco entre las teorías marco de los estudiantes y la nueva información a ser adquirida, haciendo entonces el problema del cambio conceptual menos agudo. Es importante diseñar la currícula para que los jóvenes estudiantes anticipen posteriores explicaciones sobre el significado del concepto de manera de puentear el hueco conceptual. Otra dirección, con propuestas más radicales es ofrecida por algunos investigadores (Carraher et al., 2001) que sugieren que la currícula debería incluir la introducción de ciertos conceptos difíciles en una primera etapa.

Además de tomar en cuenta los conocimientos anteriores, los problemas de cambio conceptual requieren enseñar también a los estudiantes mecanismos de reestructuración cognitiva, tales como el razonamiento de *modelado*, *el uso deliberado de analogías puentes* y los mapeos a través de los dominios. Las intervenciones de instrucción deben poner atención a los darse cuenta metaconceptuales de los estudiantes, las sofisticaciones epistemológicas y las habilidades de aprendizaje intencionales que les puedan permitir a ellos involucrarse en aprendizajes significativos de largo plazo (Sinatra y Pintrich 2003; Wiser y Smith 2008).

Por su parte, diSessa (2008) plantea que los estudiantes tienen una riqueza de fuentes conceptuales a las que se puede recurrir para la enseñanza. Recomienda entonces considerar sus ideas y ayudarles a construir sobre la base de las mejores.

Vosniadou acuerda con Hatano e Inagaki (2003) en que se requiere un considerable soporte para este tipo de instrucción. Una manera en que los profesores puedan proveer los vínculos socioculturales que impulsen el darse cuenta metaconceptual es pedir a los estudiantes que participen en interacciones dialógicas, las cuales usualmente son una discusión con el grupo clase. Hatano e Inagaky han realizado un número de estudios educacionales de manera de mostrar como los mecanismos cognitivos individuales pueden combinarse con vínculos socioculturales para promover la enseñanza del cambio conceptual inducido.

Es claro que la enseñanza y el aprendizaje del cambio conceptual requiere sustanciales cantidades de esfuerzo de los profesores como también de parte de los estudiantes. Para que este esfuerzo sea investido debería existir un entorno en el cual sean tanto necesarios como apreciados.

Desde la perspectiva de esta tesis receptamos todo este debate reciente cambio conceptual y sus contribuciones a la enseñanza aprendizaje de la ciencia, asumiendo que, en términos generales es congruente con la perspectiva de *tratamiento de situaciones problemáticas de interés* (Gil et al. 1991). Al mismo tiempo, entendemos esta propuesta desde una multiplicidad de instrumentos, como la necesidad de apoyarse en diálogos, analogías, mapeos, aplicaciones, producción de hipótesis, elaboración de modelos y procesos de metacognición. Asumimos también la realidad de que el proceso educativo tendrá que pasar por a sucesivas modificaciones (Clement 2008) que nos llevarán a modelos sintéticos (Vosniadou 2008) o intermedios (Clement 2008, Neressian 2008).

2.1.6 Síntesis del marco teórico

En esta investigación, centraremos nuestra atención en este último aspecto, *la evolución de las concepciones de los profesores*, intentado superar obstáculos cognitivos y transformar las estructuras de pensamiento iniciales, aunque sin desechar la posibilidad de cambios radicales. Las estructuras de pensamiento a las que nos referimos, han sido construidas por los profesores en dominios de conocimiento específicos de la física clásica y algunas de ellas requerirán cambios radicales para incorporar los conceptos de la física cuántica. Veremos cuáles de las estructuras existentes interfieren en la construcción de los nuevos conceptos e intentaremos detectar las que presentan cierta regularidad y las más resistentes al cambio. Concretamente, nos proponemos caracterizar las concepciones de los profesores, su nivel de acercamiento a los modelos de la ciencia, las estructuras que las sustentan y sugerir alternativas que colaboren en el cambio de pautas de pensamiento en torno a algunos tópicos de física cuántica. Finalmente, intentaremos describir los pasos más significativos de la evolución del pensamiento de los profesores durante el proceso de cambio conceptual hacia estructuras más cercanas a los modelos científicos.

Podríamos concluir que la didáctica de las ciencias, si bien no ofrece consenso en cuanto a la interpretación del modo en que aprenden los estudiantes, si aporta estrategias de trabajo en alguna medida convergentes. La didáctica de las ciencias, como saber prático con aspiración científica, como la ciencia misma, es de naturaleza por demás dinámica, evoluciona a pasos agigantados y que por tanto se le dificulta al investigador novel adherir a una línea determinada, no obstante lo cual se puede trabajar desde las zonas de consenso. Los resultados del trabajo son, en cierto modo, compatible con varios presupuestos.

En nuestro caso hemos asumido algunos presupuestos centrales que estarán presentes en todo el trabajo:

Coll (1991), advierte el riesgo al elegir una determinada teoría en menoscabo de las demás, en la medida que ninguna es capaz de dar una explicación razonable de los

diversos factores y dimensiones del desarrollo y del aprendizaje implicados en los procesos escolares. Para Coll (1991) ninguna teoría por sí sola proporciona una visión integrada del desarrollo y del aprendizaje escolar suficientemente satisfactoria. Acordando con este autor, interpretaremos los resultados desde una perspectiva múltiple, en la que tomaremos los aportes de varios investigadores.

No obstante, intentaremos delimitar nuestro encuadre teórico dentro de un marco constructivista asistido por el profesor/investigador, en el que podríamos expresar las principales premisas que guían esta investigación diciendo que:

- los profesores (al igual que los alumnos) poseen ideas previas sobre los fenómenos físicos, contruidos en su interacción social con el medio y durante su período de formación profesional,
- estas creencias están profundamente arraigadas en la estructura cognitiva, poseen una estructura lógica satisfactoria para el profesor,
- estas creencias pueden funcionar en algunos casos como anclaje de nuevos conceptos de la ciencia o como verdaderos obstáculos del aprendizaje, dado su grado de coherencia,
- es posible modificar estas creencias si previamente se las identifica y se actúa sobre ellas mediante un tratamiento didáctico especialmente diseñado.
- La modelización (técnicas de modelado) y la enseñanza a través de modelos (análisis de modelos, sus límites y alcances) proporciona una alternativa de gran potencialidad para generar cambios conceptuales y un acercamiento a los modelos de la ciencia y una opción válida para el diseño de una propuesta didáctica.
- Dichos diseños deben incluir tratamientos de situaciones abiertas, presentación y elaboración de modelos, análisis de los itinerarios de evolución conceptual y, en general una enseñanza pro actividades, concebidas para que involucrar en la medida más amplia posible a los asistentes.
- Las ideas iniciales de los profesores son el punto de partida sobre el que se deben construir los nuevos modelos y las interacciones dialógicas y la reflexión meta

conceptual son los instrumentos didácticos más apropiados para la promoción del cambio conceptual.

Los detalles de la elaboración de la propuesta serán tratados con más detalle en la tercera parte de la presentación de este informe de tesis.

2.2 Las investigaciones sobre EA de la FQ en otros países

A pesar que desde los gobiernos y diversas organizaciones internacionales parece valorarse la importancia de la alfabetización científica en temas de física actual, como describimos en el capítulo anterior, gran parte de las investigaciones profundizan en la didáctica de temas de la física clásica, aspectos metodológicos en las mismas áreas o descripciones generales desde la psicología cognitiva. En el caso del tratamiento didáctico de la Física Cuántica, la escasa bibliografía publicada en esta área es un índice más de la postergación de que ha sido objeto. Nos referimos a investigaciones desde la óptica de la didáctica de las ciencias y que atiendan a las dificultades específicas que aparecen en la presentación de una disciplina que dista considerablemente de ser intuitiva.

Entre los autores que se hacen eco de esta problemática, algunos, preocupados por el poco interés de los alumnos hacia la ciencia y en un intento de transformar los contenidos en algo atractivo, recomiendan modernizar los cursos introductorios de Física en la universidad mediante la presentación de las ideas cuánticas y relativistas en los primeros años de la instrucción universitaria (Holbrow et al, 1995, 2010). Su interés, en este caso, es puramente motivacional. Por su parte, Taylor R.H. et al. (1992 y 2003), en Berkeley (Universidad de California), destacan el valor de incluir los principios que rigen la física contemporánea en cursos de estudiantes que no continuarán con estudios científicos posteriores y presentan un texto en el que intentan desarrollar los tópicos de Física Moderna en un nivel accesible, pero sin perder, por ello, rigor en la presentación. Dicho texto fue re editado en varias oportunidades en diferentes países. Simultáneamente, en el MIT (Massachusetts, US), Taylor E. (2000) elabora un curso basado en el conocido

libro de Richard Feynman y aplicando recursos computacionales para la simulación de experiencias.

Neressian (1992b), resalta la importancia de recurrir al uso de analogías en el planteo inicial de una nueva teoría, aunque no hace alusión específicamente a la física cuántica. Su propuesta se basa en la investigación del modo en que razonaban los grandes científicos de la historia, para quienes los modelos de teorías ya vigentes eran el punto de partida para la explicación de nuevos fenómenos.

Por el contrario, Fischler y Lichtfeldt, (1992), alertan lo perjudicial que puede ser de la presencia de analogías en la presentación de la Física Cuántica, ya que afirma que no puede explicarse mediante el uso de los antiguos modelos aquellos conceptos que justamente motivaron la ruptura de las nuevas ideas con la Física Clásica.

En España, Solbes y colaboradores, detectaron visiones deformadas de la ciencia en el alumnado de nivel secundario. Según los autores, la introducción de la Física Moderna suele estar caracterizada por una presentación desestructurada de conceptos, en la que se mezclan o yuxtaponen concepciones clásicas y modernas sin poner en evidencia la ruptura entre ambas. Asimismo, afirman que la presentación lineal que se hace de la evolución de la ciencia, proporciona una imagen de la misma que no contribuye a una apropiada caracterización de la metodología científica (Solbes 1986, Gil y Solbes, 1993). Atendiendo a esta realidad, estos autores elaboran una propuesta que toma como punto de partida las dificultades insuperables que originaron la crisis de la física clásica e intenta mostrar los límites de validez de ésta y las diferencias entre la concepción clásica y moderna del comportamiento de la materia (Gil et al. 1989, Solbes 1996). Más recientemente, Solbes y Sinarcas (2010) proponen una versión actualizada que amplía aspectos conceptuales, de procedimiento y de relaciones CTSA, y en la que el estudio de los fenómenos cuánticos se inicia con dos de los problemas que originaron la crisis de la Física Clásica: el efecto fotoeléctrico y la existencia de espectros atómicos.

Petri y Niedderer (1998), en Alemania, describen una alternativa didáctica, en la que a partir de un estudio de caso analizan la evolución de los modelos del átomo de un alumno. En una ambiciosa propuesta para el nivel medio en la escuela alemana, muestran como una concepción planetaria del átomo de hidrógeno, evoluciona a través de varios modelos intermedios hacia un modelo más cercano al consensuado por la comunidad científica.

Greca y Moreira (1998), por su parte, en Brasil, realizan un estudio sobre modelos mentales de estudiantes y proponen un enfoque basado en la discusión de algunos tópicos particulares como la superposición de estados y la dualidad onda-partícula. Critican, además, la presentación cuasi-histórica tradicional de la física cuántica y advierten que las concepciones previas pueden tanto facilitar el aprendizaje como obstaculizar mentalmente la percepción de nuevos significados (Moreira y Greca, 2004). En el mismo país, Pereira, Cavalcanti y Ostermann (2009), presentan uno de los pocos estudios publicados en el nivel de formación de profesores, en muestran que la mayoría de los estudiantes tienen dificultades en reconocer en qué situaciones los objetos cuánticos (fotones o electrones), presentan comportamiento corpuscular u ondulatorio.

En nuestro país, Otero et al (2009), afirman que la conceptualización de un sistema cuántico requiere aceptar categorías que desafían a las originadas en la experiencia macroscópica, pero cuando se intenta enseñarla, suele adoptarse un enfoque tradicional para la organización de los conceptos, originado en la textualización predominante y disponible para profesores de enseñanza media. Así, se adopta una estructura estrictamente histórica que recorre las anomalías clásicas originadas en: 1) el problema anómalo de la radiación de cuerpo negro, abordado por Planck, 2) el problema anómalo del efecto fotoeléctrico, abordado por Einstein, 3) y el problema del tamaño de los átomos,

abordado por Bohr y de Broglie. Destacan que en los textos para la educación secundaria, una vez instalado el modelo de Bohr -físicamente erróneo-, donde los electrones giran alrededor del núcleo en órbitas circulares, se finaliza proponiendo un llamado “modelo actual” del átomo, en los cursos de química o en los de fisicoquímica, en el que

de una manera poco clara, aparecen los llamados números cuánticos combinados con el principio de exclusión de Pauli.

En cuanto a la propuesta editorial, que en definitiva es quién decide en gran parte el tipo de presentación que hará el profesor, se proponen varios posibles caminos para introducir la física cuántica, o más bien pre-cuántica: el axiomático, el histórico y el empírico (Solbes y Sinarcas, 2010). El primero sólo se utiliza a nivel universitario. El método empírico consiste en introducir las ideas cuánticas, mediante una serie de experimentos. Es muy usado en los países anglosajones. El ejemplo más conocido es Feynman (1987) que introduce la Física Cuántica a partir de la difracción de electrones. El histórico (Holton, 2004) es el más utilizado en España y en Argentina, y consiste en presentar de una forma más o menos cronológica las contribuciones de Planck, Einstein, Bohr, De Broglie, Heisenberg, Schrödinger y Born. Sin embargo, esta forma simplemente histórica de introducir las nuevas ideas, en particular desde Planck hasta De Broglie, tal y como se hizo en los orígenes de la Física Cuántica, sin tener en cuenta los desarrollos posteriores de las mismas, fortalece el anclaje de representaciones de órbitas estacionarias “alrededor” de los átomos, no permiten introducir la interpretación probabilista para los fotones, el comportamiento ondulatorio de la materia, etc.

La gran diversidad de planteos en distintos países, la falta de opiniones convergentes, y la escasez de alternativas de presentación, ponen en evidencia la especial atención que debe dársele a la Física Moderna, particularmente la Cuántica, y la necesidad de ahondar las investigaciones en este área desde el punto de vista didáctico.

2.3 Síntesis del capítulo 2: Posicionamiento de la investigación

Hemos presentado en este capítulo un resumen de las principales líneas de investigación vinculadas a las concepciones alternativas y el cambio conceptual en las que se

fundamenta esta investigación, y los resultados de algunas investigaciones en enseñanza de la física cuántica en los últimos años. Por otro lado, en el capítulo anterior, hemos también analizado los contenidos básicos propuestos para los profesorados de física en nuestro país.

Como expresamos anteriormente, los objetivos planteados desde las instituciones son ambiciosos y prometedores. Sin embargo, estas intenciones no se plasman en la práctica y los diseños en concreto no distan de ser propuestas tradicionales, en los que se privilegia una formación pedagógica general y una formación disciplinar que poco difiere de los lineamientos en vigencia, en particular. Respecto a la física cuántica, si bien se incluyen contenidos específicos en el bloque Física del siglo XX, se propone una presentación lineal que acompaña el desarrollo histórico de los mismos y que mantiene el énfasis en el comportamiento corpuscular de la radiación y la descripción de los modelos atómicos precuánticos. Estos diseños, son generales y no distan demasiado de los existentes. Por su parte, aún están en discusión los diseños jurisdiccionales, por lo que en la práctica se mantienen en vigencia los elaborados en oportunidad de la reforma educativa anterior.

Respecto a la física cuántica, entendemos que la formación actual de los profesores no les ha permitido adquirir una estructura conceptual adecuada en relación a los temas de física cuántica. Es decir, las concepciones alternativas previas, no se superan con la instrucción tradicional, incluso algunas de ellas llegan a arraigarse aún más justificadas por nuevas hipótesis que el profesor construye y acomoda en la estructura conceptual pre-existente a lo largo de su desarrollo profesional y en la interacción con el medio.

Todo el estudio sobre preconcepciones se replantea alrededor de la Enseñanza de la Física Cuántica (EFQ), donde aparecen preconcepciones específicas muchas veces no advertidas por los mismos profesores y que requieren no sólo una ampliación de los contenidos tradicionales, sino también profundos cambios epistemológicos en el aprendizaje y metodológicos en el enseñante.

En lo que sigue, nos proponemos identificar las actitudes de los profesores respecto de la enseñanza de la ciencia y las concepciones de la física cuántica básica que ofrecen mayores dificultades de comprensión, como paso previo a diseñar una alternativa didáctica para la presentación del tema. Analizaremos, cómo se comportan esas concepciones en relación a si obstaculizan o favorecen el aprendizaje y para finalizar, intentaremos describir los cambios que se operan en el pensamiento de los profesores en relación a los tópicos identificados como los de mayor dificultad.

PARTE II

Primera etapa de la investigación: Caracterización del pensamiento del profesor en temas de FQ

Presentación de las etapas de la investigación

Capítulo 3: Caracterización inicial: Instrumento de Análisis 1

Capítulo 4: Resultados y conclusiones de la caracterización inicial

Capítulo 5: Caracterización específica: Instrumentos de Análisis 2, 3, 4 y 5

Capítulo 6: Resultados de la caracterización específica, conclusiones y aportes para el diseño de la una propuesta didáctica

Presentación

de las etapas de la investigación

Como dijimos en la presentación general, para el logro de los objetivos propuestos en esta tesis, hemos dividido la investigación en dos etapas: 1) la determinación de las concepciones de profesores en ejercicio en relación a la ciencia en general y a la Física cuántica en particular y, 2) el análisis de la evolución del pensamiento de los profesores luego de un curso de formación diseñado a partir de los resultados de la primera etapa de la investigación. Para la primera etapa (determinación de concepciones) se diseñaron dos encuestas, cuatro series de textos a ser interpretados por los profesores, una entrevista escrita a partir de una experiencia ideal y un protocolo para una larga entrevista personal. Los registros de la segunda etapa (diseño de la propuesta y seguimiento de la evolución de los profesores), consistieron en una encuesta implementada al comienzo y al terminar el curso de formación, el registro fílmico de exposiciones de los docentes, análisis de las notas de clase de dos de los participantes y monografías presentadas a manera de evaluación al finalizar el curso. En la tabla 3.1, se presenta una síntesis de los instrumentos utilizados, una breve descripción y la cantidad de registros de cada uno.

Tabla 3.1: Instrumentos diseñados para esta investigación

Instrumento	Descripción	Cantidad
Primer etapa: caracterización del pensamiento del profesor		
Caracterización inicial		
Cuestionario FQ1	Relevamiento inicial de ideas de los profesores, sobre la ciencia y su enseñanza y en particular sobre la enseñanza de física cuántica. Objetivo: detectar puntos de conflicto y caracterizar posiciones de los profesores frente a las dificultades que ofrece la enseñanza de la física cuántica.	31
Caracterización específica		
Cuestionario FQ2	(Primer ajuste). Relevamiento de concepciones particulares de la física cuántica y sobre la formación recibida.	38
Textos Serie 1	Cuestionarios en base a textos tomados de la bibliografía de	7
Textos Serie 2	Física general sobre el rol de los modelos en el desarrollo de la	5
Textos Serie 2	física, limitaciones de la física clásica, cuestiones particulares	9
Textos Serie 2	de la física cuántica.	8
Experimento ideal.doc	Cuestiones sobre al experimento ideal de Feynman en referencia al comportamiento ondulatorio de partículas.	8
Entrevistas largas FQ1	Entrevistas largas sobre las cuestiones conflictivas detectadas en los instrumentos anteriores.	7
Segunda etapa: evolución del pensamiento de los profesores luego de un curso de formación		
Cuestionario FQ3 (pre-encuesta)	Relevamiento de las concepciones de los profesores a partir de un cuestionario elaborado a partir de una selección final de cuestiones antes del curso de FQ.	11
Cuestionario FQ3 (pos-encuesta)	Relevamiento de las concepciones de los profesores a partir de un cuestionario sobre una selección final de cuestiones al finalizar el curso de FQ.	10
Apunte de clase de los profesores		2
Presentación escrita de una monografía al finalizar el curso.	Temas desarrollados: <ul style="list-style-type: none"> • Estructura de la materia. • Experimentos históricos • Objeto cuántico • Dualidad onda-partícula • Crítica a los textos de media y universitarios básicos. 	1 1 1 1 1
Registros fílmicos de las exposiciones de los docentes.		4

En la Parte II de este informe, describimos los resultados de la primera etapa de la investigación correspondiente al relevamiento de las concepciones de los profesores. El diseño de los instrumentos permitió profundizar progresivamente la investigación y detectar los principales puntos de conflictos en el aprendizaje de temas de física cuántica. En una primera instancia se realizó una *caracterización inicial* del pensamiento de los profesores sobre la ciencia en general, su posicionamiento didáctico frente a la enseñanza, su opinión respecto a la propia formación y sobre aspectos generales de la formación en mecánica cuántica (capítulos 3 y 4). Esta primera caracterización permitió definir cuestiones particulares de la formación en Mecánica Cuántica (MQ) que fueron luego profundizados en la *caracterización específica* posterior (capítulos 5 y 6). Así, cada instrumento asumió un doble rol: por un lado recabar resultados que respondieran los interrogantes planteados, y por otro, poner al descubierto conflictos con las ideas aceptadas por la comunidad científica que sirvieran de base para el diseño de los instrumentos subsiguientes.

Los capítulos que siguen presentan los instrumentos de análisis y resultados de la caracterización inicial y específica de las concepciones docentes en FQ, correspondientes a la primera etapa de la investigación.

Capítulo 3

Caracterización inicial de las concepciones de los profesores

Instrumento de Análisis 1

CAPÍTULO 3: Caracterización inicial

3. 1 Presentación del Instrumento 1: Encuesta FQ1

Objetivo del Cuestionario FQ1:

- Relevar las concepciones docentes respecto a cómo enseñar ciencias
- Relevar los argumentos que avalan sus ideas de incluir o no temas de física cuántica en el polimodal
- Conocer cómo evalúan su propia formación
- Identificar concepciones y grado de formación en algunos temas particulares

Con el propósito de identificar los tópicos que presentaran mayor nivel de complejidad para los profesores se diseñó una amplia encuesta inicial de preguntas abiertas, semia-biertas y de enunciados ponderados. Los profesores debían expresar su grado de acuerdo o desacuerdo respecto a diversas formas de encarar la enseñanza de la ciencia (item1), razones por las que sería conveniente introducir Física Moderna (FM) en el nivel secundario (item2), argumentos por los que consideran que no es posible incluir tópicos de Física actual en la currícula de nivel medio (item3). El ítem 4 pretendía estimar la valoración personal que los profesores hacen sobre propia su formación en diversos temas de la FM y los ítems 5 a 8 relevar aspectos epistemológicos y de formación específica.

A continuación se presenta el protocolo el cuestionario FQ1 que constituye el primer instrumento y luego una descripción detallada de cada ítem, su propósito u objetivo. En el capítulo siguiente se exponen los resultados obtenidos.

INSTRUMENTO 1: Encuesta FQ1:
ENCUESTA PARA PROFESORES DE CIENCIAS

Nombre y apellido:

Colegio/escuela:.....

Área en que se desempeña: Física, Biología, Química, Otra (especifique):.....

.....

Título.....

Nivel en que se desempeña:

Antigüedad en la docencia:.....

1) Los siguientes párrafos sintetizan diversas formas de encarar la enseñanza de la ciencia. Indico mi grado de acuerdo en una escala de 1 a 5 (5=acuerdo totalmente; 1=en total desacuerdo).

1. La educación debe concentrarse en aspectos sociales vinculados a la utilización de la Ciencia y la Tecnología incluyendo cuestiones más amplias que la sola consideración de sus cuerpos teóricos o sus metodologías específicas. En la enseñanza deben analizarse criterios de utilización racional de los conocimientos científicos-tecnológicos y apuntar a apreciar el valor de la investigación y el desarrollo. Al mismo tiempo, deben considerarse los riesgos implicados en su utilización poniendo énfasis en la preservación de la naturaleza y del medio ambiente. El tiempo dedicado a cada tema debe ser flexible.	
2. Debe atenderse a la educación para la vida, el rol activo del alumno y al desarrollo de su curiosidad natural. La preocupación no debe centrarse tanto en la construcción conceptual o la profundización teórica como en la utilidad del conocimiento para la vida. Los conocimientos científicos no son un objetivo en sí mismos sino un medio para comprender características del entorno, que, por su carácter complejo, exigen disponer de información proveniente de distintas disciplinas. En síntesis, la ciencia es un medio apropiado para entender y controlar el ambiente y para desarrollar las habilidades de los alumnos.	
3. Es importante considerar cómo la ciencia funciona en su desarrollo. Debe tenerse en cuenta la naturaleza evolutiva del conocimiento científico, la vinculación entre la teoría y los modelos con la evidencia experimental y la adecuación de dichos modelos para explicar diversos fenómenos. Es fundamental la actividad experimental en el aprendizaje de las ciencias.	
4. La enseñanza debe ser guiada y dirigida por el profesor para mantener un mismo ritmo para todos los alumnos. El profesor debe cumplir con el programa. La enseñanza de las ciencias en cada nivel debe servir como base para el aprendizaje en el nivel siguiente de escolaridad. No se cuestiona si la enseñanza debe ser disciplinar o integrada ya que no compete al profesor definir el currículo. Los conflictos sociales y políticos de los momentos históricos del desarrollo de la ciencia competen a otras disciplinas (área de ciencias sociales o área de tecnología, por ejemplo). Es necesario disponer de más tiempo para poder cubrir los programas en su totalidad.	
5. Debe tenerse en cuenta que la ciencia ha sido desarrollada por especialistas cuya autoridad intelectual legitima las teorías, razón por la cual éstas pueden considerarse como verdaderas. La enseñanza tiene como objetivo, por lo tanto, que el alumno asimile las teorías aceptadas por la comunidad científica y que constituyen las explicaciones correctas de los fenómenos naturales y no debe desviarse para considerar cuestiones políticas, ideológicas o sociales que competen a otras áreas.	

2) Considero beneficioso incluir temas de Física actual en la currícula del Polimodal porque:
(Indico mi grado de acuerdo con las siguientes proposiciones en una escala de 1 a 5 :5= acuerdo totalmente; 1= estoy en total desacuerdo)

Los alumnos se sienten interesados por estos temas dado su actualidad	
Los alumnos se interesan por los principios físicos que rigen las nuevas tecnologías	
Estos temas ofrecen una gran oportunidad didáctica para la presentación de las características propias del trabajo científico y del proceso de elaboración de teorías y modelos en Física	
Contribuye a completar la imagen de la ciencia que tienen los estudiantes	
Estos temas deben formar parte de la cultura científica de un ciudadano	
El conocimiento de las teorías y modelos que la Física ha desarrollado en este siglo potencia el desempeño autónomo, crítico y reflexivo del individuo frente a las nuevas tecnologías	
Otros motivos. (Indique cuáles)	

3) Considero que no es posible incluir tópicos de Física actual en la currícula del Polimodal porque: Indico mi grado de acuerdo con las siguientes proposiciones en una escala de 1 a 5 (= acuerdo totalmente; 1= estoy en total desacuerdo)

1. Las nuevas teorías son muy complicadas	
2. Se necesitan muchos conocimientos para poder comprenderlas	
3. Los programas son muy extensos	
4. Es preferible enseñar los fundamentos clásicos en un orden histórico	
5. Los profesores no tienen una formación adecuada	
6. Los profesores no disponen de recursos didácticos para adaptar los nuevos conocimientos al nivel de comprensión de los alumnos	
7. Se requieren conocimientos matemáticos avanzados	
8. El desarrollo evolutivo de los alumnos no lo hace posible	
9. A los alumnos no les interesan estos temas	
Otras razones (especifique)	

4) Considero que mi formación en los siguientes temas puede caracterizarse de la siguiente manera: mi formación es óptima=5; no conozco este tema=1 o valorar en una escala de 1 a 5

Relatividad		Historia de la ciencia	
Mecánica Cuántica		Física Nuclear	
Nuevas tecnologías basadas en principios de la Física actual		Dualidad del comportamiento de la luz y de la materia	
Cosmología		Epistemología de la ciencia	
Experiencias que cuestionaron los límites de la Física Clásica		Partículas elementales	
Filosofía de la ciencia		Modelo de estructura de la materia	

5) Indico mi grado de acuerdo o desacuerdo con las siguientes proposiciones en una escala de 1 a 5 (5=acuerdo totalmente, 1=estoy en total desacuerdo)

1. Todos los fenómenos que explica la Física Clásica también pueden ser explicados desde la Física Cuántica.	
2. La Física Cuántica puede explicar todos los fenómenos que pueden observarse.	
3. La Física Clásica interpreta sólo fenómenos macroscópicos.	
4. La Física Clásica junto con la Física Cuántica dan cuenta de todos los fenómenos naturales.	
5. La Física ha alcanzado un desarrollo tal en este siglo que ya no quedan puntos controvertidos por investigar.	
6. A partir de los descubrimientos de la Física Cuántica se ha podido conocer cómo es realmente la estructura de la materia.	
7. Todos los fenómenos naturales pueden ser explicados desde la Física Clásica, al menos con alguna aproximación.	
8. La Física Cuántica explica únicamente fenómenos que no pueden observarse.	

6) ¿Conoce algún problema que no pueda ser explicado desde la Física Clásica pero sí desde la Física Cuántica? Si su respuesta es afirmativa enumere algunos.

7) Asocie uno o más términos a cada uno de los siguientes giros (puede ser un experimento que lo ponga en evidencia, un concepto asociado, o al menos una palabra que para usted resulte relacionada aunque no pueda decir por qué)

- a) cuantificación de la radiación.....
- b) cuantificación de la energía.....
- c) localización de la radiación.....
- d) dualidad onda-corpúsculo.....
- e) principio de incertidumbre.....
- f) dualidad de la luz.....
- g) dualidad de la materia.....
- h) orbitales.....
- i) determinismo probabilístico.....
- j) determinismo causal.....
- k) partículas elementales.....
- l) antipartículas.....

8) ¿Indique la rama de la Física que explica las siguientes cuestiones (indique con una cruz, aclare en Otras la rama de la Física a la que se refiere)

PROPOSICIONES	Clási- ca	Cuán- tica	Otras
Un astronauta llega a Marte y observa que su peso es menor que en la Tierra.			
Los planetas se mueven alrededor del Sol en órbitas elípticas.			
Dos ondas idénticas se propagan en el agua y se encuentran en un punto. La energía con que oscila el agua en ese punto no es la suma directa de las energías de las ondas incidentes sino el cuádruplo.			
La frecuencia con que se percibe un sonido cambia cuando el emisor se mueve: aumenta cuando el emisor se acerca y disminuye cuando se aleja.			
Una cuerda de longitud l sujeta en ambos extremos (como una cuerda de guitarra), sólo puede vibrar con valores de frecuencia perfectamente determinados.			
Un rayo de luz que atraviesa la superficie de separación entre dos medios (por ejemplo cuando pasa del aire al agua) se desvía.			
Un rayo de luz proveniente de una estrella se curva al pasar cerca de la Tierra.			
Al chocar un electrón contra una pantalla fluorescente, se observa punto luminoso.			
Un haz de radiación electromagnética de alta energía que incide sobre una superficie metálica, no logra arrancar electrones a menos que su frecuencia supere cierto valor mínimo.			
La velocidad de la luz está determinada por el medio en el cual se propaga (por ej. la velocidad de la luz es mayor en el aire que en el agua).			
Un niño camina en un tren en movimiento. Un automovilista parado en una barrera ve pasar el tren y mide una velocidad (del niño caminando dentro del tren), diferente de la que observa su madre que viaja acompañándolo.			

Un astronauta viaja a la velocidad de la luz a través del cosmos y al cabo de un tiempo vuelve a la Tierra. El tiempo transcurrido hasta el regreso según el astronauta, es diferente del que aseguran haber esperado quienes se quedaron en la Tierra.			
La masa de un objeto se mantiene constante cuando el objeto se mueve a velocidad constante.			
Se ha medido un aumento de la masa de partículas que se mueven aceleradas en un sincrociclotrón.			
Una onda electromagnética de alta energía incide sobre un obstáculo (por ej. una lámina de calcita) y lo atraviesa. A la salida se observan algunas partículas arrancadas y dos ondas electromagnéticas de frecuencia distinta a la de la onda incidente.			
No es posible conocer con exactitud la posición de un electrón si se conoce su velocidad.			
La resolución de un microscopio electrónico es mayor que la de un microscopio óptico.			
La antigüedad de huesos prehistóricos puede medirse a partir del contenido de carbono 14 en ellos.			
Un haz de electrones choca contra la superficie de un cristal y el haz reflejado impresiona una película fotográfica. La figura que se obtiene presenta las características de una figura de interferencia.			
Un haz de electrones puede ser desviado por un campo magnético.			
La luz se comporta como un rayo			
La luz se comporta como una onda			
El número de electrones que puede haber en un orbital atómico está perfectamente determinado.			

9) Indique con una cruz la rama de la física que permite explicar cómo funcionan: (si elige Otras indique a cuál se refiere)

	Clási- ca	Cuán- tica	Otras
1. Una ecografía			
2. Las fibras ópticas			
3. El láser			
4. La conducción eléctrica en metales			
5. La conducción eléctrica en semiconductores			
6. Los transistores			
7. Los equipos para tratamiento médico por ultrasonido			
8. Una miras infrarrojas			
9. radioisótopos			
10. El sonar			
11. Un microscopio electrónico			
12. Un compact disk			
13. La fotocopiadora			
14. Las comunicaciones vía satélite			
15. Un detector Geiger de radiaciones			
16. Un espectrógrafos de líneas			
17. El arrancador del tubo fluorescente			
18. Una lectora del código de barras de los supermercados			
19. Un calefactor solar			

20. Los vidrios espejados			
21. Un circuito integrado			
22. El generador de corriente alterna			
23. Una célula fotoeléctrica			
24. Las lámparas de mercurio del iluminado público			
25. El electroimán			
26. El sistema automático de encendido del alumbrado público			
27. Los sensores de luz			
28. El parlante			

10) Indique según su criterio si el tratamiento de los siguientes temas corresponde a Física Clásica, Física Cuántica o a otras ramas de la Física? Indique con una cruz, si elige Otras indique cuáles.

TEMA	Clási- ca	Cuán- tica	Otras
1. Rayos cósmicos			
2. Efecto Doppler			
3. Superconductores			
4. Interpretación molecular de la temperatura			
5. Calor específico de un gas ideal			
6. Equipartición de la energía en un gas ideal			
7. Fuerzas de Van der Waals			
8. Escala absoluta de temperaturas			
9. Polarización eléctrica de la materia			
10. Polarización de la luz			
11. Modelo microscópico para la corriente eléctrica			
12. Rayos Gamma y rayos X			
13. Ondas electromagnéticas			
14. Decaimiento radioactivo			
15. Reacciones nucleares			
16. Ley de Gravitación Universal			
17. Leyes de Maxwell del electromagnetismo			
18. Partículas elementales y antipartículas			
19. Entropía			
20. Espectros atómicos			
21. Teoría cinética de los gases			
22. Fuentes de campo magnético			
23. Difracción de la luz			
24. Efecto fotoeléctrico			
25. Efecto Compton			
26. Modelo de estructura de la materia			
27. Movimiento relativo			
28. Equivalencia masa-energía			
29. Fuerzas no conservativas			
30. Contracción de las longitudes en sistemas inerciales en movimiento			
31. Colisiones atómicas			
32. Propulsión de aviones a reacción			
33. Propulsión de cohetes (cómo se impulsan)			
34. Pérdida de calor por radiación			
35. Generación de energía en las estrellas			
36. Sistemas termodinámicos abiertos			
37. Difracción de electrones			

3. 2 Descripción y objetivos de cada cuestión

Pregunta 1:

Los siguientes párrafos sintetizan diversas formas de encarar la enseñanza de la ciencia. Indico mi grado de acuerdo en una escala de 1 a 5 (5=acuerdo totalmente ; 1=en total desacuerdo).

Este ítem consistió en cinco párrafos, cada uno de los cuales presentaba un enfoque parcial de la ciencia. Estos enfoques fueron tomados de una investigación anterior en la que se caracterizaron las concepciones de los profesores respecto de la enseñanza de la ciencia y se determinó como se distribuyen las adhesiones y rechazos de los profesores hacia las mismas (Utges et al., 1997b y 1998). Fernández et al. (2002), por su lado, reconocen siete variantes de estas concepciones presentes en libros de textos de ciencia, que consideran que influyen fuertemente el pensamiento de los profesores y recientemente Solís (2013) detecta los mismos campos presentes entre las expectativas y concepciones didácticas de estudiantes de un master universitario en formación de profesorado de educación secundaria obligatoria. Los profesores podían acordar parcialmente con cada uno de estos enfoques, expresando su grado de acuerdo en una escala Likert de 1 a 5. El primer párrafo aludía a una visión de la ciencia desde una perspectiva CTSA y al uso racional de los desarrollos científico-tecnológicos. El segundo al desarrollo del individuo y la educación para la vida. El tercero a la naturaleza del desarrollo científico, las relaciones entre teorías y modelos y la ciencia como actividad experimental por excelencia. El cuarto párrafo, a la necesidad del profesor de cumplir con el desarrollo de la currícula prevista. El quinto párrafo, presenta una visión aséptica de la ciencia, cerrada y acabada, legitimada por la autoridad intelectual de los científicos.

El objetivo fue conocer cómo se encuadraban los profesores en relación a estas visiones de la ciencia y generar datos para establecer correlaciones con otros ítems.

Pregunta 2:

2) Considero beneficioso incluir temas de Física actual en la currícula del Polimodal porque:

*(Indico mi grado de acuerdo con las siguientes proposiciones en una escala de 1 a 5 :
5=acuerdo totalmente ; 1= estoy en total desacuerdo)*

En este caso, se presentaron seis enunciados surgidos a partir de entrevistas informales realizadas previamente, que proponían diversas razones por las que puede considerarse necesario o beneficioso la enseñanza de la ciencia en la escuela. Al igual que en el caso anterior, los profesores podían acordar parcialmente con cada uno de los enunciados. En un último apartado, los encuestados podían agregar alguna razón importante que no hubiera sido considerada.

El objetivo de esta pregunta fue evaluar las opiniones de los profesores respecto de la factibilidad de incluir temas de física actual en la enseñanza y las razones que podrían avalar el desarrollo de estos temas.

Pregunta 3:

3) Considero que no es posible incluir tópicos de Física actual en la currícula del Polimodal porque:

*(Indico mi grado de acuerdo con las siguientes proposiciones en una escala de 1 a 5 :5=
acuerdo totalmente ; 1= estoy en total desacuerdo)*

Siguiendo la metodología anterior, se presentó a los profesores una serie de nueve enunciados para que expresaran su grado de acuerdo. Seis de estos enunciados fueron extraídos del trabajo de Oñorbe (1996) en el que señala algunas razones que suelen esgrimirse en contra de la introducción de nuevos conceptos en los currículos, otros tres surgieron de las entrevistas preliminares y en una última opción los profesores podían agregar algún otro argumento no contemplado.

El objetivo fue relevar el grado de rechazo a la inclusión de temas de física actual en la currícula

Pregunta 4:

4) Considero que mi formación en los siguientes temas puede caracterizarse de la siguiente manera: mi formación es óptima=5; no conozco este tema=1 o valorar en una escala de 1 a 5

Se presentó en este caso un listado de temas relacionados al desarrollo de la física moderna. El objetivo fue conocer la evaluación personal que los profesores hacían de su formación y establecer correlaciones posteriores entre estas valoraciones y las respuestas a los ítems 2 y 3. Suponíamos, por ejemplo, que cierto rechazo a la inclusión de temas de física actual, podría estar relacionado con una baja valoración de la propia formación.

Pregunta 5:

En esta pregunta se presentaron aspectos vinculados a la epistemología de las ciencias. Nuevamente los profesores acordaban en una escala de 1 a 5 con cada proposición presentada. Se relevaron aspectos vinculados a los límites y validez de la física clásica y la física cuántica y cuestiones referidas al carácter dinámico de la ciencia.

El objetivo fue investigar si los profesores entendían la ciencia como una disciplina en continua evolución, su carácter modelizador de la realidad y la necesidad de establecer límites de validez de los modelos intervinientes.

Pregunta 6:

6) ¿Conoce algún problema que no pueda ser explicado desde la Física Clásica pero sí desde la Física Cuántica? Si su respuesta es afirmativa enumere algunos.

Esta fue una pregunta abierta en la cual se solicitó a los profesores que citaran libremente un tópico que para ellos tuviera sentido vincular con la física cuántica.

El objetivo fue estudiar si conocían algunas de las experiencias que cuestionaron la física clásica y dieron origen a la física cuántica y si son conscientes de la existencia de límites de validez entre la física clásica y cuántica. A fin de brindar un espacio de expresión lo más amplio posible y evitar opciones no contempladas, en este caso no se propusieron opciones como en los ítems anteriores.

Pregunta 7:

7) *Asocie uno o más términos a cada uno de los siguientes giros (puede ser un experimento que lo ponga en evidencia, un concepto asociado, o al menos una palabra que para usted resulte relacionada aunque no pueda decir por qué)*

Este ítem consistió en una propuesta de libre asociación de ideas a diferentes temas de la física cuántica vinculados a contenidos presentes en libros de nivel universitario básico. En las entrevistas preliminares surgieron claros indicios de la limitada formación de los profesores en física cuántica. Por este motivo, no se pidieron explicaciones sobre los contenidos seleccionados, sino que simplemente asocien cualquier cuestión que consideraran vinculada (el nombre de un físico prominente, un concepto afín, una ecuación, o una explicación en el mejor de los casos). Con esta pregunta se intentó contemplar los casos en que no se obtuvieran respuestas en la pregunta anterior, dado su carácter totalmente abierto.

Preguntas 8, 9 y 10:

8) *¿Indique la rama de la Física que explica las siguientes cuestiones (indique con una cruz, aclare en Otras la rama de la Física a la que se refiere)*

9) *Indique con una cruz la rama de la física que permite explicar cómo funcionan: (si elige Otras indique a cuál se refiere)*

10) *Indique según su criterio si el tratamiento de los siguientes temas corresponde a Física Clásica, Física Cuántica o a otras ramas de la Física? Indique con una cruz, si elige Otras indique cuáles.*

Con el objetivo de continuar con el relevamiento de la formación de los profesores desde diferentes perspectivas, en las preguntas 8, 9 y 10 los profesores debían encuadrar una serie de proposiciones dentro de la física clásica (FC), la física cuántica (FQ) u otras ramas de la física.

La pregunta 8 consistió en 23 situaciones en las que intervenían fenómenos físicos, los profesores debían encuadrarlos dentro de la FC o la FQ según la rama de la física desde la que pudieran explicarse

En la pregunta 9 se presentaron 28 dispositivos y avances tecnológicos con el objetivo de determinar qué cuestiones del mundo actual los profesores reconocen como producto de avances propiciados por la física cuántica.

La pregunta 10 consistió en 37 conceptos, fenómenos y situaciones, tal como aparecen nombrados en los índices de contenidos de libros de física universitaria básica, para los que debía determinarse la rama de la física a la que pertenecían.

Capítulo 4

Caracterización inicial: Resultados y conclusiones

CAPITULO 4: Resultados de la caracterización inicial

4.1 Introducción

Este Cuestionario FQ1 fue aplicado a 31 profesores de ciencias de enseñanza media de Física, Matemática y Biología. El análisis de las respuestas se realizó en dos etapas que involucraron métodos cuantitativos y cualitativos. En primer lugar se consideraron las distribuciones de frecuencia en cada ítem a fin de obtener un panorama global de las opiniones de los profesores sobre cada uno de los temas tratados en el cuestionario. En segundo lugar se procuró determinar la estructura interna de las representaciones de los docentes, tomando como base las correlaciones entre respuestas y la aplicación de un Análisis factorial de Componentes Principales (ACP). Entrevistas informales posteriores a la aplicación del instrumento permitieron aclarar aspectos de las respuestas en caso de ambigüedades

A continuación se presentan los resultados de cada pregunta del cuestionario FQ1. Las tablas muestran las distribuciones de respuestas, los valores medios, las desviaciones standard y una breve interpretación en la columna de la derecha.

En la sección siguiente, a partir del ACP, se caracterizan cuatro categorías que describen el pensamiento del profesor en relación a la enseñanza de la ciencia y de la física cuántica en particular.

Más adelante se comentan los resultados generales de la caracterización inicial y se cierra la presentación con una breve síntesis en la que se destacan los aspectos a indagar en la caracterización específica.

4.2 Resultados de la caracterización inicial

4.2.1 Frecuencia de respuestas e histogramas

Pregunta 1: Los siguientes párrafos sintetizan diversas formas de encarar la enseñanza de la ciencia. Indico mi grado de acuerdo en una escala de 1 a 5 (5=acuerdo totalmente; 1=en total desacuerdo).

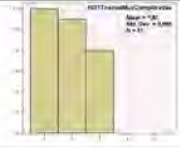
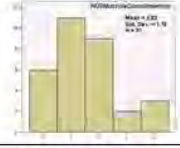
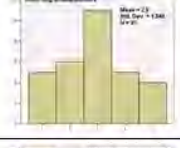
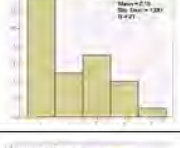
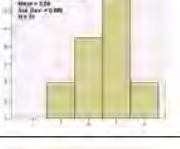
	Enunciados: Concepciones sobre la ciencia	Mean	Desv. Std	
	C1: La educación debe concentrarse en aspectos sociales (enfoque CTS), deben analizarse criterios de utilización racional de los conocimientos científicos-tecnológicos, énfasis en la preservación de la naturaleza y del medio ambiente.	4,16	,779	Aceptada por la mayoría. Casi todos se identifican con esta concepción. Es elegida por 26 de los 31 individuos.
	C2: Los conocimientos científicos no son un objetivo en sí mismos sino un medio para comprender y controlar el entorno, esto exige disponer de información de distintas disciplinas. La ciencia es un medio apropiado para entender y controlar el ambiente y para desarrollar las habilidades de los alumnos.	4,00	1,065	Aceptada por la mayoría, 15 adhieren fuertemente, y 6 más débilmente.
	C3: Es importante considerar cómo funciona la ciencia. Debe tenerse en cuenta la naturaleza evolutiva del conocimiento científico, la vinculación teoría-modelos y evidencia experimental y la adecuación de dichos modelos para explicar diversos fenómenos. Es fundamental la actividad experimental en el aprendizaje de las ciencias.	3,77	1,087	Si bien muchos adhieren a esta postura, otros tantos no se comprometen, aunque tampoco la rechazan.
	C4: La enseñanza debe ser guiada y dirigida por el profesor para mantener un mismo ritmo para todos y cumplir con el programa. No compete al profesor definir el currículo. Los conflictos CTS competen a otras disciplinas. Es necesario disponer de más tiempo para poder cubrir los programas en su totalidad.	1,84	,779	Rechazada por la mayoría (26 individuos califican con 1 o 2 esta concepción). Ninguno de los individuos adhirió fuertemente.
	C5: La ciencia ha sido desarrollada por especialistas. La enseñanza tiene como objetivo que el alumno asimile las teorías aceptadas por la comunidad científica y que constituyen las explicaciones correctas de los fenómenos naturales y no debe desviarse para considerar cuestiones políticas, ideológicas o sociales que competen a otras áreas.	1,32	,599	Fuertemente rechazada. Todas las respuestas fueron de rechazo, ninguna adhesión. Es la que presenta la menor desviación estándar.

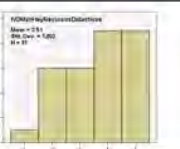
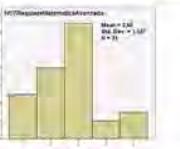
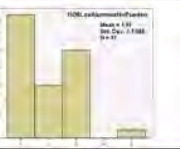
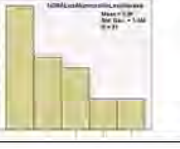
Pregunta 2: Considero beneficioso incluir temas de Física actual en la currícula del Polimodal porque: (Indico mi grado de acuerdo con las siguientes proposiciones en una escala de 1 a 5 : 5=acuerdo totalmente ; 1= estoy en total desacuerdo =1)

	Es beneficioso enseñar FQ en media porque...	Mean	Desv. Std.	
	B1: los alumnos se interesan por los temas actuales	3,61	1,086	Las respuestas se distribuyen uniformemente entre adhesiones y rechazos
	B2: los alumnos se interesan por los fundamentos de las nuevas tecnologías	2,42	,992	Rechazada por muchos, nadie adhiere totalmente
	B3: oportunidad didáctica para la presentación de las características propias del trabajo científico y del proceso de elaboración de teorías y modelos en Física	3,52	1,122	Preferentemente aceptada
	B4: Contribuye a completar la imagen de la ciencia	3,38	,919	Levemente aceptada, gran parte no toma posición.
	B5: deben formar parte de la cultura científica de un ciudadano	3,90	,651	Si bien es aceptada levemente, nadie rechaza esta proposición
	B6: potencia el desempeño autónomo, crítico y reflexivo del individuo frente a las nuevas tecnologías	3,29	1,488	Esta postura es o bien rechazada o bien es aceptada, todos toman posición

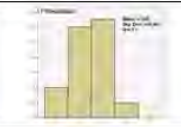
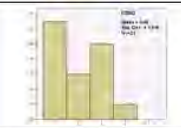
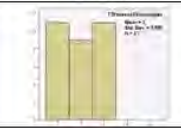
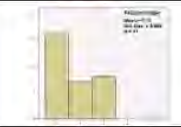
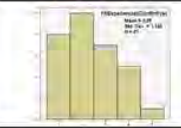

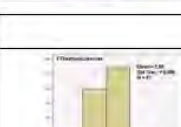
Pregunta 3: Considero que no es posible incluir tópicos de Física actual en la currícula del Polimodal porque

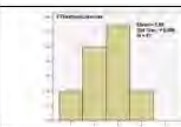
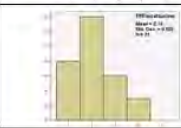
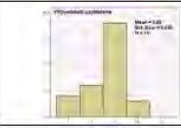
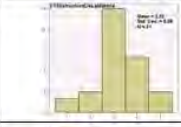
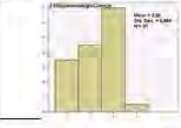
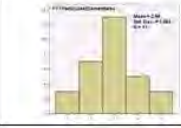
(Indico mi grado de acuerdo con las siguientes proposiciones en una escala de 1 a 5:= acuerdo totalmente; 1= estoy en total desacuerdo =1)

	No es posible enseñar FQ en media porque...	Mean	Desv. Std.	
	NO1: Las nuevas teorías son muy complicadas	1,87	0,806	Rechazada por la mayoría (23 sobre un total de 31). Nadie adhiere a esta postura.
	NO2: Se necesitan muchos conocimientos previos	2,52	1,180	Rechazada por la mayoría
	NO3: Los programas son muy extensos	3,26	2,016	Igualmente aceptada que rechazada. La respuesta más frecuente muestra indecisión
	NO4: Es preferible enseñar los fundamentos clásicos en un orden histórico	2,13	1,231	Fuertemente rechazada
	NO5: Los profesores no tienen una formación adecuada	3,58	0,886	Igualmente aceptada que rechazada

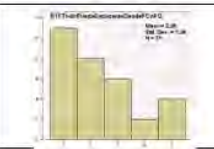
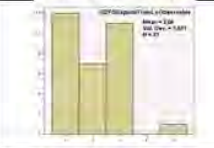
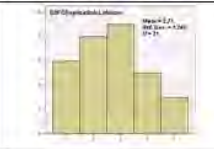
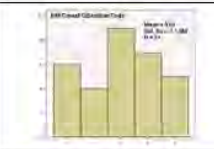
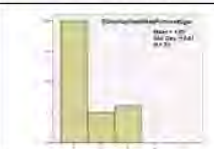
	Enunciados: (cont. Anterior)	Mean	Std. Deviation	
	NO6: Los profesores no disponen de recursos didácticos para adaptar los nuevos conocimientos al nivel de comprensión de los alumnos	3,61	1,202	Igualmente aceptada que rechazada (tendencia leve a aceptar)
	NO7: Se requieren conocimientos matemáticos avanzados	2,68	1,137	Rechazada por muchos
	NO8: El desarrollo evolutivo de los alumnos no lo hace posible	1,97	1,048	Fuertemente rechazada por la mayoría
	NO9: A los alumnos no les interesan estos temas	2,29	1,346	Fuertemente rechazada por la mayoría

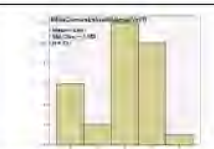
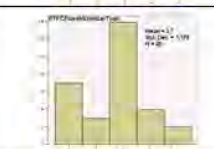
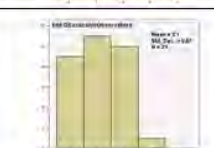
Pregunta 4: Considero que mi formación en los siguientes temas puede caracterizarse de la siguiente manera: mi formación es óptima=5; no conozco este tema=1 o valorar en una escala de 1 a 5

	Opinión sobre la propia formación	Mean	Std. Deviation	1-No conozco el tema. 5- Mi formación es óptima
	F1: Relatividad	2,42	0,807	Escaso conocimiento
	F2: Mecánica Cuántica	2,03	1,016	No conoce el tema o manifiesta escaso conocimiento
	F3: Nuevas tecnologías basadas en principios de la Física actual	2,00	,856	No conoce el tema o manifiesta escaso conocimiento
	F4: Cosmología	1,74	0,855	No conoce el tema o manifiesta escaso conocimiento
	F5: Experiencias que cuestionaron los límites de la Física Clásica	2,39	1,145	Formación relativa o escaso conocimiento
	F6: Filosofía de la ciencia	2,16	0,968	No conoce el tema o manifiesta escaso conocimiento

	(cont. anterior)	Mean	Std. Deviation	
	F7: Historia de la ciencia	2,55	0,888	Formación relativa o escaso conocimiento
	F8: Física Nuclear	2,13	0,922	No conoce el tema o manifiesta escaso conocimiento
	F9: Dualidad del comportamiento de la luz y de la materia	2,65	0,839	Formación relativa
	F10: Epistemología de la ciencia	2,29	0,864	Formación relativa
	F11: Partículas elementales	2,94	1,093	No conoce el tema o manifiesta escaso conocimiento
	F12: Modelo de estructura de la materia	3,23	0,990	Formación relativa

Pregunta 5: Indico mi grado de acuerdo o desacuerdo con las siguientes proposiciones en una escala de 1 a 5 (5=acuerdo totalmente, 1=estoy en total desacuerdo)

	Enunciados:	Mean	Std. Deviation	
	E1: los fenómenos que explica la Física Clásica también pueden ser explicados desde la Física Cuántica	2,35	1,380	Rechazada fuertemente por muchos
	E2: La Física Cuántica puede explicar todos los fenómenos que pueden observarse	2,06	1,031	Rechazada fuertemente por algunos, otros tantos muestran indecisión
	E3: La Física Clásica interpreta sólo fenómenos macroscópicos	2,71	1,243	Preferentemente rechazada
	E4: La Física Clásica junto con la Física Cuántica dan cuenta de todos los fenómenos naturales	3,03	1,354	Mayormente aceptada, aunque la distribución de respuestas es bastante uniforme
	E5: ya no quedan puntos controvertidos por investigar en la Física actual	1,55	,810	Fuertemente rechazada por la mayoría, nadie responde positivamente

	Enunciados:	Mean	Std. Deviation	
	E6: A partir de la Física Cuántica se ha podido conocer cómo es realmente la estructura de la materia	2,94	1,153	Igualmente aceptada que rechazada, la respuesta más frecuente muestra indecisión
	E7: Todos los fenómenos naturales pueden ser explicados desde la Física Clásica, al menos con alguna aproximación	2,70	1,178	Rechazada por muchos, la respuesta más frecuente muestra indecisión
	E8: La Física Cuántica explica únicamente fenómenos que no pueden observarse	2,10	,870	Rechazada por la mayoría

Pregunta 6: ¿Conoce algún problema que no pueda ser explicado desde la Física Clásica pero sí desde la Física Cuántica? Si su respuesta es afirmativa enumere algunos.

Las respuestas no arrojaron resultados significativos. Sólo se cita efecto fotoeléctrico y la radiación del cuerpo negro. El 80% no responde lo que evidencia la falta de formación.

Pregunta 7: Asocie uno o más términos a cada uno de los siguientes giros (puede ser un experimento que lo ponga en evidencia, un concepto asociado, o al menos una palabra que para usted resulte relacionada aunque no pueda decir por qué)

Los términos empleados por los profesores fueron sumamente variados. En la tabla que sigue, se agruparon según se refirieran al mismo tema (se muestra en negrita la respuesta más frecuente)

Pregunta 7: Ideas que asocian a temas de la FQ

cuantificación de la radiación	cantidad de fotones que despiden un átomo fotón , núcleo del átomo, calor conducción del calor continua váticos rayos X, gamma, ultravioletas, paquetes
cuantificación de la energía	niveles energéticos , electrones excitados Paquetes (de energía) , tipos de energía cantidad de masa en movimiento joule empaquetada hipótesis de Planck
localización de la radiación	lugar donde se origina la radiación Sol foco emisor radioisótopos, uranio, cobalto, núcleo del átomo
dualidad onda-corpúsculo	luz forma en que se transmite la luz forma de llamar a un haz de luz luz, energía
principio de incertidumbre	localización de electrones en orbitales Heisenberg orbitales, configuración electrónica no saber qué hay más allá de lo desconocido de Heisenberg, velocidad y posición en el mismo tiempo

dualidad de la luz	Fotón onda-corpúsculo naturaleza rayos
dualidad de la materia	Átomo materia-energía continuidad-discontinuidad
orbitales	niveles energéticos ubicación de los electrones átomo Bohr, electrones electrones zona probable de trayectorias que describen los electrones al girar alrededor del átomo p, q, s, z
determinismo probabilístico	aproximación a algo que puede pasar aplicación a hechos que pueden suceder relacionado con la posibilidad, la estadística rango que varía entre 0 y 1 muchos datos estadísticas probabilidad de encontrar un electrón en un orbital orbitales
determinismo causal	causa-efecto, efecto-causa aplicación de hechos sucedidos relacionado con lo ocasional ley de Newton principio del equilibrio móvil
partículas elementales	átomo electrón, protón, neutrón, quarks electrón, protón, fotón electrón, protón, neutrón átomos, partículas subatómicas átomo, materia, sustancia nucleones y electrones
antipartículas	antimateria átomo Einstein velocidad de la luz, Einstein
Temas no explicados desde la F Clásica pero sí desde la F Cuántica	Fusión nuclear Transformación de materia en energía, desintegración atómica, explicación cuántica de la luz

Preguntas 8, 9 y 10:

8) ¿Indique la rama de la Física que explica las siguientes cuestiones (indique con una cruz, aclare en Otras la rama de la Física a la que se refiere)

9) Indique con una cruz la rama de la física que permite explicar cómo funcionan:

(si elige Otras indique a cuál se refiere)

10) Indique según su criterio si el tratamiento de los siguientes temas corresponde a Física Clásica, Física Cuántica o a otras ramas de la Física ?Indique con una cruz, si elige Otras indique cuáles.

Las tablas muestran los resultados agrupados según la rama de la física en que el tópico fue encuadrado. Los valores entre paréntesis indican el número de veces que el tema fue asignado a la Física Clásica (FC), la Física Cuántica (FQ) o a la opción *otras ramas de la física*, respectivamente. La opción *otras* no fue elegida en forma mayoritaria en ningún caso. Por ejemplo 4/5/2 quiere decir que 4 profesores encuadran el tema dentro de FC, 5 lo hicieron en la FQ y 2 lo atribuyeron a otras.

Pregunta 8: La rama de la física que explica las siguientes situaciones	
Clásica: los encuestados acuerdan en que estas consignas corresponden a la FC. Todas las consignas propuestas para esta sección corresponden efectivamente a la Física Clásica	Cuántica: los encuestados acuerdan en que estas consignas corresponden a la FQ. Sin embargo, se incluyen enunciados vinculados a las ondas y algunos fenómenos de la relatividad
(11/0/0) Un astronauta llega a Marte y observa que su peso es menor que en la Tierra. (Acuerdo total)	(0/11/0) Un haz de radiación electromagnética de alta energía que incide sobre una superficie metálica, no logra arrancar electrones a menos que su frecuencia supere cierto valor mínimo. (Acuerdo total)
(9/2/0) La masa de un objeto se mantiene constante cuando el objeto se mueve a velocidad constante.	(0/11/0) Al chocar un electrón contra una pantalla fluorescente, se observa punto luminoso. (Acuerdo total)
(9/0/2) Los planetas se mueven alrededor del Sol en órbitas elípticas.	(1/10/0) Una onda electromagnética de alta energía incide sobre un obstáculo (por ej. una lámina de calcita) y lo atraviesa. A la salida se observan algunas partículas arrancadas y dos ondas electromagnéticas de frecuencia distinta a la de la onda incidente. (Acuerdo casi total)
(8/3/0) Un niño camina en un tren en movimiento. Un automovilista parado en una barrera ve pasar el tren y mide una velocidad (del niño caminando dentro del tren), diferente de la que observa su madre que viaja acompañándolo.	(2/9/0) La luz se comporta como una onda
(7/4/0) Un haz de electrones puede ser desviado por un campo magnético.	(2/8/1) La frecuencia con que se percibe un sonido cambia cuando el emisor se mueve: aumenta cuando el emisor se acerca y disminuye cuando se aleja
(6/4/0) Un rayo de luz que atraviesa la superficie de separación entre dos medios (por ejemplo cuando pasa del aire al agua) se desvía.	(1/8/2) No es posible conocer con exactitud la posición de un electrón si se conoce su velocidad.
(6/3/1) Una cuerda de longitud l sujeta en ambos extremos (como una cuerda de guitarra), sólo puede vibrar con valores de frecuencia perfectamente determinados.	(2/7/0) Se ha medido un aumento de la masa de partículas que se mueven aceleradas en un sincrociclotrón
(6/3/0) La velocidad de la luz está determinada por el medio en el cual se propaga (por ej. la velocidad de la luz es mayor en el aire que en el agua).	

Indefinición Clásica/ Cuántica:
En este grupo se consideraron las cuestiones que obtuvieron un 50% de adhesión a la FC y un 50% a la FQ.
(5/6/0) Un haz de electrones choca contra la superficie de un cristal y el haz reflejado impresiona una película fotográfica. La figura que se obtiene presenta las características de una figura de interferencia.
(5/6/0) La luz se comporta como un rayo.
(5/6/0) Dos ondas idénticas se propagan en el agua y se encuentran en un punto. La intensidad con que oscila el agua en ese punto no es la suma directa de las energías de las ondas incidentes sino el cuádruplo.
Indefinición Cuántica/Otras
En este grupo se consideraron las cuestiones que obtuvieron un 50% de adhesión a la FQ y un 50% a Otras.
(0/6/5) Un rayo de luz proveniente de una estrella se curva al pasar cerca de la Tierra
(0/4/7) La antigüedad de huesos prehistóricos puede medirse a partir del contenido de carbono 14 en ellos
Indefinición general
(4/2/3) Un astronauta viaja a la velocidad de la luz a través del cosmos y al cabo de un tiempo vuelve a la Tierra. El tiempo transcurrido hasta el regreso según el astronauta, es diferente del que aseguran haber esperado quienes se quedaron en la Tierra.
(2/4/1) La resolución de un microscopio electrónico es mayor que la de un microscopio óptico.
(5/4/2) El número de electrones que puede haber en un orbital atómico está perfectamente determinado

Pregunta 9: la rama de la física que permite explicar cómo funciona	
Física Clásica	Física Cuántica
Conducción en metales (11/0/0)	Célula fotoeléctrica (0/11/0)
Conducción en semiconductores (11/0/0)	Láser (0/11/0)
Electroimán (11/0/0)	Miras infrarrojas (1/11/0)
Generador de corriente alterna (11/0/0)	Lectora de código de barras (1/10/0)
Parlantes (11/0/0)	Compact disk (0/9/0)
Transistores (11/0/0)	Sensores de luz (1/8/0)
Tubo fluorescente (11/0/0)	Detector Geiger (1/7/0)
Sonar (8/0/0)	Comunicaciones satelitales (2/7/0)
Vidrios espejados (8/2/0)	Fotocopiadora (2/7/0)
Calefactor solar (8/3/0)	Radioisótopos (0/7/4)
Ecografía (7/4/0)	Fibras ópticas (3/6/0)
Equipos de ultrasonido (7/4/0)	Microscopio electrónico ((3/6/0)
Circuito integrado (6/3/0)	
Indefiniciones	
Las lámparas de mercurio del iluminado público (4/4/3)	
El sistema automático de encendido del alumbrado público (5/4/0)	
Un espectrógrafos de líneas (4/5/0)	

Pregunta 10: la rama de la física que explica el tratamiento del temas	
Física Clásica	Física Cuántica
Interpretación molecular de la temperatura (10/0/0)	Efecto Doppler (0/10/0)
Sistemas termodinámicos abiertos (10/0/0)	Difracción de electrones (1/9/0)
Calor específico de un gas ideal (9/0/0)	Decaimiento radioactivo (0/8/2)
Difracción de la luz (9/1/0)	Efecto fotoeléctrico (3/7/0)
Escala absoluta de temperaturas (9/1/0)	Efecto Compton (2/6/0)

Fuentes de campo magnético (9/1/0) Ley de Gravitación Universal (9/1/0) Fuerzas de Van der Waals (8/2/0) Leyes de Maxwell del electromagnetismo (8/2/0) Modelo de estructura de la materia (8/0/2) Propulsión de cohetes (cómo se impulsan) (8/1/1) Entropía (7/1/2)	Rayos Gamma y rayos X (2/6/2)
Indefiniciones	
Contracción de las longitudes en sistemas inerciales en movimiento (6/4/0) Equivalencia masa-energía (3/5/0) Movimiento relativo (4/6/0) Ondas electromagnéticas (5/5/0) Partículas elementales y antipartículas (5/5/0) Pérdida de calor por radiación (6/4/0) Polarización eléctrica de la materia (6/4/0) Colisiones atómicas (2/5/3) Generación de energía en las estrellas (1/5/4) Polarización de la luz (2/4/4) Rayos cósmicos (5/3/2) Espectros atómicos (0/0/0)	

4.2.2 Resultados de la aplicación del análisis de componentes principales mediante SSPS

El análisis anterior se completó con la determinación de la estructura interna de las representaciones de los docentes tomando como base las correlaciones entre respuestas y la aplicación de un análisis factorial de componentes principales (ACP), (Rodrigo et al. 1993). Conversaciones informales posteriores a la aplicación del instrumento permitieron aclarar aspectos de las respuestas en caso de ambigüedades.

Los datos se analizaron con el programa SSPS (Perez, 2001). Cada enunciado fue considerado como una variable (con valores discretos de 1 a 5) y cada docente como un caso. Luego de varios ensayos, y analizando las condiciones necesarias que deben cumplir las variables para que el método arroje resultados valederos, se incluyeron en el análisis las preguntas: 1 (concepciones sobre la ciencia), 2 (razones que justifican enseñar FQ en el nivel medio), 3 (razones por las que no está de acuerdo en enseñar FQ en el nivel medio) y 5 (aspectos epistemológicos). No se incluyó como variable la pregunta 4 vinculada a la

formación debido a la presencia de muchas respuestas en blanco. Tampoco las preguntas 6 a 10 ya que no entraban en la categoría de enunciados ponderados. Se eliminaron, además, los enunciados de comunalidad menores a 0,4 y para optimizar los resultados se aplicó una rotación varimax. Presentamos en la tabla 4.1 una agrupación de las variables en 4 componentes que explican el 63% de la varianza y a las que el método convergió en 6 iteraciones. Para una mejor visualización, se omiten las variables (enunciados) de peso factorial menor a 0,5. Los pesos factoriales positivos, indican la adhesión a lo expresado en el enunciado y los negativos, un rechazo.

En la columna de la izquierda, se lee en forma resumida el nombre de la variable y un código que identifica el enunciado y la pregunta a la que pertenece de igual forma en que se presentó en el análisis de secciones anteriores. Así, en letras se identifica el enunciado de la pregunta y en número la opción:

Pregunta 1: Concepciones sobre la enseñanza de la ciencia (C1,C2,C3,C4,Y C5)

Pregunta 2: Por qué puede ser beneficioso introducir FQ (B1,B2,B3,B4,B5,B6)

Pregunta 3: Por qué no es posible introducir FQ (NO1,NO2,NO3,NO4,NO5.NO6,NO7, NO8,NO9)

Pregunta 5: Alcances y limitaciones FC-FQ (E1,E2,E3,E4,E5,E6,E7)

Tabla 4.1: Matriz de componentes y pesos factoriales resultantes de la aplicación del ACP

Rotated Component Matrix(a) 4 factores (com >0,4) 63% varianza explicada	Componente			
	1	2	3	4
NO7RequiereMatematicaAvanzada	0,818			
NO3ProgramasExtensos	0,813			
NO2MuchosConocimientos	0,767			
E5NoHayNadaMasPorInvestigar	0,754			
NO8LosAlumnosNoPueden	0,683			-0,520
E2FQExplicaTodoLoObservable	0,593			
E8FQExolicaNoObservables	0,586	0,523		

E3FCExplicaSoloLoMacro		0,818		
C4DebeCompletarPrograma		0,785		
NO9ALosAlumnosNoLesInteresa		0,665		
E7FCPuedeExplicarTodo		0,658		
E6SeConoceEstructMateriaPorFQ		0,647		
E4FCmasFQExolicanTodo		0,587		
B3ComoFuncionaLaCiencia			0,727	
C3ComoFuncionaLaCiencia			0,700	
B4CompletarImagenCiencia			0,660	
E1FTodoPuedeExplicarseDesdeFCoFQ			0,651	
B5CulturaCientificaCiudadano			0,627	0,576
B6DesempeñoAutonomo			0,615	
NO4PrefiereOrdenHistorico				-0,713
B2ConocerFundamentosTecnologias				0,680
C1EnfoqueCTSA				0,678
C2EducacionParaLaVida				0,642
NO1TeoriasMuyComplicadas			-0,521	-0,553

4.3. Análisis de los resultados de la caracterización inicial

Se presenta a continuación una discusión de los resultados obtenidos a partir del cuestionario FQ1 y luego, en la sección siguiente, la interpretación de las categorías emanadas de la aplicación del análisis de componentes principales.

4.3.1 Análisis de los resultados del cuestionario FQ1

La mayoría de los encuestados coinciden en que la educación en ciencias debe atender no sólo a cuestiones disciplinares sino también al desarrollo de habilidades y a la discusión de criterios de utilización racional de los conocimientos científicos-tecnológicos y de

preservación de la naturaleza y del medio ambiente (C1 y C2). Rechazan la idea de ciencia como reflejo de una realidad inmutable reservada a especialistas y la del profesor como único generador del aprendizaje (C4 y C5). Sin embargo, la concepción de una ciencia dinámica en continua evolución, la relatividad de la verdad científica expresada a través de los límites de las teorías y modelos, la vinculación teoría-modelo-evidencia experimental, no es fácilmente comprendida. Evidencia de esto es el porcentaje de encuestados que no se define, dando como resultado una fuerte dispersión en las respuestas en C3. Recientemente el estudio publicado por Solís et al., (2013), puntualiza la indefinición epistemológica en relación con la naturaleza de las ciencias en muchos profesores en relación con la naturaleza de las ciencias.

En cuanto al interés de enseñar física cuántica aparecen algunas contradicciones. Así, se admite en general que estos temas deben formar parte de la cultura científica de un ciudadano (B5) pero no siempre se valora la potencialidad de la ciencia para desarrollar el desempeño autónomo, crítico y reflexivo del individuo frente a las nuevas tecnologías (B6). Esta última concepción o bien es aceptada o bien es rechazada, no hay respuestas ambiguas. Por otro lado, se acuerda en que la enseñanza de la física cuántica ofrece una oportunidad didáctica para la presentación de las características propias del trabajo científico y del proceso de elaboración de teorías y modelos en Física (adhesión a B3), a pesar de la falta de definición clara por este aspecto en C3.

Los profesores no creen que la física cuántica sea una teoría demasiado complicada (NO1), o que se necesiten demasiados conocimientos previos para poder enseñarla (NO2), ni que sea necesario enseñar los fundamentos clásicos en un orden histórico (NO4). Rechazan la idea de que el desarrollo evolutivo de los alumnos sea un impedimento (NO8), que se requieran conocimientos matemáticos muy avanzados (NO7) y que a los alumnos no les interesen los temas (NO9). Por otro lado, reconocen que no tienen una formación adecuada (NO5) y que no disponen de recursos didácticos para adaptar los nuevos conocimientos al nivel de comprensión de los alumnos (NO6). No hay consenso en que la extensión de los programas sea una razón para no incluir de FQ (NO3).

En cuanto a la formación ninguno de los temas obtuvo el máximo puntaje (5=formación óptima), mientras que fueron varios los ítems a los que muchos profesores asignaron el mínimo (1=no conozco este tema) o muy cercano (2), es el caso de mecánica cuántica, nuevas tecnologías basadas en la física actual, cosmología, experiencias que cuestionan la física clásica, física nuclear. Los puntajes más altos apenas superaron un 3 y se obtuvieron en historia, filosofía y epistemología de la ciencia, relatividad, partículas elementales, dualidad del comportamiento de la luz y la materia. El tema sobre el cual se reconoce mayor formación es estructura de la materia.

Respecto a los alcances de la física cuántica y de la física clásica, la mayoría de los profesores no creen que la física cuántica pueda explicarlo todo, es decir los fenómenos microscópicos propiamente cuánticos y los macroscópicos de la física clásica (E1 y E2), no conocen que las ecuaciones de la FQ tiendan a las de la FC para $h=0$ (ecuaciones de Ehrenfest), pero reconocen que la FQ tampoco se limita siempre a los fenómenos microscópicos (rechazo a E8). Muchos afirman que la física cuántica ha permitido conocer cómo es “realmente” la estructura de la materia (adhesión a E6) pero que aún quedan puntos controvertidos dignos de ser investigados (rechazo a E5). No hay definiciones claras en otros aspectos epistemológicos.

Cuando se pide a los profesores que libremente sugieran fenómenos o experiencias que cuestionen la validez de la FC, si bien unos pocos citan a Planck, la radiación de cuerpo negro o el efecto fotoeléctrico, la mayoría de las respuestas fueron en blanco. Previendo que esto podía pasar, debido a la falta de formación en estos temas, se propuso en la pregunta 7 un ejercicio de asociación semilibre. En este caso, los resultados mostraron que la cuantificación de la radiación se asocia con los fotones, el calor y otras ideas sin relación concreta. La cuantificación de la energía se asocia a términos como paquete, Planck, electrones excitados y niveles energéticos.

Cuando se habla de localizar la radiación no se la asocia mayormente al fotón sino a cuestiones clásicas como el sol o un foco emisor. El concepto de dualidad se restringe en general a la luz y al fotón y la dualidad de la materia se asocia al átomo, materia-energía

(más vinculado a la relatividad) y términos como continuidad-discontinuidad en forma vaga y sin precisión. Los orbitales se asocian con los niveles energéticos en el átomo y la ubicación de los electrones. El determinismo probabilístico o causal no es interpretado dentro del marco conceptual de la FQ sino aludiendo a la etimología de los términos, lo mismo sucede con el término *antipartícula* al que en un caso se lo asocia a la antimateria.

El átomo, el electrón, el protón, el neutrón y los quarks son considerados todas partículas elementales y las antipartículas refieren a la teoría de la relatividad.

Sólo 11 profesores contestaron la sección de la encuesta en la que debían encuadrar afirmaciones, dispositivos tecnológicos y fenómenos físicos en el ámbito de la FC, la FQ u otras ramas de la física (preguntas 8, 9 y 10).

Dentro de la FC son incluidas sin dudar cuestiones referidas a la mecánica, la óptica geométrica, las ondas estacionarias y las fuerzas de campos magnéticos sobre cargas en movimiento. De igual forma no se duda en incluir el efecto fotoeléctrico, la fluorescencia y el efecto Compton dentro de la FQ. Sin embargo, en este último grupo, también se incluyen enunciados vinculados a las ondas (luz, efecto Doppler) y algunos fenómenos de la relatividad.

A la FC se le atribuye la descripción del movimiento de las partículas. En el caso del comportamiento de los electrones en una experiencia de difracción el 50% de los encuestados vincula el hecho a la FQ, pero para el otro 50% el carácter de *partícula* del electrón y el concepto de *choque* prevalece para decidir su inclusión dentro de la FC. En el caso de las ondas en el agua, el hecho que la intensidad de dos ondas no sea la suma directa de las intensidades de las componentes, sugiere para algunos, un comportamiento anómalo, y por lo tanto atribuido la FQ.

No hay definición clara respecto de dónde deben incluirse cuestiones de la relatividad y de la física nuclear. Los viajes a velocidades cercanas a la de la luz, la electrónica y los orbitales atómicos se reconocen como adelantos de ciencia contemporánea sin poder especificar la rama de la física que los fundamenta. Por otro lado, los electrones y sus

orbitales, suelen vincularse a la FC cuando se considera los orbitales como órbitas planetarias y los electrones como partículas puntuales

En cuanto a los aportes tecnológicos propuestos, las cuestiones que resultan cotidianas como el tubo fluorescente, los circuitos integrados, la conducción en semiconductores y los transistores se entienden como propias de la FC y se incluyen en la misma categoría que el electroimán y el sonar. De igual forma, dentro de la FQ se mezclan temas de la disciplina con otros mayormente clásicos como las fibras ópticas y la fotocopiadora.

En el caso de la presentación un listado de temas tomados de los índices de libros de texto tradicionales, en general no hay duda respecto a que es la física clásica quien explica cuestiones de la termodinámica clásica y otras vinculadas a la estructura de la materia, pero la explicación del efecto Doppler es atribuido a la FQ, lo que evidencia falta de conocimiento del tema y confusión de fenómenos ondulatorios con otros efectos cuánticos.

En síntesis, los profesores tienen dificultad en clasificar situaciones dentro del ámbito de la FC o la FQ pero esta dificultad decrece en caso de que se les presenten dispositivos tecnológicos y es casi nula cuando deben clasificar tópicos que leen tal cual aparecen en los libros. Hay una tendencia, además, a asociar a la FC lo cotidiano y cuestiones que refieren al comportamiento de partículas, y a la FQ los temas poco conocidos o desarrollados en la currícula, los que parecieran presentar paradojas o anomalías y ciertos fenómenos ondulatorios. Esto constituirá una de nuestras hipótesis para la construcción de los siguientes instrumentos de esta investigación que describiremos en los capítulos 5 y 6.

4.3.2 Caracterización del pensamiento del profesor respecto a la ciencia y la FQ. (Categorías obtenidas a partir del SSPS)

A partir del análisis de los pesos factoriales mostrados en la tabla del ACP se caracterizaron cuatro categorías que sintetizan el pensamiento de los profesores encuestados:

Sobrevaloración de la FQ, algo inalcanzable en la enseñanza (factor 1)

Los profesores incluidos en esta categoría consideran que a partir de la FQ, la Física ha alcanzado un desarrollo tal en este siglo que ya no quedan puntos controvertidos por investigar (NO5). Se entiende la física cuántica como el máximo hito del desarrollo de la ciencia, para algunos capaz de explicar todos los fenómenos que pueden observarse (E2) y para otros, todo lo que no puede ser observado (E8). A la vez, consideran que se necesitan muchos conocimientos para poder comprenderla (NO2), particularmente conocimientos matemáticos avanzados (NO7) y por lo tanto, la excesiva extensión de los programas (NO3) y el desarrollo evolutivo de los alumnos no lo hace posible (NO8).

Enseñanza de la física descontextualizada y adecuación rígida a la currícula (factor 2)

Este grupo de profesores consideran que la Física Clásica junto con la Física Cuántica dan cuenta de todos los fenómenos naturales (E7 y E4). La física clásica explica todos los fenómenos naturales con alguna aproximación y la Física Cuántica explica los fenómenos que por sus dimensiones no pueden ser observados (E3). Afirman que partir de los descubrimientos de la Física Cuántica se ha podido conocer cómo es realmente la estructura de la materia (E6), pero a los alumnos no les interesa demasiado estos temas (NO9). A su vez, asumen que la enseñanza debe ser guiada y dirigida por el profesor para mantener un mismo ritmo para todos los alumnos. El profesor debe cumplir con el programa y no le compete definir la currícula. Los conflictos sociales y políticos de los momentos históricos del desarrollo de la ciencia competen a otras disciplinas (área de ciencias sociales o área de tecnología, por ejemplo). La enseñanza de las ciencias en cada nivel debe servir como base para el aprendizaje en el nivel siguiente de escolaridad por lo que es necesario disponer de más tiempo para poder cubrir los programas en su totalidad (C4)

La FQ una oportunidad didáctica para entender mejor la ciencia (factor 3)

Los profesores que componen esa categoría consideran que los temas científicos ofrecen una gran oportunidad didáctica para la presentación de las características propias del trabajo científico y del proceso de elaboración de teorías y modelos en Física. Para ellos es importante considerar cómo funciona la ciencia en su desarrollo, tener en cuenta

la naturaleza evolutiva del conocimiento científico y la vinculación entre teoría, modelos y evidencia (B3, C3). La actividad experimental es fundamental en el aprendizaje de las ciencias. Entienden que la enseñanza de la física cuántica contribuye a completar la imagen de la ciencia que tienen los estudiantes y, además, el conocimiento de las teorías y modelos que la Física ha desarrollado en este siglo potencia el desempeño autónomo, crítico y reflexivo del individuo frente a las nuevas tecnologías (esto último compartido con la categoría 4) (B4, B5, B6). Por otro lado, todos los fenómenos que explica la Física Clásica también pueden ser explicados desde la Física Cuántica, y no creen que las nuevas teorías sean tan complicadas (E1). Se rechaza la idea de que las teorías sean demasiado complicadas para decidir su no inclusión en la currícula (rechazo a NO1).

La FQ una oportunidad didáctica para el desarrollo de un desempeño idóneo en un mundo tecnológicamente desarrollado (factor 4)

Los profesores que integran esta categoría entienden que los alumnos se interesan por los principios físicos que rigen las nuevas tecnologías (B2 y rechazo a NO8). Para ellos la educación debe concentrarse en aspectos sociales vinculados a la utilización de la Ciencia y la Tecnología incluyendo cuestiones más amplias que la sola consideración de sus cuerpos teóricos o sus metodologías específicas. Observan que deben analizarse criterios de utilización racional de los conocimientos científicos-tecnológicos y apuntar a apreciar el valor de la investigación y el desarrollo. Al mismo tiempo subrayan que deben considerarse los riesgos implicados en su utilización poniendo énfasis en la preservación de la naturaleza y del medio ambiente. Consideran además que el tiempo dedicado a cada tema debe ser flexible. Destacan que debe atenderse a la educación para la vida, el rol activo del alumno y al desarrollo de su curiosidad natural. Su preocupación no está centrada tanto en la construcción conceptual o la profundización teórica como en la utilidad del conocimiento para la vida. Los conocimientos científicos no son un objetivo en sí mismos sino un medio para comprender características del entorno. En síntesis, para estos profesores, la ciencia es un medio apropiado para entender y controlar el ambiente y para desarrollar las habilidades de los alumnos. (B5, C1, C2)

En cuanto a los contenidos, consideran que no es necesario enseñar los fundamentos clásicos en un orden histórico y que las nuevas teorías no son tan complicadas y pueden ser comprendidas por los alumnos (rechazo NO₄ y NO₁).

4.4 Síntesis del capítulo 4

Los profesores entienden que la enseñanza de la ciencia debe proporcionar una alfabetización científica actualizada y herramientas para desarrollar criterios apropiados para un desempeño crítico y autónomo. No se valora en toda su potencialidad el carácter evolutivo de la ciencia ni la necesidad de entender el alcance y límite de los modelos explicativos del mundo natural. Entienden que los obstáculos para enseñar física cuántica son superables y no son determinantes para decidir la implementación de estos temas en la currícula.

En lo referente a la formación específica, los profesores tienen dificultades en clasificar situaciones concretas dentro del ámbito de la FC o la FQ lo cual muestra falta de claridad para delimitar los alcances de la FC y la FQ y limitada capacidad para extrapolar conocimientos a situaciones cotidianas. Esto no es tan acentuado en el caso del encuadre de dispositivos tecnológicos.

Hay una tendencia a asociar con la FC lo cotidiano y cuestiones que refieren al comportamiento de las partículas, y con la FQ los temas poco conocidos o desarrollados en la currícula, los que parecen presentar paradojas o anomalías y los fenómenos ondulatorios.

Se observa además, una buena predisposición para incorporar temas de física actual en la currícula que contradice en parte nuestras expectativas, ya que esperábamos que los profesores se mostraran reticentes a introducir grandes cambios en sus programas ya sea por falta de formación o de tiempo. Nos preguntamos por qué no lo hacen entonces, es decir, por qué los profesores no incorporan temas de actualidad en sus clases.

Nuestra hipótesis cubre dos aspectos. Por un lado es posible que subestimen la dificultad de la trasposición y que al momento de la implementación se sientan inseguros debido a una formación parcializada que comienza a evidenciarse en las respuestas encontradas, en este sentido, entendemos que las dificultades propias de la física cuántica no se superan simplemente con cursos de formación, requieren discusiones de sus modelos específicos, su rango de validez y sus limitaciones. Por otro lado, un segundo aspecto está vinculado a la falta de diseños apropiados para la trasposición didáctica, que se convierte en un obstáculo real para la implementación de temas de física actual en la currícula media, tal como ellos mismos expresan.

Resumiendo, en esta primera etapa de la investigación, hemos caracterizado el pensamiento del profesor frente a la ciencia y a la enseñanza de la física cuántica, y hemos detectado algunos tópicos preliminares en los que la falta de formación es evidente.

El paso siguiente será ahondar en la detección de los problemas específicos de formación de los profesores, los temas de la FQ más controvertidos y en las dificultades epistemológicas que estos temas particulares presentan para su comprensión.

Capítulo 5

Caracterización específica de las concepciones de los profesores

Instrumentos de Análisis 2, 3, 4 y 5

CAPÍTULO 5: Caracterización específica de las concepciones de los profesores

5.1 Introducción

A partir de los resultados obtenidos en el Cuestionario FQ1 comenzaron a delimitarse las áreas de especial interés. Se decidió restringir la investigación sólo a cuestiones de la física cuántica e indagar aspectos específicos de la formación de los profesores en relación a la evolución de la ciencia, modelos de la radiación y la materia, sus opiniones sobre los cambios curriculares que introducen temas de física cuántica en el nivel medio, las instancias de formación a las que pudieron acceder, cuestiones generales socio-históricas vinculadas al surgimiento de la física cuántica.

Se diseñó con este propósito una nueva serie instrumentos de investigación, que consistió en un cuestionario (Instrumento 2), una serie de textos a partir de los cuales se hicieron preguntas a los profesores (Instrumento 3) y una entrevista escrita a partir de la presentación de un experimento ideal (Instrumento 4). La investigación se completó con entrevistas en las que se profundizaron aspectos particulares de la formación de los profesores referidos tanto a contenidos como a posiciones epistemológicas frente a la física cuántica y que permitieron detectar obstáculos que marcan la necesidad de rupturas epistemológicas indispensables para el desarrollo de representaciones compatibles con los modelos científicos (Instrumento 5).

En este capítulo se describen estos instrumentos, las razones que avalan la elección de cada ítem, y las conclusiones que muestran la convergencia de los resultados obtenidos en las diferentes instancias de análisis.

5.2 Instrumento 2: Cuestionario FQ2

El objetivo de esta encuesta fue indagar aspectos de la formación de los profesores referidos a su nivel de formación en temas específicos de la FQ y a su posicionamiento respecto a la inclusión de ciertos temas específicos en la currícula de nivel Polimodal y las oportunidades de actualización las que accedieron. A través de preguntas abiertas y semiabiertas, se presentaron cuestiones vinculadas al desarrollo histórico de la física cuántica, temas estudiados durante el cursado de su carrera, hipótesis que sustentan la llamada nueva física, fenómenos que pueden explicarse a partir de dichas hipótesis, visiones respecto a tópicos particulares (dualidad onda-partícula, cuantificación, relaciones de incerteza, interpretación probabilística, entre otras), y opiniones generales sobre el acuerdo o no en incluir estos temas en la currícula del nivel Polimodal. Los aspectos indagados pueden agruparse en las siguientes categorías:

- La formación de los profesores
- Los límites entre la física clásica y la física cuántica y la delimitación de modelos
- La formación en temas específicos
- La física cuántica en la vida cotidiana
- Actitudes respecto a la incorporación de temas de física cuántica en la currícula y opciones de formación

El protocolo del **Cuestionario FQ2** se presenta en el cuadro 5.1 y en la sección que sigue, se explicita el *por qué* de cada pregunta.

Cuadro 5.1: Instrumento 2: Cuestionario FQ2

CUESTIONARIO PARA PROFESORES EN EJERCICIO

Estimado Profesor

Este cuestionario es parte de un estudio más amplio que intenta identificar núcleos de dificultad presentes en la comprensión de temas de Física Cuántica. Nuestra intención es facilitarles el camino en la profundización de algunos temas de esta área y en este sentido entendemos que el diagnóstico inicial de la visión del docente alumno es un punto de partida ineludible si se pretenden avances significativos. Su respuesta será un aporte invaluable en esta investigación. Desde ya agradecemos su colaboración y el dedicar parte de su tiempo a concretar este propósito. Quedamos a su disposición para cualquier consulta que quisiera hacer sobre los resultados de la presente encuesta. Un saludo cordial

Nombre y apellido.....

Nivel en el que se desempeña.....

Asignaturas de Física que dicta.....

Antigüedad en la docencia.....

- 1) ¿Qué temas de Física Cuántica recuerda haber desarrollado en su formación en el profesorado?
- 2) Escriba tres fenómenos que no pueden explicarse a partir de las hipótesis de la Física Clásica y que dieron origen a las primeras fundamentaciones de la Física Cuántica.
- 3) Nombre tres hipótesis de la Física Cuántica que contradigan supuestos de la Física Clásica.
- 4) ¿Qué entiende por:
 - a) dualidad onda partícula
 - b) cuantificación
 - c) principio de incertidumbre
 - d) orbitales
 - e) causalidad física
 - f) interpretación probabilística
 - g) partículas elementales
- 5) ¿Con qué conceptos físicos asocia los siguientes nombres?
 - a) Heisenberg
 - b) De Broglie
 - c) Maxwell

d) Planck	.....
e) Einstein	.....
f) Schrödinger	.....
g) Bohr	.....
h) Faraday	.....
i) Born	.....
j) Young	.....
k) Bohm	.....
l) Thomson	.....
m) Rutherford	.....
n) Pauli	.....
6) Nombre cinco productos tecnológicos que apliquen fundamentos de Física Cuántica y que se hayan incorporado al uso cotidiano o que satisfagan alguna necesidad de la sociedad actual.	
7) ¿Conoce qué temas de Física Cuántica han sido incorporados en la nueva currícula?	
8) Si es así, ¿está de acuerdo?	
9) ¿Incluiría algún otro? ¿cuál?	
¿Ha intentado mejorar su formación en estos temas? ¿Cómo? , ¿Ha realizado algún curso?	
Si es así, ¿en qué consistió ese curso? ¿cumplió sus expectativas? Explique	

5.2.1 El por qué de cada pregunta

La formación de los profesores (pregunta 1)

1- *¿Qué temas de Física Cuántica recuerda haber desarrollado en su formación en el profesorado?*

Con esta pregunta se pretende indagar el perfil de formación de los profesores en relación a la mecánica cuántica. Nuestra hipótesis es que si bien los profesores han estudiado estos temas durante el cursado de su carrera de profesorado, y por lo tanto no les resultan desconocidos, sus recuerdos son vagos, desarticulados y no se estructuran en un cuerpo coherente de conocimientos. Se busca además, identificar las cuestiones que los profesores consideran pilares de la física cuántica y establecer un nivel de formación en temas específicos a partir del cual proponer una alternativa didáctica. Por otro lado, tenemos en cuenta que es necesario que los encuestados dispongan de un cierto tiempo

para familiarizarse con el tema sobre el que se indaga y que las respuestas espontáneas iniciales no siempre reflejan la real formación de los profesores. Por tal motivo, las cuestiones sobre temas específicos se posponen para preguntas posteriores.

Los límites entre la física clásica y la física cuántica y la delimitación de modelos (preguntas 2 y 3)

2- *Describa tres fenómenos que no pueden explicarse a partir de las hipótesis de la Física Clásica y que dieron origen a las primeras fundamentaciones de la Física Cuántica.*

3- *Nombre tres hipótesis de la Física Cuántica que contradigan supuestos de la Física Clásica.*

Con estas dos preguntas, se pretende investigar el conocimiento de los profesores en relación a la ruptura epistemológica entre los modelos que sustentan la FC y la FQ. No se espera que conozcan en detalle las discusiones aportadas por la filosofía y la epistemología de las ciencias, sino que, al menos, aparezcan evidencias respecto a si distinguen los dominios explicativos de cada área y en tal caso, cuáles son las hipótesis que diferencian la física clásica de la física cuántica y qué fenómenos pueden ser explicados desde cada una de ellas.

La formación en temas específicos (preguntas 4 y 5)

4- *¿Qué entiende por:.....?*

5- *¿Con qué conceptos físicos asocia los siguientes nombres?*

Como dijimos antes, debemos tener en cuenta que al responder una encuesta sobre temas que no son trabajados regularmente en el aula, puede ser que los profesores no recuerden en forma inmediata algunas cuestiones, o bien sólo recuerden algunos tópicos de menor importancia. Por esta razón, en la pregunta 4, se propone a los profesores temas propios de la física cuántica, y se les pide que intenten describir sus concepciones sobre ellos. En la pregunta 5, se proponen nombres de científicos de renombre con el propósito de sondear aspectos del desarrollo histórico de la física cuántica y determinar si se superan las presentaciones precuánticas de comienzos de siglo XX.

La física cuántica en la vida cotidiana (pregunta 6)

6- Nombre cinco productos tecnológicos que apliquen fundamentos de Física Cuántica y que se hayan incorporado al uso cotidiano o que satisfagan una alguna necesidad de la sociedad actual.

Este aspecto, también referido a la formación de los profesores, busca establecer si se reconoce la importancia de la física del siglo XX en la mejora de la calidad de vida en nuestros días y se identifican algunos principios básicos propios de la física cuántica en la descripción del funcionamiento de algunos dispositivos tecnológicos. No se pide a los profesores que describan el funcionamiento de los aparatos, sino que, simplemente, reconozcan aquéllos cuyo desarrollo ha sido posible aplicando principios de la física cuántica. Intentamos comprobar la hipótesis surgida a partir del análisis del instrumento anterior, donde los profesores parecen asociar las cuestiones de física cuántica con la tecnología de punta, incluyendo a veces cuestiones basadas en fenómenos ondulatorios o del electromagnetismo.

Actitudes respecto a la incorporación de temas de física cuántica en la currícula y opciones de formación (preguntas 7, 8, 9 y 10)

7- ¿Conoce qué temas de Física Cuántica han sido incorporados en la nueva currícula?

8- Si es así, ¿está de acuerdo?

9- ¿Incluiría algún otro? ¿cuál?

En estas preguntas se pretende, no sólo indagar si los profesores conocen las innovaciones introducidas por la reforma curricular, sino también, y es aún más importante, brindar un espacio en el que expresen su opinión al respecto. El relevamiento de las actitudes de los docentes frente a la incorporación de temas de física cuántica en la currícula del nivel medio, puede sugerir hipótesis interesantes al correlacionarlas con la formación de los profesores. Si bien la aplicación de este instrumento es anterior a la promulgación de la actual ley nacional de educación, sabemos que la situación no ha cambiado radicalmente ya que aún está pendiente la incorporación de temas de FQ en el nivel medio y tampoco han habido cambios radicales en la currícula, más bien en la mayor parte de las instituciones, hasta el momento, sólo se han introducido unas pocas modificaciones y se han adecuado los años de cursado a la nueva secuencia.

10- ¿Ha intentado mejorar su formación en estos temas? ¿Cómo?, ¿Ha realizado algún curso? Si es así, ¿en qué consistió ese curso? ¿cumplió sus expectativas? Explique

En este caso, pretendemos caracterizar la formación posterior al cursado de la carrera. El sistema educativo ofrece múltiples instancias de perfeccionamiento docente. Intentamos saber si los temas de física cuántica son parte de las opciones que eligen los profesores al momento de decidir mejorar su formación. En caso de ser así, interesa conocer precisiones sobre la modalidad de formación elegida: la metodología empleada, los temas desarrollados, el grado de recordación y la opinión de los docentes sobre los resultados del mismo. Interesa conocer, también, en qué medida la instancia de formación a la que se accedió, colmó las expectativas y cuáles han sido los logros y las objeciones

5.3 Instrumento 3: Textos

Simultáneamente a la aplicación del Cuestionario FQ2 se recabó información a través de un tercer instrumento basado en la presentación de textos vinculados a la Física Cuántica tomados de la bibliografía de uso corriente, principalmente libros de Física de nivel universitario básico. El objetivo fue investigar, desde otra perspectiva, los siguientes aspectos del conocimiento referido a la Mecánica Cuántica (MQ):

1. Generalidades del desarrollo de la MQ
2. Límite y diferenciación de modelos
3. Conocimiento específico Modelos para la radiación
4. Conocimiento específico: dualidad y comportamiento ondulatorio de la materia
5. Otros conocimientos específicos

Para cada aspecto a investigar se seleccionaron varios textos de libros de Física del nivel universitario básico y se agregaron otros de elaboración personal para completar el espectro de temas de interés. Estos textos se agruparon en cuatro series de 5 textos cada una, de manera que en cada serie se indagaran los aspectos mencionados a través de diferentes presentaciones. En algunos casos el texto funcionaba como disparador

para introducir la pregunta, en otros, el texto presentaba alguna cuestión nueva o poco conocida para los docentes, vinculada a los modelos, observaciones y/o conceptos de la física cuántica. Al pie de cada texto se presentaba una pregunta referida al mismo. En el cuadro 5.2 se transcriben los textos agrupados en las cuatro series. Se indican, además, las citas bibliográficas y la temática indagada en cada uno, esta información no estaba disponible en la versión para los profesores. En el escrito que se les entregó a los profesores, se incluyó una introducción explicando el objetivo del estudio y agradeciéndoles su colaboración, tal como se hizo con los instrumentos anteriores. No es el objetivo de este instrumento determinar si los profesores responden correctamente, sino conocer su pensamiento, sea cual fuere, en relación a los aspectos mencionados antes.

Cuadro 5.2: Instrumento 3: Textos

Serie 1
<p>TEXTO 1 (Tipler, p.143: límite y diferenciación de modelos, modelo de estructura de la materia para explicar los espectros atómicos)</p> <p>El estudio de la radiación característica emitida por los átomos de un gas excitado por una descarga eléctrica, o por los átomos de una llama, se verificó con gran interés durante todo el siglo pasado. Al observarla con el espectroscopio, esta radiación aparece como una serie discreta de rayas, cada una de ellas con un color o longitud de onda particular; las posiciones e intensidades de las rayas son características del elemento. (La luz aparece en forma de líneas o rayas debido a que la abertura de la fuente es una rendija.) Las longitudes de onda de estas rayas pudieron medirse con gran precisión y se realizó un gran esfuerzo para hallar algunas regularidades en estos espectros. Uno de los mayores avances lo consiguió un maestro de escuela suizo, Johann Balmer.</p> <p>¿Qué modelo de estructura de la materia propondría para explicarlo?</p> <p>TEXTO 2 (versión personal: límite y diferenciación de modelos, en particular para el modelo de Thomson)</p> <p>El modelo de J.J.Thomson consideraba diversas disposiciones de electrones embebidos en un cierto tipo de fluido que contenía la mayor parte de la masa del átomo y con una carga positiva suficiente para hacer que el átomo fuera eléctricamente neutro</p> <p>¿Por qué fue desechado este modelo? ¿Qué observaciones macroscópicas no lograba explicar? ¿Puede ser considerado como uno de los primeros modelos cuánticos de la estructura de la materia? ¿Por qué?</p> <p>TEXTO 5 (versión propia de Tipler, p.120 y Krane: conocimiento específico modelos para la radiación, diferenciación de los modelos clásicos y cuánticos de la radiación)</p> <p>En el efecto fotoeléctrico se ilumina una superficie metálica con luz de suficiente energía como para arrancar electrones de la misma. Clásicamente, se esperaba que la energía incidente se distribuyera uniformemente sobre la superficie iluminada y al cabo de cierto tiempo (que podía calcularse con facilidad), una región de aproximadamente el tamaño de un átomo, podría adquirir la energía suficiente como para</p>

emitir un electrón. Sólo era cuestión de esperar el tiempo suficiente y el electrón aparecería. Por otro lado, la intensidad de la radiación incidente podía ajustarse experimentalmente de modo que el tiempo de espera calculado fuera de varios minutos o incluso de horas. Pero nunca se observó ningún retraso, los electrones salían expulsados inmediatamente, en forma instantánea o no eran arrancados nunca. ¿Podría describir un modelo de estructura de la materia o de su comportamiento que explique esta anomalía?

TEXTO 7 (Tipler, p.158: generalidades del desarrollo de la MQ, correspondencia entre la mecánica clásica y la cuántica)

El principio de correspondencia establece que cualesquiera que sean las modificaciones que haya que hacer de la mecánica clásica para describir la materia a nivel submicroscópico, cuando los resultados se amplían al mundo macroscópico deben concordar con aquellas leyes de la física clásica, bien comprobadas experimentalmente en el mundo ordinario.

¿Cómo interpreta este párrafo? ¿Podría dar algún ejemplo? ¿Son observables algunos resultados de la física cuántica desde el punto de vista macroscópico? Si su respuesta es NO justifique por qué. Si su respuesta fue SI dé algún ejemplo.

TEXTO 8 (Tipler, p.173: generalidades del desarrollo de la MQ, conocimiento sobre el desarrollo)

En la década de los 20 los científicos lucharon contra estas dificultades y fue formulada una teoría sistemática por de Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Pauli, Dirac y otros, que ahora se conoce como mecánica cuántica o mecánica ondulatoria.

¿Cuáles fueron los aportes de de Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Pauli y Dirac?

Serie 2

TEXTO 3 (Tipler, p.146: límite y diferenciación de modelos, en particular para el modelo de Rutherford)

En la experiencia realizada por Rutherford un haz estrecho de partículas α incidía sobre una pantalla de sulfuro de zinc, emitiendo unos destellos luminosos en la interacción. Luego se observaba la distribución de los destellos en una pantalla al colocar diversas hojas de metal muy delgadas entre ella y la fuente. La mayor parte de las partículas no se desviaron, o lo hicieron con ángulos muy pequeños del orden de 1° . Sin embargo, y de modo totalmente insospechado, algunas se desviaron ángulos del orden de 90° o más. Si el átomo se compusiera de una esfera cargada positivamente de radio 10-10 m conteniendo electrones del modo previsto en el átomo de Thomson, sólo podría resultar una desviación muy pequeña de un choque entre una partícula y un átomo, incluso cuando la partícula penetrase en él.

¿Por qué cree que el átomo de Thomson no podía explicar lo observado en esta experiencia? ¿Qué hipótesis podría hacer para construir un modelo de átomo que pudiera explicar sus observaciones? ¿Qué limitaciones tuvo este modelo, es decir qué no podía explicar todavía?

TEXTO 4 (Tipler, p.127: conocimiento específico modelos para la radiación, diferenciación de los modelos clásicos y cuánticos de la radiación)

Resulta curioso que después de tantos años de debate acerca de la naturaleza de la luz debemos aceptar ahora tanto una teoría corpuscular para describir con detalle el intercambio de energía entre la radiación

electromagnética y la materia como una teoría ondulatoria para describir la interferencia y la difracción de la radiación electromagnética.

¿Podría dar ejemplos?

TEXTO 6 (Brandesen, p.27: límite y diferenciación de modelos, en particular para el modelo de Rutherford y de Bohr)

En el modelo de Rutherford los electrones se mueven en órbitas en el campo eléctrico de Coulomb generado por el núcleo, tal como lo hacen los planetas alrededor del Sol. Una partícula que describe un movimiento de giro es continuamente acelerada (aceleración centrípeta) y una partícula cargada al estar acelerada radia ondas electromagnéticas y pierde energía. Las leyes de la Física Clásica (las leyes de movimiento de Newton y las del electromagnetismo de Maxwell), aplicadas al átomo de Rutherford, predicen que debido a esta pérdida de energía los electrones deberían colapsar sobre del núcleo en poco tiempo (al perder energía su radio de giro disminuiría continuamente). Ciertamente esto no sucede.

¿Cómo resolvió Bohr este problema? ¿Recuerda qué hipótesis hizo?

Se venía observando ya desde tiempo atrás, que los átomos eran capaces de emitir radiación en ciertas longitudes de onda que los caracteriza, ¿respondía el modelo de Rutherford este aspecto? ¿y el de Bohr?

TEXTO 11 (versión personal: otros conocimientos específicos, interpretación de la función de onda)

A partir de la mecánica ondulatoria todo fenómeno puede describirse mediante una función de onda que es la solución de una ecuación de onda denominada ecuación de Schrödinger

¿Podrías dar una interpretación de la función de ondas?

TEXTO 17 (versión personal: otros conocimientos específicos, interpretación del concepto de orbital)

¿Qué entiende por orbital?

¿Podría relacionarlo con alguna magnitud característica de la mecánica cuántica (órbitas, número cuántico n , número cuántico l (momento angular), espín del electrón, ecuación de Schrödinger, función de onda, densidad de probabilidad, etc.)

Serie 3

TEXTO 8b (Tipler, p.173 : límite y diferenciación de modelos, en particular para el modelo de Bohr)

Mediante diversas hipótesis cuánticas pueden explicarse muchos fenómenos como la radiación del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico, la dispersión de Compton, los calores específicos, los espectros ópticos del hidrógeno y espectros de rayos X de muchos elementos. Los éxitos de la teoría de Bohr fueron sustanciales y espectaculares. Se predijo la existencia de rayas espectrales, desconocidas entonces y que recién se observaron tiempo después y pudieron calcularse las longitudes de onda de los espectros característicos de rayos X y el radio de la primera órbita del átomo de hidrógeno.

Por otro lado, los fallos de la teoría de Bohr y de la "mecánica cuántica primitiva" fueron principalmente de omisión.

¿Podría describir algunas de las limitaciones del modelo de Bohr, es decir, conoce alguna cuestión que no podía ser explicada a partir de las hipótesis hechas en este modelo?

TEXTO 9 (Tipler: conocimiento específico: dualidad y comportamiento ondulatorio de la materia, difracción de partículas)

Elsasser señaló en 1925 que una experiencia de difracción establecería la existencia física de las ondas de electrones.

¿Cómo interpreta usted esta frase? ¿Conoce algún desarrollo posterior que haya confirmado esta teoría o la haya refutado?

TEXTO 10 (Tipler, p.207: conocimiento específico: dualidad y comportamiento ondulatorio de la materia)

Hasta el siglo XX, se pensó que la luz era una onda clásica y que el electrón era una partícula clásica. Ahora vemos que los conceptos de ondas y partículas clásicas no describen adecuadamente ninguno de estos fenómenos. Cada uno de ellos se comporta como una onda clásica cuando se considera la propagación y como una partícula clásica cuando se considera su intercambio de energía.

¿Puede dar ejemplos de lo anterior?

TEXTO 12 (Krane, p.87: conocimiento específico modelos para la radiación conocimiento, específico sobre generación de fotones)

Cuando una carga eléctrica tal como un electrón es acelerada o desacelerada, radía energía. ¿Podría decirse en este caso que se emiten fotones?

Si su respuesta es NO, en qué casos considera que se emiten fotones?

TEXTO 14 (versión personal: otros conocimientos específicos, relaciones de Heisenberg, indeterminación en las mediciones simultáneas de posición y momento)

El principio de indeterminación de Heisenberg afirma que "...no es posible determinar simultáneamente la posición y el momento de una partícula con una precisión superior a cierto límite relacionado con la constante de Planck: $\Delta x \cdot \Delta p \approx h/2\pi...$ "

¿Qué quiso decir Heisenberg con esta afirmación?

¿Sigue siendo válido este postulado actualmente, cuando la tecnología ha permitido diseñar instrumentos mucho más precisos que los que disponía Heisenberg?

Serie 4

TEXTO 13 (versión personal: conocimiento específico modelos para la radiación, conocimiento específico sobre comportamiento de fotones, comportamiento corpuscular del fotón)

Un fotón podría definirse como un cuanto de energía que viaja a la velocidad de la luz y cuya masa en reposo es nula.

¿Cree que sería posible que un fotón pudiera colisionar con una partícula de masa m (un electrón por ejemplo), y comunicarle cierta cantidad de movimiento?, Si su respuesta es SI, ¿conoce alguna experiencia en que suceda esto?, ¿Podría un fotón ser atraído por un campo gravitatorio?

TEXTO 15 (versión personal: otros conocimientos específicos, carácter causal/probabilístico de la mecánica cuántica)

La mecánica cuántica afirma que no puede predecirse completamente el comportamiento de una partícula

aislada tal como un electrón, sino que sólo puede conocerse la probabilidad de que ésta se comporte de determinada manera. Considera usted que esto es debido a que:

- ✓ el formalismo matemático utilizado es limitado
- ✓ aún no se conocen bien todas las variables que deben tenerse en cuenta en el estudio de ese nivel de estructura de la materia
- ✓ la teoría cuántica sólo aporta resultados estadísticos
- ✓ experimentalmente aún no puede observarse lo que sucede realmente
- ✓ así es la naturaleza del comportamiento de la materia y nunca se podrá profundizarse este aspecto del conocimiento.

TEXTO 15'b (versión personal: conocimiento específico: dualidad y comportamiento ondulatorio de la materia)

de Broglie habla de una onda asociada a las partículas y Schrödinger propone una ecuación para dicha onda. Si consideramos que toda onda se caracteriza por una amplitud y un cierto rango de números de onda entre otras magnitudes, ¿cómo relacionaría estas características de las ondas con las de una partícula como por ejemplo un electrón?

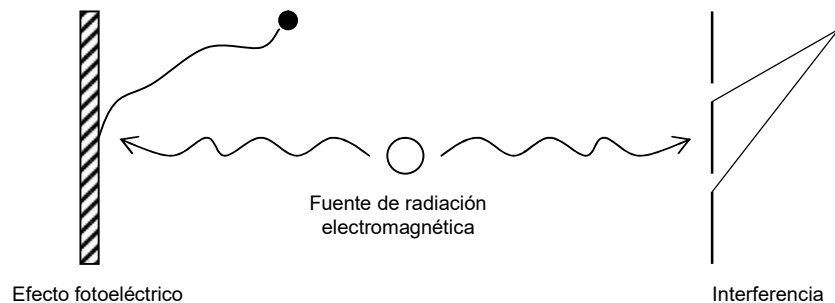
TEXTO 16 (versión personal: otros conocimientos específicos, interpretación de números cuánticos)

¿Podría nombrar algunos de los números cuánticos que caracterizan los estados de un electrón en un átomo de hidrógeno? ¿Podría decir qué información aportan?

TEXTO 18 (versión personal de Krane, p.91: conocimiento específico modelos para la radiación, conocimiento específico sobre modelo dual para la radiación)

En el experimento que se plantea en la figura, una fuente de luz de alta frecuencia emite radiación tal como se indica. La radiación emitida hacia la derecha se utiliza para observar un fenómeno de interferencia (experiencia de Young de dos rendijas), mientras que radiación emitida hacia la izquierda se aprovecha para arrancar electrones de una placa metálica por efecto fotoeléctrico.

Discuta el comportamiento de la luz en cada caso analizando si se comporta como una onda o como una partícula. ¿De qué circunstancias cree que depende que la luz se comporte como onda o como partícula?



5.4 Instrumento 4: Un experimento ideal (entrevista escrita)

El instrumento 4 se muestra en el cuadro 5.3 y enfrenta a los profesores a una experiencia de doble rendija. Los electrones emitidos por una fuente impactan sobre una pantalla luego de pasar a través de un sistema de dos aberturas. Se presentan casos de pequeñas y grandes aberturas y se pide a los profesores que expliquen las gráficas que representan las curvas de frecuencia que dan cuenta de los electrones que impactan sobre la pantalla en cada caso. Luego se pide a los profesores que repitan el análisis para el caso en que se reemplaza la fuente de electrones por una fuente de luz (radiación). Esta cuestión, diseñada en base al experimento ideal propuesto por Feynman (1987), pretende indagar si los profesores diferencian el comportamiento de una partícula del de una onda, si son conscientes de las condiciones necesarias para decidir el modelo más apropiado para explicar las diferentes situaciones experimentales propuestas, si entienden que los resultados observados no son absolutos sino consecuencia de la preparación del experimento, si creen que es posible que las partículas puedan presentar el mismo comportamiento que las ondas y qué condiciones deberían darse para que esto sea evidente.

Tampoco en este caso las respuestas fueron clasificadas según un criterio “correctas/incorrectas” según su acuerdo con la teoría. Por el contrario, se consideraron como aportes de una entrevista escrita en la que los profesores expresaron opiniones y criterios que pusieron de manifiesto aspectos poco comprendidos, necesarios de profundizar en una intervención didáctica.

Cuadro 5.3: Instrumento 4: “Un experimento ideal”

Estimado Profesor

Esta encuesta es parte de un estudio más amplio que intenta identificar núcleos de dificultad presentes en la comprensión de temas de Física Cuántica. Su respuesta será un aporte invaluable en esta investigación. Desde ya agradezco su colaboración y el dedicar parte de su valioso tiempo a concretar este propósito. Un saludo cordial

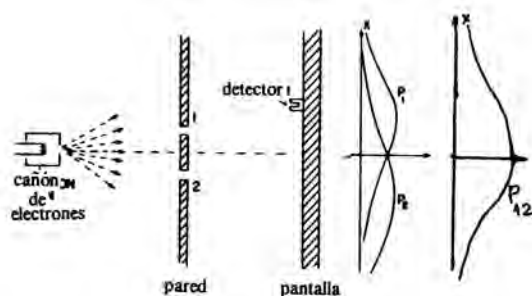
Lic. Patricia E. Fernández

Un experimento ideal para pensar y discutir

En física suelen discutirse experimentos “ideales” cuando las condiciones necesarias para implementarlos en un laboratorio son muy difíciles de conseguir. Según Feynman “...un experimento ideal o “imaginado” es aquél en que todas las condiciones iniciales y finales están completamente especificadas...”

En este caso vamos a abordar un ejemplo muy tratado en los textos por su significación en la interpretación de algunas cuestiones de la física actual. Consideremos la siguiente situación:

Una fuente de electrones se coloca frente a una pared en la que se han practicado dos aberturas como se muestra en la figura. Si se tapa el orificio superior se observa que la cantidad de electrones impactan sobre una pared colocada directamente atrás del obstáculo puede representarse por la curva P_1 . Si en cambio se tapa el orificio inferior, la curva que representa la acumulación de electrones es la representada por P_2 . Y si finalmente se repite el experimento manteniendo ambos orificios destapados, se observa la curva P_{12} .



¿Podría explicar brevemente la curva P_{12} ?

Suponga ahora que pudiera disminuir tanto como quisiera el diámetro de los agujeros. ¿Cambiarían las curvas P_1 , P_2 y P_{12} ? SI / NO

Si su respuesta es SI, describa cómo cambiarían e intente dar una justificación.

Haga un dibujo representando las nuevas curvas.

¿Qué curvas se obtendrían en el caso de que la fuente de electrones se reemplazara por una de luz monocromática? Aclare si considera que el resultado depende del tamaño de los orificios y en caso de que su respuesta sea afirmativa, grafique para el caso de orificios grandes y pequeños.

5.5 Instrumento 5: Las entrevistas

En el caso de las entrevistas se diseñó un protocolo común a fin de que los aspectos de interés quedaran reflejados en todos los registros (cuadro 5.4). Dicho protocolo permitió caracterizar el tipo y alcance de formación del profesor, sus conocimientos específicos en temas particulares (dualidad, modelos de la radiación y la materia, modelo para el electrón, orbitales, números cuánticos, relaciones de incertezas, causalidad vs interpretación probabilística, etc.), su posicionamiento epistemológico frente a cuestiones propias de la física cuántica (la FQ como ciencia cerrada donde no hay más por investigar o en continua evolución, problema de la medición en FQ, determinismo vs causalidad, etc.), opiniones sobre la factibilidad de incluir estos temas en la currícula y dificultades para la implementación, el planteo didáctico de sus clases, etc.

Las preguntas 1 y 2 son introductorias e indagan aspectos generales de la formación desde la perspectiva del profesor: si conoce pormenores históricos del desarrollo de la FQ, si incluye en su relato experimentos controvertidos, si considera sólo la etapa pre-cuántica o también el desarrollo posterior de la FQ.

Los ítems 3 y 4 consistieron en un trabajo de asociación de ideas en el cual se utilizaron 22 tarjetas que identificaban nombres de físicos clásicos y cuánticos (ítem3) y 32 tarjetas que hacían referencia a conceptos, experiencias, expresiones del formalismo, observaciones experimentales, etc. (ítem3). Los profesores entrevistados debían identificar en el primer lote quiénes habían realizado contribuciones importantes a la física cuántica y cuáles eran esas contribuciones. Luego, los profesores asociaban las tarjetas del segundo lote a los científicos nombrados en el primero. El objetivo de este segundo lote es aportar sugerencias en caso en que el profesor no recuerde los aportes de los científicos propuestos y barrer aspectos que no siempre surgen naturalmente, tales como interpretaciones del formalismo, la función de onda, la condición de normalización. Se presentaron también figuras de difracción de luz por dos rendijas y de difracción de electrones, espectros atómicos (rayas espectrales) y se pidió a los profesores una descripción de lo observado. Este trabajo, además, fue un disparador importante para la discusión de muchos de los temas investigados.

Las preguntas 5 y 6 relevan conocimientos respecto de las limitaciones de la FC, diferencias epistemológicas entre la FC y la FQ, si consideran la FQ como totalmente desarrollada o aún hay aspectos por resolver en discusión.

La pregunta 8 indaga el nivel con que desarrollaron el formalismo, opiniones sobre su potencialidad como herramienta para describir la MQ y el grado de recordación.

Las preguntas 9 y 10 recaban la opinión de los profesores sobre la factibilidad de incluir temas de FQ en la currícula de nivel medio, las razones que dificultan el desarrollo de temas de FQ en este nivel, suficiencia de la propia formación y alternativas de capacitación a las que han tenido acceso.

Cuadro 5.4: Instrumento 5: Protocolo de entrevista (material para el encuestador)

Nombre y apellido:.....

Colegio/escuela:.....

Área en que se desempeña: Física, Biología, Química, Otra (especifique):

Título.....

Nivel en que se desempeña:

Antigüedad en la docencia:.....

1. Me gustaría conocer algunas cuestiones referidas a tu formación en un tema particular de la física: Física Cuántica. ¿Recordás haber desarrollado algún tema referido a la FQ en tu carrera? ¿Qué recordás respecto de la metodología con que te los presentaron? ¿Recordás algún tema en particular que te haya resultado muy interesante o que por alguna razón haya quedado grabado en tu memoria y por qué?
2. ¿Recordás algunos detalles de la historia de cómo surgieron los primeros avances en FQ, en que años aproximadamente.¿Y algunos nombres de físicos relevantes y sus aportes?
3. Cada una de estas tarjetas lleva escrito el nombre de un físico muy famoso, intenta agruparlas u ordenarlas según distintos períodos en la física, ¿podría separar las que corresponden a aquellos que han hecho algún aporte en FQ?

J.C. MAXWELL	L. DE BROGLIE	SCHRÖDINGER	LORENTZ	HUYGHENS	LYMAN
MAX PLANCK	MILLIKAN	J. THOMSON	PAULI	A. EINSTEIN	BALMER
NIELS BOHR	JOHN DALTON	HEINSEBERG	SOMMERFELD	MENDELEIEV	
RUTHERFORD	TOMAS YOUNG	HERTZ	POYNTING	FARADAY	

4. En estas otras tarjetas hay algunas cuestiones, conceptos, temas en general, que la física ha resuelto en este siglo, intenta relacionar algunas de ellas con las anteriores?

Función de Ondas

Ondas electromagnéticas

$$\text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

Dos átomos no pueden tener los mismos números cuánticos

Modelo de estructura de la materia

Dispersión de partículas alfa

Ordenamiento periódico de elementos químicos

Movimiento de cargas en campos electromagnéticos

Principio de exclusión

Catástrofe ultravioleta

Radiación de cuerpo negro

$p = h/\lambda$

Orbitales

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h$$

Interferencia de luz

Modelos atómicos

Ecuaciones del campo electromagnético

Comportamiento Ondulatorio de la luz

Niveles de energía

Modelo de estructura de los gases

Difracción de la luz

$$E = h \cdot \nu$$

Cuantización de la energía

Efecto fotoeléctrico

Ondas y partículas son aspectos complementarios de los objetos atómicos

Intensidad de energía de las ondas electromagnéticas

$$\int |\Psi|^2 dx = 1$$

Dualidad onda-partícula

No es posible disminuir hasta anular el error en la posición y en la cantidad de movimiento de una partícula cuántica

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + U\Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

En la mecánica cuántica se han definido todas las variables necesarias. El ppio. de incertidumbre es propio de la naturaleza y no expresa un margen de error

Los átomos se comportan como osciladores armónicos y cada uno oscila con una frecuencia ν y pueden emitir o absorber energía en cantidades proporcionales a $h\nu$

5. Nombra tres cuestiones propias de la FQ que no puedan ser explicadas desde la FC. ¿Qué nuevas hipótesis se introdujeron para poder explicar estas cuestiones?
¿Te acordás en qué consistía el problema de la localización en MQ?, ¿y el tema de la incertidumbre?
6. ¿Sabes si en la actualidad existe alguna polémica en la MQ? ¿Si existen aspectos aún en discusión? ¿Podrías nombrar alguno?
7. ¿Te acordás cómo se introducía el formalismo en las clases de FQ? ¿te resultó demasiado complicado? ¿te ayudó a entender la MQ? ¿Te acordás de alguna información en particular que pudiera deducirse a partir del uso del formalismo? ¿para qué se usaba?
¿Tiene presente algún aspecto básico del formalismo? ¿Cómo se relacionaba con alguna evidencia macroscópica?
¿Recordás algunos de los números cuánticos? ¿ qué información aportaba, o cómo se interpretaba ese número cuántico?
8. ¿Consideras que las siguientes razones dificultan el desarrollo de temas de FQ en el nivel medio?. ¿Podrías indicar el grado en que influirían en una escala de 1 a 5 (1 la más importante, 5 la menos)
1. Las nuevas teorías son muy complicadas
 2. Se necesitan muchos conocimientos para poder comprenderlas
 3. Los programas son muy extensos
 4. No pueden presentarse temas de física de este siglo si antes no se desarrollan ampliamente los contenidos de física clásica.
 5. Los profesores no tienen una formación adecuada
 6. Los profesores no disponen de recursos didácticos para adaptar los nuevos conocimientos al nivel de comprensión de los alumnos
 7. Se requieren conocimientos matemáticos avanzados
 8. El desarrollo evolutivo de los alumnos no lo hace posible
 9. A los alumnos no les interesan estos temas
 10. Es prácticamente imposible implementar prácticas de laboratorio de estos temas
- Otras razones? (especifique)
9. ¿Conocés los temas de la física actual que se han incluido en la nueva currícula? ¿Está de acuerdo? (indagar en una entrevista por qué) ¿Incluiría algún otro?
¿Considera suficiente tu formación como para implementar el dictado de estos temas en el nivel medio?
¿Has intentado mejorar tu formación en estos temas? ¿Cómo? ¿Realizaste algún curso? ¿En qué consistió dicho curso? ¿Cómo fue la evaluación? ¿Saliste satisfecha con lo aprendido en ese curso? ¿Qué críticas le harías? (respecto de la duración, nivel, inclusión de cuestiones didácticas, etc.)
¿Consideras que la instalación de la FQ en la escuela requiere de estrategias didácticas particulares? Si es así, ¿cuáles?
¿Crees necesario implementar trabajos prácticos (TP) de FQ? ¿lo consideras posible? ¿se te ocurre alguna forma de reemplazar posibles TP por alguna otra herramienta didáctica?

5.6 Cierre del capítulo

En este capítulo hemos presentado los instrumentos 2, 3 4 y 5, diseñados para la caracterización específica del pensamiento del profesor. En el capítulo siguiente se muestran los resultados obtenidos en la aplicación de estos 4 instrumentos, el análisis de los mismos y una discusión final que sintetiza nuestras conclusiones hasta este momento y sentará las bases del diseño de la propuesta didáctica.

Capítulo 6

Caracterización específica:

Resultados, conclusiones

y

aportes para el diseño de una propuesta didáctica.

CAPÍTULO 6: Resultados de la caracterización específica

6.1 Introducción

En este capítulo se muestran los resultados de la caracterización específica, un análisis de los mismos y una discusión que sintetiza nuestras conclusiones hasta el momento y que sentará las bases del diseño de la propuesta didáctica.

Los instrumentos aplicados en esta etapa fueron descritos en el capítulo anterior y son los siguientes:

Instrumento 2: Encuesta FQ2

Instrumento 3: Preguntas sobre serie de Textos

Instrumento 4: Entrevista escrita: Un experimento ideal

Instrumento 5: Entrevista larga (oral)

6.2 Resultados de la caracterización específica

6.2.1 La encuesta FQ2

Se encuestaron 38 docentes, todos profesores de Física en actividad en el nivel medio con una formación inicial similar en las carreras de profesorado. Se realizó un exhaustivo análisis cualitativo y se agruparon las respuestas en bloques de temas, una vez completado este trabajo se contabilizaron las coincidencias. A continuación se presenta para cada pregunta, una tabla con las respuestas más significativas y su valor de repetición y luego se comentan los resultados hallados indicando entre paréntesis la cantidad de casos en que aparece la misma respuesta. El detalle de las respuestas se incluye en el ANEXO 1a y ANEXO 1b.

Temas que recuerdan haber visto en el profesorado (pregunta 1):

Temas que recuerdan haber visto en el profesorado (pregunta 1):	Casos
Planck y cuerpo negro (Planck, paquetes de energía, cuerpo negro, desastre ultravioleta)	21
Efecto fotoeléctrico	13
Ppio. de incertidumbre	12
Schrödinger	11
Dualidad (sólo aparece referida a la luz)	6
No recuerdan temas de MQ desarrollados en el profesorado	9

Los temas mencionados con mayor frecuencia son los referidos a “Planck y cuerpo negro” (21) (Planck, paquetes de energía, cuerpo negro, desastre ultravioleta, etc.), “Efecto fotoeléctrico” (13), “Ppio. de incertidumbre” (12), y “Schrödinger” (11). La dualidad sólo se refiere al comportamiento de la luz y aparece en menor proporción (6). Nueve alumnos no recuerdan ninguno de los temas de FQ desarrollados en el profesorado.

Fenómenos no explicados desde FC, origen de la FQ (pregunta 2)

Fenómenos no explicados desde FC, origen de la FQ (pregunta 2)	Casos
La radiación de cuerpo negro	17
Efecto fotoeléctrico	15
La naturaleza de la luz	9
Referencias a modelos atómicos (distribución de electrones en órbitas, niveles de energía)	9
Generalidades sin especificar (comportamiento ondulatorio de la luz, la teoría electromagnética clásica y la experiencia de Millikan, la luz se curva)	8

Nuevamente las cuestiones más mencionadas son las vinculadas a la radiación de *cuerpo negro* (17) y al *efecto fotoeléctrico* (15).

Un tema frecuentemente citado como algo que no puede explicarse desde la FC es *la naturaleza de la luz* (9). Un profesor nombra la dualidad onda partícula, pero nuevamente, sólo referida a la dualidad de la luz. Aparecen referencias ambiguas a los *modelos atómicos* cuando se cita la “distribución de los electrones en las órbitas” (3) y un poco más específicamente al referirse a “niveles de energía” (6). Algunos profesores citan temas que están fuera de la FQ como el comportamiento ondulatorio de la luz, la teoría electromagnética clásica, la experiencia de Millikan o frases tales como “la luz se curva” (8), lo cual evidencia falta de definición de los límites de la FQ.

En todos los casos las respuestas consistieron en palabras o giros aislados, sin explicación extendida.

Tres hipótesis de la FQ que contradigan supuestos de la FC (pregunta 3)

Tres hipótesis de la FQ que contradigan supuestos de la FC (pregunta 3)	Casos
Energía, que “viaja y se emite en paquetes o cuantos de $E=hf$ ”	13
Principio de incertidumbre	8
Dualidad de la luz	6
El espacio y el tiempo no son absolutos, que si bien contradice supuestos clásicos, es propio de la relatividad y no de la cuántica	5
No responden	9

La cuarta parte de los profesores (9) no responde, es decir no puede expresar ninguna hipótesis de la FQ que contradiga los supuestos clásicos. Varios de estos profesores recordaban haber desarrollado al menos cuerpo negro y efecto fotoeléctrico en sus estudios, pero no advierten en estos temas el surgimiento de hipótesis explicativas nuevas, que no encuadran en la FC. Esto muestra la ausencia de discusiones de cuestiones epistemológicas que superen una mera falta de información.

Entre las respuestas más frecuentes, las cuestiones más mencionadas aluden a la *energía*, que “viaja y se emite en paquetes o cuantos de $E=hf$ ” (13), al principio de incertidumbre (8) y a *la luz*, que “se comporta como partícula” (6).

En forma aislada se citan giros como “modelos atómicos”, “principio de exclusión”, frases tales como “dos electrones no pueden tener los mismos números cuánticos”, “la función de estado da idea de la probabilidad de encontrar una partícula”.

Al igual que en el caso de la pregunta anterior, no hay claridad para establecer los límites de la FQ como se evidencia en las citas que incluyen dentro de la FQ cuestiones que no lo son. Así se nombra el hecho de que *el espacio y el tiempo no son absolutos*, que si bien contradice supuestos clásicos, es propio de la relatividad y no de la cuántica (5).

Por otro lado, podemos destacar que muchas de estas afirmaciones no constituyen hipótesis, son sólo frases simples que identifican temas propios de FQ. Las hipótesis concretas que sustentan los fenómenos aludidos no son explicitadas. Esto muestra nuevamente la escasez de discusiones epistemológicas en la formación, en este caso, en relación a entender qué es una hipótesis.

¿Qué entiende por...? (pregunta 4)

Dualidad onda-partícula (ítem a)

¿Qué entiende por dualidad onda-partícula?	
La dualidad sólo referida a la luz	19 casos “el comportamiento de la luz”, “la luz a veces se comporta como onda y a veces como partícula”, “el comportamiento de la luz que es una onda pero viaja y se emite en paquetes”, “cuantización de la radiación”
Referencia a la dualidad de la materia	5 casos “la luz que es una onda y se comporta como partícula, a veces pasa esto también con los electrones, pero no se me ocurre en qué caso”, “la materia puede tener comportamiento corpuscular u ondulatorio según qué fenómeno estemos estudiando”, “la materia se comporta frente a determinados fenómenos como una onda o como una partícula, según el fenómeno”
Respuestas ambiguas o de diccionario y errores conceptuales	11 casos “el comportamiento distinto que tienen algunos entes físicos según en qué fenómenos se presentan”, “un electrón es una partícula y cuando cambia de nivel emite ondas”, “lo que se comporta como onda o como partícula”, “creo que se refiere a la luz”, “que se manifiesta como una onda o como una partícula”

	<i>indistintamente”, “que tenemos dos formas de encarar una medición, pero no necesariamente que la naturaleza presente una dualidad”</i>
No responde	3 casos

Las respuestas se refieren mayoritariamente al comportamiento de la luz que puede comportarse como onda o como partícula sin especificar las propiedades que caracterizan cada tipo de comportamiento (19 casos). Sólo un profesor vincula la dualidad *simultáneamente a la luz y al electrón*, como ejemplo de partícula.

El 50% relacionó la dualidad *onda-partícula* únicamente con la luz. Uno de ellos, consideró que hubo una evolución lineal de las ideas sobre la naturaleza de la luz: “...la naturaleza de la luz pasó de ser presentada como partícula (Newton) después como onda (Huyghens, de Broglie, Michelson), y luego como onda electromagnética pero con partículas que se mueven como ondas (Compton)...”.

Tres encuestados no responden y 11 aportan información ambigua. En un caso se da como ejemplo una partícula asociada a la radiación *luminosa* (no a la radiación en general) pero, en cuanto a la dualidad de la materia, sólo se refiere como “viceversa” de un ejemplo anterior: “...la dualidad es por ejemplo la radiación luminosa, para la cual la onda está asociada a una partícula y viceversa...”. Otro entiende que el comportamiento dual (ondas o partículas) es propio de lo que llama “*ciertos entes naturales*” sin tener en cuenta el diseño del dispositivo experimental que pone en evidencia dicho comportamiento. Otro la refiere a dos formas de medir, resaltando que esto no implica que haya una dualidad en la naturaleza.

Prácticamente no hay referencias al comportamiento ondulatorio de la materia desde la visión cuántica y los que citan cuestiones cercanas lo hacen en forma ambigua y sin fundamentación. Algunos aluden a la existencia de diferentes descripciones posibles: “..un cuerpo puede ser asimilado a una onda..”, “...posibilidad de describir una partícula según la teoría ondulatoria...”, “...la materia puede tener comportamien-

to ondulatorio...” siempre refiriéndose a la materia en general, sin alusión concreta a las partículas atómicas. Sólo uno se refirió con claridad a la dualidad en el comportamiento de los electrones: “...Un electrón es una partícula, tiene masa y se mueve, pero su comportamiento (por ej. en la difracción) se puede estudiar considerando que es una onda. Análogamente, la luz es un fenómeno ondulatorio pero cuando interactúa con la materia se considera compuesta por partículas sin masa: los fotones...”

Cuantificación (ítem b)

Qué es la cuantificación	
Referencia única a la energía	24 casos “energía de los distintos niveles atómicos”, “la energía no toma valores continuos sino discretos”, “la distribución de energía no es continua, hay que pensarla como paquetes o cuantos”, “que la energía toma valores determinados y no valores continuos”
Temas varios (cuantificación de la carga, de la masa, del momento angular, de niveles energéticos)	4 casos “niveles de energéticos con valores fijos de energía”, “valores discretos: masa, carga eléctrica, energía, cantidad de movimiento, momento angular.”
Significado etimológico	8 casos “lo que no es continuo”, “lo contrario a continuidad”, “variación de alguna cantidad física en cantidades discontinuas”, “que no hay un continuo que se puede “achicar” todo lo que uno quiera”, “lo contrario de continuidad”

El 70% de los encuestados que hablan de cuantificación se refieren casi exclusivamente a la energía (24 menciones). Unos pocos se refieren a *cantidades físicas* que sólo pueden variar en cantidades exactas, pero sin especificar a qué cantidades o magnitudes se refieren: “...existe alguna cantidad determinada que puede aumentar o disminuir en cantidades discretas...”, o citan ejemplos sin dar una definición: “...constante de Planck en relación a la energía y cuantificación de la carga del electrón...”.

Otros temas citados son la cuantificación de la carga (2 casos), de la masa y el momento angular (1 caso) y los niveles energéticos (1 caso).

Varios responden dando el significado etimológico y descontextualizado del término cuantificación (8 casos): “lo que no es continuo”, “lo contrario a continuidad”, “...existe

alguna cantidad determinada que puede aumentar o disminuir en cantidades discretas...”, “*variación de alguna cantidad física en cantidades discontinuas*”, etc. Este tipo de definiciones aparecen cuando los profesores recurren al significado de diccionario del término sugerido, situación que se repite a lo largo de todas las respuestas en la pregunta 4. Sólo uno se refiere a valores discretos para la masa, la carga, la energía, incluso la cantidad de movimiento y el momento angular. Cinco encuestados no responden.

Principio de incertidumbre (ítem c)

Es conocido por la mayoría de los encuestados (sólo hubieron 6 respuestas en blanco). En general existe una fuerte asociación del principio de incertidumbre a la imposibilidad de conocer simultáneamente la posición de una partícula y *otra magnitud*. Esta *otra magnitud no siempre está definida* y a veces es la velocidad, otras la cantidad de movimiento o incluso el instante en que la partícula está en esa posición. Otras veces, el principio de incertidumbre es simplemente una dificultad para la medir la posición, o una propiedad que permite determinar un rango de variabilidad para alguna variable. No se plantea el principio de incertidumbre para el tiempo y la energía.

La mayor cantidad de respuestas son las que se refieren al problema de determinar la posición de los electrones en el átomo (15 casos). Uno de ellos dice que debe hablarse de probabilidad pero no la asocia a la función de onda sino sólo con la incerteza en la posición: “... no podemos determinar el lugar exacto y en el momento exacto en que se encuentra una partícula. Hablamos entonces de probabilidad...”. Uno de los encuestados alude al concepto de orbital como la nube en la cual se encuentra el electrón moviéndose alrededor del núcleo sin que pueda establecerse su posición con exactitud: “... existe una zona donde podemos encontrar el electrón moviéndose, pero no podemos saber la posición exacta.”

Las relaciones de incerteza no se explicitan correctamente y a veces se escribe en palabras lo contrario a lo expresado en esas relaciones. Algunos profesores que muestran una mejor formación se refieren textualmente al principio de incertidumbre como un

“límite en la predicción que implica un límite de acceso a la realidad $\hbar \geq \Delta x \cdot \Delta p$ ” (registro memorístico incorrecto), “un límite relacionado con \hbar para determinar ciertas magnitudes”, “no se puede conocer simultáneamente la velocidad y la posición de una partícula, o la cantidad de movimiento y el instante de tiempo es decir $\Delta x \cdot \Delta v \leq \hbar$ o $\Delta p \cdot \Delta t \leq \hbar$ ”. Se advierte en este último caso, al igual que en otros, que respecto de las relaciones de Heisenberg el recuerdo es puramente memorístico y carece de interpretación.

Uno de los encuestados sólo pudo relacionar el principio de incertidumbre con el nombre de Heisenberg y la predicción sobre la ubicación de las partículas: “... recuerdo que lo estudia o plantea Heisenberg. Es la predicción sobre la ubicación de partículas...”. Otros hablan de la existencia de un límite en la determinación de ciertas magnitudes físicas como momento y posición. Excepto un profesor, ninguno relaciona el límite que introduce esta indeterminación con la constante de Planck. Tampoco aclaran si ese límite es inherente al modelo cuántico o si podría desaparecer alguna vez (con la introducción de variables adicionales, con el avance de la tecnología en las mediciones, con otra teoría, etc.). No se discute si es válido en las grandes dimensiones. Tampoco se valora su potencialidad como uno de los pilares de la física cuántica.

Orbitales (ítem d)

Qué entiende por orbitales	Casos
Zonas del espacio en torno al átomo	15
Relacionado con los niveles energéticos	7
Versión mejorada de la órbita atómica	4
No responde	9

Todos coinciden en que los **orbitales** son zonas del espacio en torno al átomo en las que es más probable encontrar los electrones (15 casos, en uno de los casos se agrega girando alrededor del núcleo). El orbital es una versión mejorada de la órbita (4 casos) y está relacionado con los niveles energéticos y la probabilidad de encontrar los electrones (7 casos). Sólo un profesor se refiere a los orbitales como una “zona” del átomo que

representa la densidad espacial de probabilidad para los electrones. Las respuestas en blanco fueron 9.

Causalidad en la física e Interpretación probabilística (ítems e y f)

	causalidad en la física	interpretación probabilística
No responden	22 casos	22 casos
Definición de diccionario	12 casos “que se conocen las causas de algo”, “algo pasa porque pasó algo antes”, “a cada causa le corresponde el mismo efecto”	10 casos “es la imposibilidad de determinación”, “hay probabilidad de que ocurra algo”, “que se sacan conclusiones a partir de datos estadísticos”
Respuestas aisladas	5 casos “el mismo fenómeno produce el mismo fenómeno”, “hay certeza en la determinación de resultados”, “aceptar que todo fenómeno es efecto de otro que puede ser determinado”	7 casos “sólo puede determinarse la probabilidad de la posición de un electrón en el átomo”, “es una herramienta para resolver el problema de la incerteza en la medición de la posición y la velocidad”

La **causalidad en la física** junto con **interpretación probabilística** son los temas en que presentan la mayor cantidad de ausencia de respuestas y la mayor presencia de definiciones de diccionarios

Respecto a qué entienden por la **causalidad en la física**, si bien las pocas respuestas obtenidas son aceptables, es de destacar la gran cantidad de encuestados que no responden siendo que como docentes han analizado fenómenos de la física clásica en repetidas oportunidades (22 casos). Sólo en dos casos se alude a la determinación de los resultados a partir de las leyes que rigen un fenómeno físico (la ley de movimiento, por ejemplo) y las condiciones iniciales. Otras respuestas son ambiguas y sin clara vinculación con la física “el mismo fenómeno produce el mismo fenómeno”, “hay certeza en la determinación de resultados”, “aceptar que todo fenómeno es efecto de otro que puede ser determinado”, etc. Las respuestas de diccionario plantean frases como “que se conocen las causas de algo”, “algo pasa porque pasó algo antes”, “orden lógico impuesto por nosotros”, “a cada causa le corresponde el mismo efecto”, “orden lógico esperado”, “causa-efecto”, etc., (12 casos)

Las respuestas encontradas, sugieren una falta de profundidad en el análisis de las implicancias epistemológicas, incluso de los supuestos clásicos. Las carencias en la formación en este aspecto, pueden constituirse en un obstáculo importante para comprender los límites y alcances de la FC y la FQ.

Respecto a la *interpretación probabilística*, más de la mitad de los encuestados no puede responder (22 casos) y los que lo hacen, dan definiciones de diccionario recurriendo a las argumentaciones que les sugiere el término “probabilidad”, sin vinculación con el sentido atribuido en la física (10): “*es la imposibilidad de determinación*”, “*hay probabilidad de que ocurra algo*”, “*resultados probables*”, “*que se sacan conclusiones a partir de datos estadísticos*”, etc.. Sólo en tres casos correspondientes a profesores de mayor formación, se alude a cuestiones vinculadas a la FQ, como “*sólo puede determinarse la probabilidad de la posición de un electrón en el átomo*” (1 caso) o “*es una herramienta para resolver el problema de la incerteza en la medición de la posición y la velocidad*” (2 casos).

Partículas elementales (ítem g)

Partículas elementales	
partículas indivisibles que forman el núcleo	14 “en los reactores nucleares se rompen los núcleos y se emiten partículas alfa, beta y gamma”, “las que componen el núcleo de los átomos y los electrones y los quarks”, “los constituyentes del átomo”, “Los distintos tipos de partículas que componen el átomo (protones, neutrones y electrones)”
Significado de diccionario	13 “Las que no se pueden dividir, moléculas o átomos según el caso”, “las que componen la materia, indivisibles”, “Las más pequeñas que pueden encontrarse en la naturaleza”, “Partículas “indivisibles”(..?), las partículas más pequeñas que han sido observadas o detectadas”, “Últimos ladrillos del andamiaje universal”
No responden	7

En cuanto a definir qué es una **partícula elemental** predomina la idea de partículas indivisibles, en general las que forman el núcleo. Las partículas α , los protones y los neutrones comparten este grupo junto a las partículas β , los electrones y los quarks (14) en forma indistinta, curiosamente se incluye al núcleo de helio, posiblemente dado su denominación “partícula α ”. Nuevamente en este caso como en otros trece, se definen los conceptos a partir de su significado etimológico, en forma descontextualizada y sin vinculación con los contenidos. Las respuestas en blanco fueron siete

Asociación de científicos notables de la FQ con avances de la ciencia (pregunta 5)

Asociación de científicos notables de la FQ con avances de la ciencia		
Heisenberg	Principio de incertidumbre, incertezas	27
	Formalización de la mecánica cuántica	1
	No responde	10
De Broglie	Dualidad onda-partícula	6
	Ondas, fenómenos ondulatorios	4
	Onda piloto, onda asociada a partícula	5
	Desarrollo de la MQ	1
	La luz como partícula	1
	Estructura atómica, modelo atómico	2
	Exclusión	2
	No responde	17
Maxwell	Electromagnetismo, ecuaciones	23
	Mecánica estadística	5
	Ondas electromagnéticas, luz, óptica	6
	No responde	7
Planck	Cuantificación de la energía	16
	Cuerpo negro	9
	Teoría cuántica	3
	Cuantificaciones. La constante	5
	Modelo del átomo	2
	No responde	7
Einstein	Teoría de la relatividad	30
	Efecto fotoeléctrico	9
	Cuantificación de la energía	3
	Teoría atómica	1
	Fotones, ecuación, movimiento browniano	2
	No responde	2

Schrödinger	Ecuación de ondas. Ecuación de onda para la luz	7
	Ecuación de Schroedinger. Números cuánticos	2
	Ec. ondas para la materia	2
	Función de onda	1
	Función de estado	1
	Ec. diferencial para las ondas de probabilidad	1
	Iniciador de la MQ	1
	No responde	22
Bohr	Modelo atómico	24
	Modelo átomo de hidrógeno y modelo átomo de hidrógeno, cuantización de de órbitas o de niveles electrónicos	8
	Interpretación de la MQ, padre de la MQ	2
	Espectros	1
	Teoría atómica de la luz	1
	No responde	0
	Faraday	Variación del flujo magnético en el tiempo, inducción, fem, efectos electromagnéticos, electricidad, relación entre campos magnéticos y eléctricos, electroquímica, ec. de Maxwell	30
	Motores, transformadores, electromimanes, generación	4
	No responde	4
Born	Resulta familiar	3
	Lo confundo con Bohr	1
	Mecánica estadística	1
	No responde	33
Young	Optica física, Experiencia de Young	20
	Teoría ondulatoria, Ondas, Modelo de onda de La luz	4
	Elasticidad, Constante	4
	Óptica geométrica	1
	No responde	11
Thomson	Modelo atómico primitivo, modelo atómico (budín)	24
	Descubrimiento del electrón	3
	Medición de e/m	2
	Configuración del átomo	1
	No responde	11
Rutherford	Modelos atómico:	19
	Modelo planetario	5
	Modelo atómico cuántico	1
	Descubrimiento del átomo, modelo de núcleo	2

Pauli	Principio de exclusión	16
	Principio de incertidumbre	3
	No responde	19

Se atribuye a Heisenberg el principio de incertidumbre (pero en ningún caso se expresan las relaciones de incerteza (27 casos, 70%). A De Broglie se debe la idea de dualidad onda partícula, las ondas piloto y todo tipo de fenómenos ondulatorios clásicos o asociados tanto a la luz como a las partículas (16 casos). Se asocia a Maxwell con el electromagnetismo (23 casos) y a Planck con la cuantificación de la energía y el cuerpo negro (25 casos), “la constante” (sin especificar cuál) (5 casos) y el modelo del átomo (2 casos). Einstein se asocia mayoritariamente con la teoría de la relatividad (30 casos) y el efecto fotoeléctrico (9 casos). Schrödinger refiere a la ecuación de ondas, aunque no es claro si esta ecuación es aplicable a las partículas o a la luz (10 casos), 22 no responden. Bohr es conocido por todos y está indiscutiblemente relacionado con el modelo del átomo (24 casos) y en una oportunidad se lo titula el “Padre de la Mecánica Cuántica”. Faraday, con los fenómenos inductivos y el electromagnetismo (30 casos). Se identifica a Young con la óptica física (20 casos), a Thomson y Rutherford con los modelos atómicos (24 y 25 casos respectivamente) y a Pauli con el principio de exclusión sin explicitar en qué consiste este principio (16 casos). Bohm y Born no son conocidos (respuestas en blanco 38 y 33 respectivamente).

La tecnología y la FQ (pregunta 6)

Desarrollo a partir de la FQ	
dispositivos de uso cotidiano	10 LCDs, cámaras digitales, celulares, micro-ondas, fluorescentes
componentes electrónicos	14 (detectores fotoeléctricos, circuitos electrónicos, semiconductores, superconductores)
tecnología médica	10 (medicina nuclear, RMN, radioisótopos, tomógrafos)

Las respuestas más frecuentes pueden agruparse en tres categorías: dispositivos de uso cotidiano (LCDs, cámaras digitales, celulares, micro-ondas, fluorescentes), componentes electrónicos (detectores fotoeléctricos, circuitos electrónicos, semiconductores, superconductores) y tecnología médica (medicina nuclear, RMN, radioisótopos, tomógrafos).

Se incluye entre los dispositivos surgidos a partir de la física cuántica todos los avances desarrollados en el siglo XX. En algunos casos no se distinguen los principios clásicos que explican funcionamientos de los sistemas electrónicos de origen cuánticos necesarios para su control. Así, se incluyen entre otros, la radio, el ecógrafo, el telescopio espacial y la fotocopiadora que, si bien son manejados a través de componentes electrónicos, pueden ser explicados desde la física clásica. También se incluyen novedades del siglo XX y anteriores, como las fibras ópticas y los transformadores, cuyo fundamento radica en la física clásica.

Opiniones sobre temas de FQ incluidos en la currícula y formación personal (pregunta 7, 8, 9 y 10)

No se obtuvieron respuestas que permitieran definir en forma contundente la posición de los profesores. La mayoría prefirió no responder y muchos manifestaron su desconocimiento en cuanto a los temas propuestos para su incorporación en la currícula. Sólo 10 profesores realizaron cursos de perfeccionamiento posteriores al profesorado y estando ya en actividad. Los demás realizaron lecturas en forma individual y dos dicen no tener necesidad de estos temas para dar clase en el nivel medio.

En general, sólo algunos profesores interesados por mejorar su formación y que están realizando una carrera posterior al cursado del profesorado, conocen algunos de los temas vinculados a la FQ incorporados a la nueva currícula y acuerdan en que su inclusión en la escuela media es una necesidad actual. Ninguno de los encuestados sugiere temas de relevancia para incluir. Luego del cursado del profesorado, sólo algunos han visto nuevamente estos temas, a través de algunos cursos aislados y lecturas personales.

6.2.2 Los textos y sus respuestas

Recordemos que este instrumento consistió en cuatro serie de cinco textos con preguntas, que relevaban aspectos de la formación en FQ. Cada serie de textos fue respondida por 8 profesores (total 32 profesores encuestados) en el ámbito de una Reunión Nacional de Educación en la Física organizada por la Asociación de Profesores de Física de la Argentina (APFA).

Se transcribieron las respuestas correspondientes a un mismo texto y luego se las agrupó según los cinco aspectos a investigar establecidos con anterioridad:

- Aspectos generales del desarrollo de la MQ: Textos 7 y 8 (serie 1)
- Límites y diferenciación de modelos: Textos: 1 y 2 (serie 1), 3 y 6 (serie 2) y 8b (serie 3)
- Conocimiento específico Modelos para la radiación: Textos: 4 (serie 2), 5 (serie 1),12 (serie 3) y 13 y 18 (serie 4)
- Conocimiento específico: dualidad y comportamiento ondulatorio de la materia: Textos: 9 y 10 (serie 3) y 15b (serie 4)
- Otros conocimientos específicos: Textos: 11 (serie 2), 14 (serie 3), 15 y 16 (serie 4) y 17 (serie 2)

Con este instrumento no se pretende determinar si las respuestas de los profesores son correctas o incorrectas, sino conocer su pensamiento en relación a los aspectos a investigar mencionados. Se realizó un meticuloso análisis cualitativo del conjunto de respuestas obtenidas para cada aspecto indagado y se sacaron conclusiones. Las respuestas resultaron ser parcas y no se encontraron fundamentaciones aún en los casos que el pedido de justificación era explícito, las mismas se transcriben en el Anexo 2: Textos FQ.

Para una síntesis más clara, en la tabla 6.1 se describen los resultados agrupados por aspecto investigado indicando los textos y series correspondientes en cada caso.

Tabla 6.1: Resultados respuestas textos FQ

Aspecto investigado	Resultados
Generalidades del desarrollo de la MQ Textos 7 y 8 (serie 1)	El principio de correspondencia no es conocido. De los nombres de científicos propuestos sólo se reconocen a Schrödinger y Heisenberg dentro de la MQ (en el listado no se incluía a Bohr y anteriores precuánticos).
Límites y diferenciación de modelos Textos: 1 y 2 (serie 1), 3 y 6 (serie 2) y 8b (serie 3)	Es conocida la secuencia histórica de los modelos de Thomson y Rutherford. Los encuestados coinciden en que el modelo de pasas de Thomson es un modelo superado por el modelo planetario nuclear atribuido a Rutherford, pero no hay claridad sobre cómo las observaciones del experimento del bombardeo con partículas alfa aportan las hipótesis que llevan al diseño del nuevo modelo. Los postulados de Bohr son más familiares y se establecen con cierta claridad las premisas que rompen con los supuestos clásicos (órbitas con energías definidas, electrones que radían sólo cuando cambian de nivel orbital). Se le reconoce al modelo de Bohr la explicación de los espectros atómicos. Las limitaciones del modelo de Bohr están asociadas a que en este modelo se postula la existencia de “órbitas y no orbitales”, (según uno de los encuestados las órbitas son circulares a diferencia de los orbitales) y a que no predice la existencia de neutrinos y otras partículas.
Conocimiento específico Modelos para la radiación. Textos: 4 (serie 2), 5 (serie 1), 12 (serie 3) y 13 y 18 (serie 4)	El efecto fotoeléctrico es una experiencia conocida se lo asocia a la cuantización de la energía y a la ecuación de Einstein $E=hf$, pero no se especifica por qué se lo incluye dentro de las experiencias conflictivas, es decir, por qué cuestionaba los principios clásicos, ni qué principios. La generación de fotones está asociada únicamente al cambio de nivel de los electrones en el átomo. El fotón, si bien es una “partícula de energía”, no deja de ser energía y como tal no se le atribuye cantidad de movimiento, capacidad de ser atraídos por un campo gravitatorio o de colisionar con partículas. Se dice que según el montaje del experimento la luz puede comportarse como onda o como partícula, pero en este último caso, no se especifican las propiedades que permiten afirmar que su comportamiento puede asimilarse al de las partículas
Conocimiento específico: dualidad y comportamiento ondulatorio de la materia Textos: 9 y 10 (serie 3) y 15b (serie 4)	Cuando se piden ejemplos de comportamiento dual sólo un caso nombra como ejemplo de dualidad al fotón que puede ser atraído por un campo gravitatorio y a la difracción de electrones. Los demás no contestan o muestran serias imprecisiones para distinguir las propiedades del comportamiento ondulatorio del de una partícula. Se asocia a las ondas la reflexión y a las partículas, el movimiento. Hay una negación a

	<p>pensar en el comportamiento dual de la materia, el texto presentaba la premisa: “la difracción establecería la existencia física de las ondas de electrones” y uno de los encuestados ejemplifica este hecho con la experiencia de Young referida a la luz.</p> <p>Se habla de una “onda asociada” pero esto no significa que la materia exhiba propiedades ondulatorias, sino más bien refiere a un modelo de onda piloto que rige el movimiento de los electrones.</p>
<p>Otros conocimientos específicos Textos: 11 (serie 2), 14 (serie 3), 15 y 16 (serie 4) y 17 (serie 2)</p>	<p>Los orbitales son zonas del espacio donde es probable encontrar electrones, asociadas únicamente al número cuántico n. Como ejemplo de otros números cuánticos, se nombra al espín y el momento angular y se asocia cierto número “s” a la cantidad de electrones por nivel. La función de onda no es conocida como concepto propio de la MQ</p> <p>Se afirma que la MQ sólo aporta resultados estadísticos pero que esto es temporal y podrá superarse cuando se descubran nuevas variables explicativas y se den mejores las condiciones experimentales.</p>

6.2.3 Un experimento ideal

Este instrumento consistió en una entrevista escrita aplicada a diez profesores de Física de nivel medio. Su propósito fue investigar si los profesores diferenciaban, el comportamiento ondulatorio del de las partículas. Pretendía observar, también, si conocían detalles de los fenómenos ondulatorios, las características y límites de este modelo y si creían posible que las partículas presentasen comportamiento similar a la luz.

Este instrumento no arrojó resultados contundentes. Las respuestas fueron ambiguas y con escasa o nula fundamentación. Si bien se evidencia falta de claridad de conceptos, no podemos atribuir totalmente a este hecho el bajo rendimiento de los profesores dado la carencia de resultados efectivos. Creemos que la propia presentación del instrumento induce a los profesores a responder vinculando la experiencia ideal a la dualidad de la materia y esto hace cuestionable su validez.

Nos referimos a que en la introducción se informa a los profesores que la entrevista era parte de una investigación vinculada a la enseñanza de la “Física Cuántica”, y a continua-

ción se les presenta un experimento ideal en el que participan “electrones”, indiscutiblemente identificados como partículas, pero participando de una “experiencia de doble rendija” similar a la de Young a la que los profesores relacionan con la interferencia constructiva/destructiva de las ondas. Esta situación, totalmente nueva para los profesores (si bien han discutido durante su formación cuestiones relativas a la dualidad de la luz como la definición del fotón, el efecto fotoeléctrico, etc., la dualidad de la materia sólo es citada en relación de Broglie y las ondas piloto), los induce a responder pensando en un modelo ondulatorio del electrón sin una fundamentación coherente de las respuestas. No obstante, resumimos a continuación algunos aspectos que reflejan el pensamiento del profesor y que dejan traslucir cómo fuerzan las respuestas al intentar dar explicaciones desde la FQ.

La experiencia de la doble rendija es algo conocido y se asocia en forma unánime a los fenómenos ondulatorios. Se intuye que el tamaño de abertura es importante e influye en la forma de las gráficas pero no se sabe cómo. No hay distinción entre interferencia y difracción. Se asocia cualquier curva con una onda, incluso la gráfica de intensidades, así, explicaban la curva P_{12} correspondiente a la suma directa de la cantidad de electrones que pasaban por cada abertura en forma independiente, con frases como:

- *Se suman las dos ONDAS*
- *Es el resultado de la interferencia constructiva de P_1 y P_2*
- *La curva P_{12} es la suma de la P_1 y la P_2 . En el centro la suma es constructiva y en los costados destructiva (se restan)*
- *Principio de superposición de ondas*

Al tratarse de electrones y sabiendo que ésta es una investigación sobre enseñanza de la “física cuántica”, se afirma que la figura corresponde a un patrón de difracción sin hacer comentarios respecto a la relación que debe darse entre los tamaños de partículas (o longitudes de onda asociadas) y aberturas para poder observar un fenómeno ondulatorio:

- *Es el comportamiento ondulatorio de la materia*
- *En esta situación se puede ver el comportamiento ondulatorio de la materia. Si sólo tengo la abertura 1, la probabilidad de encontrar un electrón es de la forma P_1 . Si sólo tengo la abertura 2, la*

probabilidad de encontrar un electrón es de la forma P_2 . P_{12} toma esa forma porque en $x=0$ tendré un máximo de interferencia de 1 y 2 y allí la probabilidad de encontrar un electrón es mayor.

- Esta curva muestra la **densidad de distribución de probabilidad** de los electrones que impactan sobre la pantalla.

La mayoría afirma que el tamaño de los agujeros influye en las curvas pero las respuestas se limitan a optar por un “...Sí, influye...” sin justificación. Uno supone que aparecen mayor cantidad de máximos (figura 6.1a), otro dibuja la misma curva pero más pronun-

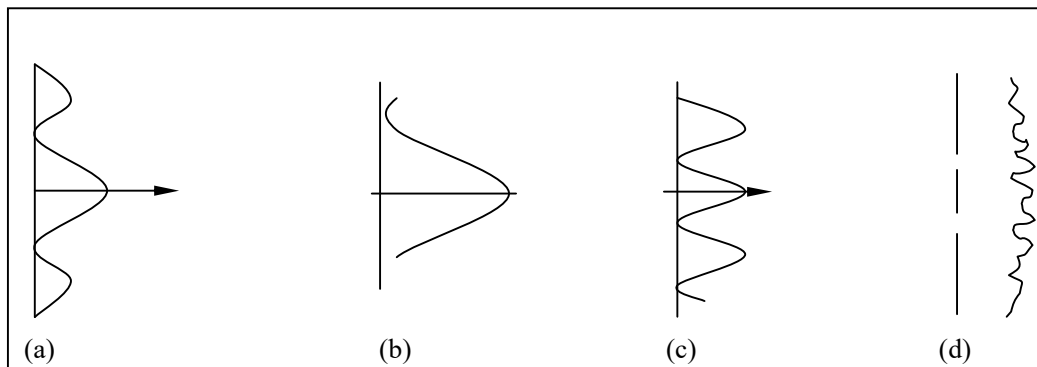


Figura 6.1: Respuesta de los profesores al instrumento 4

ciada (figura 6.1b), otro mayor cantidad de máximos (figura 6.1c y d) pero en ninguno de los casos se justifica el cambio.

Quando se les pregunta por la misma situación pero reemplazando la fuente de electrones por una de luz, las respuestas no varían demasiado pero parece haber mayor seguridad en relación a cómo afecta el tamaño de la abertura.

- Con luz monocromática tendría un máximo principal y máximos y mínimos secundarios. La amplitud de la curva depende del tamaño de la longitud de onda respecto de los orificios

- La curva sería un \cos^2 . Si las aberturas son pequeñas tendría... (dibuja máximos de interferencia modulados por una curva de difracción)

En general los profesores han leído alguna vez que la materia presenta comportamiento ondulatorio a nivel microscópico, pero no hay una formación sólida en el tema ondas. Se evidencia falta de claridad a la hora de especificar las características que hacen que un fenómeno pueda ser catalogado como ondulatorio. Así, doble rendija es sinónimo de

interferencia de ondas, y electrones más doble rendija es sinónimo de comportamiento ondulatorio de la materia, pero sin comprensión cierta de lo que están expresando.

6.2.4 Las entrevistas

Se comentan las respuestas vertidas en 8 largas entrevistas que fueron registradas mediante un grabador de audio y luego transcritas. Las mismas se analizaron numerando las líneas de diálogo y asignando códigos a los párrafos de interés. Los códigos surgieron de la lectura reiterada de las entrevistas y definen aspectos del pensamiento del profesor. Para el análisis de los resultados los mismos fueron agrupados en 8 categorías de observación establecidas previamente. Así, por ejemplo, para la categoría de observación “Formación Personal” se establecieron cinco códigos: *Memorístico*, *Anecdótico*, *Formalismo*, *Crítica* y *Libros*, y para la categoría “Plateo Didáctico” se establecieron los códigos: *Crítico*, *Histórico* y *Anecdótico*.

Se asignó un color a cada categoría para facilitar la visualización y búsqueda de coincidencias. En la siguiente tabla se presenta el listado de categorías y códigos y una breve descripción de los mismos.

Tabla 6.1: Categorías y códigos establecidos para el Instrumento 5 Entrevistas

Categorías	Códigos	Descripción del código
PERFIL DEL PROFESOR (blanco)		En las primeras líneas de la entrevista se caracteriza el sujeto entrevistado
FORMACION PERSONAL Bajo este código se intenta caracterizar el tipo de formación (amarillo)	MEMORISTICO	Memorístico: los conceptos aparecen en forma puramente memorística
	ANECDOTICO	Anecdótico: el desarrollo de la FQ resulta ser una serie de anécdotas referidas a diversos descubrimientos
	FORMALISMO	Formalismo: se expresan o alude a ecuaciones o variables o se recuerdan las dificultades matemáticas por sobre los conceptos
	CRITICA	Crítica: Critica el tipo de formación recibida o la metodología de enseñanza recibida
	LIBROS	Libros: es un tipo de aprendizaje referido a la secuencia temática de los libros tradicionales, se recuerda más la secuencia que los contenidos

DIF-PREQ/QUANT (fucsia)	DIF ELEC/QUANT	Aquí aparecen comentarios sobre cómo el profesor diferencia la Física Clásica de la Física Cuántica, la Física Pre-Cuántica de la Física Cuántica y en particular el Electromagnetismo de la Física Cuántica.
PLANTEO DIDACTICO Se refiere al planteo didáctico que propone el profesor para sus clases (violeta)	CRITICO	Crítica: critica otros planteos didácticos
	HISTORICO	Histórico: propone un planteo didáctico basado en la historia de la ciencia, secuencial
	ANECDOTICO	Anecdótico: propone un planteo didáctico basado en anécdotas con poca base científica, intenta ser más entretenido que formal
EPIST Se intenta caracterizar el posicionamiento epistemológico del profesor (verde agua)	EVOLUCION	la ciencia está en continua evolución
	CAUSALIDAD	Causalidad: alude a la causalidad en la ciencia
	PROBABILIDADES	Probabilidades: alude al comportamiento probabilístico en la ciencia
	COMPLETITUD	Compleitud: alude a la completitud o no de la MQ
FORMACION ESPECIFICA Se intenta caracterizar la formación del profesor en temas específicos (celeste y rojo)	NUMEROS CUANTICOS	Números Cuánticos: conocimiento sobre cuáles son los números cuánticos y su interpretación
	DUALIDAD: LUZ, PARTÍCULAS	Dualidad: se diferencian los comentarios referidos a la dualidad de la luz y a la dualidad de las partículas
	TC (temas clave: relaciones de incertezas, de Broglie (dualidad), comportamiento probabilístico)	Dentro de la formación específica se observan algunos temas en particular: relaciones de incerteza, de Broglie y la dualidad, comportamiento probabilístico. La supersposición de estados es un tema considerado clave pero desconocido para los profesores, por lo que no aparece en este listado. En esta sección, la observación se realiza desde la formación y no desde las creencias epistemológicas.
MODELOS (verde)	ELECTRON	Se intenta caracterizar los modelos o representaciones del profesor sobre algunos temas específicos: el electrón (como ejemplo de partícula), los orbitales y el concepto de dualidad . Dentro de este último se presta atención a la diferenciación en las representaciones del fotón , la luz , las partículas y el electrón . En esta sección la observación no apunta a la formación sino a los modelos que el profesor ha construido y que puede transmitir.
	ORBITAL	
	DUALIDAD: FOTÓN, LUZ, PARTÍCULA, ELECTRÓN	
OPINION (turquesa)	PUEDE DARSE	Este apartado recoge las opiniones de los profesores respecto a la factibilidad o no de implementar la enseñanza de la FQ en el nivel medio.
	NO PUEDE DARSE	

Una vez asignados los códigos, se extrajeron los párrafos de todas las entrevistas correspondientes a una misma categoría y se elaboró una síntesis de la misma. Se recabó una opinión crítica de otros investigadores acerca de las conclusiones y se hicieron los ajustes sugeridos.

Presentamos a continuación las síntesis elaboradas para cada categoría y un resumen global de las opiniones

La formación de los profesores: ¿Qué temas recuerdan haber visto en física cuántica? (Categorías: FORMACIÓN PERSONAL y DIF-PREQ/QUANT)

En general la formación de los profesores puede considerarse de tipo informativa y en este aspecto es relativamente buena hasta Bohr. En adelante se introducen nombres y cuestiones fragmentadas e inconexas. Tienen una clara idea de la sucesión histórica de acontecimientos vinculados al desarrollo de la física cuántica desde mediados del siglo XIX a principios del siglo XX. Identifican sin mayores dificultades a quienes colaboraron en la construcción de las nuevas ideas e incluso caracterizan la existencia de un período precuántico o de transición en los que incluyen a Balmer, Planck, Einstein, Thomson, Rutherford. Sin embargo, en algunos casos se filtran nombres vinculados a la física del electromagnetismo como Maxwell, Hertz, Lorentz y Young.

...a ver. Faraday estaba en la parte de ...me estoy confundiendo. Hace toda una historia... de cuantización... (Lucía, 68)

Hertz yo creo que estaba en las dos, en los dos tipos de física, clásica y cuántica, o por lo menos algún experimento de Hertz ya está participando en la parte de cuántica, el Franz y Hertz... (Lucía, 68)

E7(el entrevistador refiriéndose a la ecuación de Schrödinger): ¿qué es lo que encontraste en esta expresión que te hizo asociarla a Maxwell? –MARY: me parece que es la ecuación de la energía dada por la función de la onda (Mary, 197-203)

(Lorentz) ...me suena a mecánica relativa...no me puedo acordar, lo voy a dejar acá por ahora, en el medio, junto con Balmer....Y Poynting...me acuerdo del vector de Poynting...¿era ondas electromagnéticas?...Sigo con dudas con Lorentz, me suena a mitad de camino entre mecánica relativa y física cuántica...(Franco, 47)

Cuestiones relacionadas con la radiación y las ondas electromagnéticas tampoco son fácilmente separadas de las experiencias conflictivas sobre la naturaleza de la luz y la radiación de fines de siglo XIX.

..También podríamos trabajarlo desde el punto de vista cuántico...El trabajo de Hertz, Faraday, si lo trabajamos como onda electromagnética podemos irnos para el lado de la cuántica ... pero no sé que definieron, sé qué trabajé con Young... (Carla,148-153)

E1(entrevistador): ¿habrá alguna diferencia entre la onda de Schrödinger y la onda elástica o la onda electromagnética?, FRANCO: Sí, la hay, pero no me acuerdo., E1: Cuando vos pensás en una onda, pensás en la onda electromagnética?, FRANCO: Sí, en las de las ecuaciones de Maxwell, pero no puedo profundizar más que eso, me suena a "x,t" , me cuesta llegar a la otra, la de Schrödinger (Franco, 697, 706)

... qué quiere decir función de onda, las propiedades que tienen todas las ondas? ¿La función que resuelve la ecuación de la onda? (Mary, 39)

Los avances de la tecnología desarrollados en el siglo XX también son asociados con la FQ, aunque se refieran a aspectos que bien pueden ser explicados desde la FC, como el tubo de rayos catódicos o experiencias vinculadas a presión de radiación. Parece haber cierta identificación entre la FQ y cualquier otra rama de la física que resulte de mayor complejidad que la mecánica o la óptica geométrica que constituyen los temas más frecuentes en la enseñanza media

...estaba pensando algunos ejemplos...cuando trabajábamos, entre otras cosas , con el tubo de rayos catódicos, o cuando se trabajaba con espectros, en electromagnetismo en general. Hay un montón de cosas que creo que por ahí, si se toma desde el punto de vista de la onda electromagnética o cuántica..., es más, ahora me pregunto cómo habría que darlo (Carla, 197)

...yo lo vi después en un museo... []...dentro de una lámpara de vacío, con un molinete pintado de negro y del otro lado fluorescente y...gira! Entonces tratás de ver la incidencia del fotón...(Carla, 110)

... la estufa a cuarzo...el,... el televisor....[]... Si hay radiación la puedo explicar por medio de fotón... []...Y podría pensar en la parte de frenado de electrones... o movimiento de electrones, que podría asociarlo con... Ahí me quedé. No lo sé explicar, lo dije de entrada...La lamparita..... por la radiación, viste, creo que tiene algo que ver con cuerpo negro (Lucía, 502-513)

Las experiencias conflictivas de principios del desarrollo de la MQ no son claramente identificadas, se nombra el problema del cuerpo negro, los espectros, el efecto fotoeléctrico, pero no se explicita qué aspecto no podía ser explicado desde la FC, ni las nuevas hipótesis o modelos que se plantearon para salvar esas dificultades.

...(refiriéndose a Einstein y Planck)... trataron de cuantificar la carga, la ecuación de la energía...[]...Max Planck trabajó y sacó que la energía era proporcional a la constante por la frecuencia. Bueno Einstein y su famosa fórmula $E = m.c^2$, creo que era así, todo el mundo pregunta, la interrelación entre la materia y la energía ..., la masa y la energía, la constante de la velocidad de la luz...[]... cuando alcanza una gran velocidad una partícula, esa partícula al llegar a la velocidad de la luz, ¿en qué se transforma?, se transforma en energía... []... (Planck) habló de la cuantificación y de la ley... [], Planck plantea, lo que pasa que ellos cuando trabajan en la física cuántica, eh..., digamos, manifiestan que la onda, que la luz se puede transformar, puede actuar como onda o como partícula y bueno..., y en la experimentación que realizan, la luz actúa como un fotón, ellos trabajan la idea del fotón. De un cuanto de energía, es decir una medida de la energía, podemos medir la energía como medíamos, digamos podemos tenerla como paquetes de energía. (Mary, 232-246)

...E7(entrevistador): ¿Y algo contradiga los postulados de la física clásica que se venía trabajando? [] MARY: Se trabajaba mucho con la energía y surge el concepto de poder armar paquetes de energía, el cuanto. Paquetes de energía que antes no se trabajaba... El nombre de cuántica, cuanto quiere decir cantidad, o sea que...,E7: ¿y que es lo que se cuantifica?, MARY: la energía, E7: ¿alguna otra cosa que se haya cuantificado?, MARY: No, no, a lo mejor digo disparates, la cuantificación de las cargas eléctricas, puede ser? .Lo que me acuerdo de FQ es paquete de energía y fotón (Mary, 343-355)

...E5 (entrevistador):¿Cómo se plantearon los primeros interrogantes? []...CARLA: No, para nada. Nada más lo que leí,...qué pasaba con los rayos,...pero la esencia, cómo empezó la FQ...Lo que me acuerdo es de cuando empecé a trabajar en la adscripción...la parte de energía,...la parte de partículas,...la parte de...El tubo...,cómo se llamaba?...[] algo pasaba con el gas y el espectro y a partir de ahí...?...pero después, otra cosa no me acuerdo...(Carla, 81,83)

... ¡ah!, Dispersión de partículas alfa...Yo no lo tomé como cuántica...yo no lo tomé como un fenómeno cuántico..., el del experimento de...¿ Thompson ...fue el de las partículas alfa?...yo no me acuerdo... No,.Thompson fue el modelo del pan dulce. Esto es de Rutherford ...pero yo no lo pensé como cuántico. No lo sé (Sandra, 147-148)

...la emisión, absorción de energía por parte de los átomos, Son valores determinados de los cuales no hay valores intermedios, o por lo menos...**en pequeños rangos a lo mejor sí, debido al principio de incertidumbre**, pero, pero hay determinados valores de energía que no aparecen en esa emisión- absorción, que da lugar a que no pueda haber una variación continua de esa energía. Eso en cierto modo no puede ser explicado digamos por la física clásica. Eso en cuanto a la energía. ... [] Otra es, de acuerdo al modelo de átomo, por qué un electrón no tiene más que dos posibilidades **de rotación sobre su propio eje**; eso tampoco la física clásica no lo puede justificar... [] Otra es ...en el caso de la radiación de cuerpo negro, por qué, cuando uno hace la curva de energía en función de longitud de onda o frecuencia hay determinados valores de longitud de onda que son máximas para tal temperatura...Tampoco puede ser explicado por la física clásica (Sandra, 294-299)

Sólo uno de los entrevistados pudo precisar el aspecto no explicado por la mecánica clásica y cómo la MQ plantea un nuevo modelo de materia con mayor alcance explicativo, pero en un nivel anecdótico basado en la historia de la ciencia, sin profundización formal.

...Einstein, bueno, fue el que explicó el efecto fotoeléctrico, o sea tomó lo que dejó Planck y justificó el efecto fotoeléctrico usando la idea de quantum de energía. Claro, Planck dejó una expresión que era un $h\nu$, que era una cantidad de energía que le quedó en las ecuaciones y que no sabía cómo justificarlo. Einstein tomó esa expresión, dijo esto es un quantum de energía y lo usó para explicar el efecto fotoeléctrico. (Franco, 72-75)

... Balmer era sólo un maestro suizo que en 1860 o 1870, digamos antes de Planck, vio unas rayitas y pensó en un numerito asociado y se propuso encontrar una formulita que describiera lo que veía, y encontró una fórmula totalmente empírica! O sea que no tenía idea de por qué le aparecía en su fórmula un “ n_2 ” y, creo que a él le tocó un “2”? Es decir, el “ n ” no sabía por qué y el “2” era el nivel pero el no sabía qué eran los niveles! Corroboraba la experiencia y bueno, dejó la formulita. Así, lo que iban dejando unos, lo tomaban los que venían después y eran cosas que quedaban por explicar y justificar. Y así hasta llegar al átomo de Bohr... Yo les digo : “ ...bueno, después del átomo de Rutherford vino Bohr y dijo: muchachos, vamos a hacerla fácil...cuando el electrón está en este nivel las ecuaciones de Maxwell no funcionan y listo!...” (Franco, 843-849)

En cuanto a las contribuciones de físicos de renombre a la mecánica cuántica, puede observarse que se atribuyen aspectos o problemas a nombres, pero en forma excesivamente simplista y memorística. Así, al pedírseles que atribuyeran las cuestiones enunciadas en los textos seleccionados a científicos cuánticos se identificaron claramente las siguientes asociaciones:

- *Dualidad - De Broglie*: se atribuye a De Broglie todo lo vinculado a comportamiento dual (materia o radiación) e incluso el principio de complementariedad tal vez inducidos por el enunciado que aludía al *comportamiento dual* de los objetos cuánticos.
- *Indeterminación - Heisenberg*: se atribuyen a Heisenberg el principio de incertidumbre y también, discusiones sobre la completitud de la MQ si en el enunciado presentado aparece el término *incerteza*. En otros casos no se reconoce la expresión formal del principio.
- *Función de onda - Schrödinger*: se le atribuye a Schrödinger todo lo que contenga en su expresión la letra Ψ (ecuación de onda, función de onda, condición de normalización, etc.) y se lo considera único autor del formalismo cuántico.
- *Principio de exclusión - Pauli*: se asegura que el principio de exclusión fue enunciado por Pauli pero no se sabe en qué consiste.
- *h - Planck* : se asocia con Planck la radiación de cuerpo negro y toda expresión en dónde aparezca “h” ($E=h\nu$; $\Delta x \cdot \Delta p > h$, etc.).

Algunas concepciones sobre cuestiones consideradas pilares de la física cuántica (Categoría: FORMACION ESPECIFICA)

- *Números cuánticos*:

Nombran a “n” o al “momento angular”, pero ninguno habla de alguna limitación en los posibles valores de estos parámetros a pesar de citar en otra parte de la entrevista la cuantificación del momento angular como uno de los postulados de Bohr. Otro habla de cuatro “propiedades típicas” de los electrones, pero no recuerda cuáles eran.

...E7 (entrevistador): y números cuánticos? Hablaron de números cuánticos en el profesorado?. MARY: la verdad, no me acuerdo..., E7: ¿y en química tampoco?, MARY: Yo di metales...(Mary, 357-363)

.. E5(entrevistador): Y ¿los números cuánticos? ¿recordás alguno? CARLA: Sí, pero no me acuerdo su significado.... teníamos una lista números cuánticos, una tabla, y estaba el significado de cada uno. Pero no me acuerdo. Sé que los dimos, que significaban algo y que al lado de cada uno teníamos algo para diferenciarlos., pero no me acuerdo cuáles eran...[]... Había ecuaciones que te decían los valores que podían tomar y otros que te decían el lugar posible dónde encontrar el electrón o lo que fuera. (Carla, 249,253)

... Bohr tiene un número cuántico en cuanto a los niveles de energía, creo que habla del radio... como un n^2 de R_0 algo por el estilo, ahí están, creo los primeros números cuánticos... Pauli también plantea un número cuántico, pero no me acuerdo (Lucía, 426)

... (el número "n") el nivel de energía. Bueno después tenés el otro que tiene que ver con el spin,, el nivel de rotación del electrón, eh...no quiero decir cosas que realmente eh..., bueno los distintos niveles de energía y a su vez hay otro que indica sus subniveles de energía que pueden encontrarse, este...dentro de cada nivel....(Sandra, 478-480)

no podías tener dos electrones con todos los números cuánticos,...¿cómo se llamaban las famosas cuatro propiedades..? (Franco, 81)

- Las relaciones de incerteza:

Las relaciones de incerteza, usualmente conocidas como principio de incertidumbre, son un tema que resulta familiar y al que se lo relaciona automáticamente con Heisenberg. La mayoría de los entrevistados parecen tener una idea clara y lo enuncian sin dificultad haciendo referencia a las incertezas en la posición y la cantidad de movimiento. Sin embargo no son capaces de dar ejemplos ni de profundizar en su interpretación. Es evidente la presencia de un conocimiento que no ha sido incorporado como herramienta conceptual, es decir que queda situado en un plano puramente memorístico. Desconocen que existe una expresión similar en física clásica (para un paquete de ondas) y se lo considera un postulado de la mecánica cuántica. No se lo relaciona con la función de onda y sólo en un caso se habla de incertezas en la energía y el tiempo.

...El principio de incertidumbre dice que puede estar pasando algo... a ver cómo lo explico...en este momento puede estar pasando algo o puede no estar sucediendo en ese momento...[]... cuando tenés variando h según donde está...no sé. Hace 12 años la vi...no hace mucho la vi también, pero para trabajarla no me acuerdo. Sí, es seguro que la vi. (Carla, 217-221)

... el principio de incertidumbre, [] es imposible encontrar la posición justa del electrón en movimiento en el átomo, digamos que no hay un lugar exacto en dónde encontrar el electrón en el átomo ..[]..(esto es) por el movimiento relativo y también porque...[] cuando uno quiere observar siempre modifica el estado del sistema que está observando... []... el electrón está en movimiento y se desplaza, digamos, **cuando existe una excitación exterior y cambia de orbital, no se puede encontrar el lugar probable.** (Mary, 156, 162,179) (Nota: el profesor no considera que haya incerteza dentro de un mismo nivel)

... se refiere a que cuando quiere medir un sistema atómico eh, no puede medir en la forma clásica... []; es decir que lo tiene que perturbar, al perturbarlo se conoce, con cierta precisión la posición de la partícula, ... logra esa precisión pero pierde precisión en la cantidad de movimiento; o con tiempo y energía, si precisa el tiempo tiene cierta indeterminación en la energía. (Lucía, 82)

... el principio de Heisenberg justamente es la indeterminación, .donde te dice que para una partícula no puede conocerse al mismo tiempo,...donde está la partícula exactamente, y qué cantidad de movimiento lineal tiene, ambos a la vez . Es decir, si se conoce con precisión uno de ellos, eh...el otro no se conoce. Y...hay una expresión matemática que dice que la indeterminación en la posición indicada por la indeterminación en la cantidad de movimiento lineal es igual aproximadamente a la constante de Planck y hay varios experimentos que demuestran que eso es cierto. También está la indeterminación en cuanto al tiempo y la energía y, justamente, la indeterminación de la energía y la indeterminación en el tiempo, su producto es también aproximadamente igual a h que es la constante de Planck y **este principio de indeterminación lleva a que los niveles de energía, los estados estacionarios, no sean perfectamente, digamos de un valor determinado, sino...que hay una banda de incertidumbre en cuanto al valor de esa energía, de este electrón que se encuentra en este estado estacionario** (Sandra, 113-115)

... Heisenberg, el principio de incertidumbre, que decía que si tenés una partícula, o tenés la posición o la cantidad de movimiento, es decir, podíamos decir dónde estaba pero no la cantidad de movimiento, o bien, conocíamos la cantidad de movimiento pero no podíamos decir dónde estaba.(Franco, 68)

- Interpretación probabilística en MQ:

La probabilidad, se define en forma general, como algo relacionado con la probabilidad o el azar y no se vincula la MQ con interpretaciones probabilísticas inherentes a la teoría. El cálculo probabilístico en MQ resuelve temporalmente el problema no poder medir con

precisión magnitudes a escalas microscópicas y con el avance de la tecnología podrá superarse

...interpretación probabilística lo relaciono con algo que no es totalmente cierto, preciso, pero bueno... uno se basa en...estadísticas y...y probabilidades de que ocurra y... ¿y causalidad?, ¿tiene que estar relacionado con cuántica...? (Lucía, 634)

La interpretación probabilística, –digamos muy sencillito- entiendo que...describe la situación espacial de una determinada partícula atómica. Tiene que ver con un cálculo de probabilidad, para determinar en qué lugar se encuentra esa partícula, no indicando específicamente dónde está sino indicando la posibilidad que tiene de estar en tal o cual lugar... (Sandra, 465)

... esto (interpretación probabilística) me suena a cuando en lugar de definir con precisión algo, hablás de probabilidades Decimos que “esto puede ocurrir” o hay una probabilidad de que ocurra o de que no ocurra. O que “esto es muy probable” que esté en esta zona. Surge la idea de asociar ciertas condiciones al hecho de que se produzca o no un fenómeno determinado. O sea, no son fenómenos puntuales, No se da que “si pasa esto entonces pasará esto otro”. Es la idea de que “si pasa esto entonces es posible que pase esto otro”. Teóricamente si tirás una piedra del techo al piso, es imposible que vuelva a subir visto desde la causalidad física. Desde la interpretación probabilística alguna probabilidad puede haber, pero es casi imposible. (Franco, 463-470)

... la cuántica aporta otros resultados que no son estadísticos... si hiciste espectroscopía obtuviste un resultado determinado, obtenés una longitud de onda determinada y no es tan estadístico (Franco, 529-534)

- Función de onda:

Salvo en un único caso los profesores identifican el término función de onda sólo con los fenómenos ondulatorios clásicos. Cuando intentan establecer relaciones con la MQ (a partir de las preguntas del entrevistador), hablan de una asociada en forma memorística pero no pueden establecer un puente entre la imagen que tienen del electrón girando alrededor del núcleo y sus escasos conocimientos sobre fenómenos ondulatorios. Para ellos la función de onda es una función que permite asociar un λ y un v a una partícula. Pero el λ al que se refieren no es intrínseco a la naturaleza de las partículas y tiene que ver con alguna *distancia recorrida* posiblemente la longitud de la trayectoria del electrón en un movimiento periódico, a la vez el período de la onda se vincula con la frecuencia.

Se afirma que es una cuestión de palabras, ya que podría haberse llamado simplemente “onda” en lugar de “función de onda”. Se cita a Schrödinger pero ninguno de los entrevistados pudo escribir una expresión aproximada o dar un ejemplo de aplicación.

... qué quiere decir función de onda, las propiedades que tienen todas las ondas? ¿La función que resuelve la ecuación de la onda? (Mary, 39)

... la función de onda, sería justamente la ecuación donde vos relacionaste la partícula y le asociás un campo de onda... []... ¿Qué información me daría? Y, por ejemplo, en qué lugar de ese átomo probablemente pueda estar el, o los electrones... (Sandra, 449,453)

... E1(entrevistador): me llamó la atención que varias veces mencionaste a Schrödinger y dijiste: “...no sé bien qué es esta ecuación...” FRANCO: Una función de onda pero no me acuerdo bien qué decía, no lo tengo presente. E1: Y al mismo tiempo dijiste: “...al electrón le puedo asociar una función de ondas...” FRANCO: Sí, pero no puedo describir lo que dice. []... la función de ondas es para mí algo asociado a una perturbación que se propaga en el espacio y en el tiempo y a la que le podés agregar una frecuencia y una longitud de onda. E1: ¿Y qué información lleva?, FRANCO: No me acuerdo., E1: ¿y para qué sirve llegar a conocer la función de ondas?, FRANCO: Me sirve para... a ver... la onda tiene propagación espacial y temporal, o sea que es una variable de “x” y de “t”, y dentro de eso aparece la longitud de onda y la frecuencia. La longitud de onda y la frecuencia son parámetros. O sea, cuando describiste un ciclo de la onda tenés una distancia asociada, el período, la longitud de onda, bueno por comodidad en lugar del período se usa la frecuencia. Después... qué decía la ecuación de onda y cómo resolverla... no me quedó, no sé... A lo mejor en lugar de función de onda habría que decirle onda en todo caso (Franco, 678-735)

- Formalismo:

La visión de los profesores respecto al formalismo es el de unos desarrollos matemáticos de difícil comprensión que apenas recuerdan y confunden con otros tópicos con los que han tenido dificultad. En general, si han visto la ecuación de Schrödinger, sólo han llegado a resolver algunos ejemplos típicos como pozo y barrera de potencial, y no han logrado incorporar el formalismo como una herramienta capaz de dar interpretación a los fenómenos cuánticos.

... quería relacionarlo con... si conozco la cantidad de movimiento de una partícula tengo cierta indeterminación en... la posición, pero de alguna manera, si esto se normalizaba, lo-

graba un paquete de ondas que me permitía localizar una partícula en una determinada región... y, evidentemente hay energía y,,, pero no te lo puedo explicar. (Lucía, 150)

... la ecuación del átomo de Schrödinger lo tiene que tener en cuenta (refiriéndose a los orbitales)... []... Es todo un merengue matemático que no descifra aún ... Pero si la cuantización de niveles es un postulado válido, él tiene que trabajar sobre esa parte como válida, o sea que tiene que ser un modelo que lo contemple (Lucía, 414, 418)

... los distintos niveles de energía que puede tener están cuantificados y cada uno tiene, bueno, digamos, tiene una formulita matemática como para determinar cuántos hay, cuántos electrones por ejemplo, puede haber en tal o cuál nivel...(Sandra, 474)

... Sí, me acuerdo que trabajábamos con la ecuación de Schrödinger y...lo dábamos del Tipler, del tercer libro de Tipler...Después trabajamos con potencial, pozo de potencial y otro par de ecuaciones (Carla, 31)

... E5 (entrevistador): Y cuando resolvían por ejemplo, pozo de potencial y llegaban a la solución de la ecuación diferencial, ¿hacían algún tipo de interpretación de esa solución que encontraban matemáticamente o el objetivo del problema era resolver solamente?, CARLA: A veces sí y otras no. Dependía de si se generaba alguna discusión, pero en general a la gente le interesaba más la matemática y entonces la discusión terminaba cuando se llegaba al resultado. Otras veces alguno preguntaba por qué, para qué, esto que quiere decir, pero pocas veces.(Carla, 242-245)

...había ecuaciones que te decían los valores que podían tomar (los números cuánticos)... [], E5: Y la ecuación de Schrödinger, ¿la llegaron a plantear?, CARLA: Sí. No me preguntes cómo era, pero sé que la dimos, E5: Y la solución de esa ecuación, una función llamada función de onda ¿recordás qué información aportaba? CARLA: No, no me acuerdo. Sé que lo dí, y creo que si lo miro y lo leo me acuerdo enseguida. (Carla, 253-261)

E7: Esto, qué sería (ecuación de Schrödinger)? MARY:.la energía... (Mary, 197-199)

Se afirma que la matemática que describe los modelos cuánticos ha sido ‘ultradesarrollada’ y, aunque siempre es posible avanzar, más no es necesario buscar nuevos formalismos para profundizar en la interpretación de estos modelos. Sin embargo se confunde “desarrollo” con “complejidad”.

... el formalismo no es limitado, está ultradesarrollado, de hecho, matemáticamente siempre se puede avanzar más, pero lo que hay es suficiente...[.]..Supongo que más adelante habrá más genios que seguirán profundizando matemáticamente y físicamente esto, sobre-

todo matemáticamente, desarrollando más la matemática matricial y a través del análisis matemático tenés que poder interpretar algunas cosas más (Franco, 501-502, 542-543)

... en mi formación vi muchas ecuaciones matemáticas, resolvía integrales espectaculares, pero no entendía qué pasaba. El efecto Compton era para mí aplicar una ecuación que sacaba una longitud de onda distinta. Ahora me doy cuenta de que en realidad lo que pasaba es que hay una pérdida de energía, disminuye la frecuencia de ese fotón y por lo tanto ganó longitud de onda. En ese momento para mí era una ecuación que decía que λ debía ser más grande que λ_0 , y listo, me daba y estaba contento. (Franco, 111-115)

... E5 (entrevistador): volviendo a algo que hablamos antes: el formalismo. ¿te acordás del tipo de matemática, de las ecuaciones que usaban?, CARLA: ecuaciones diferenciales..., integrales... E5: una matemática parecida a la usada en electromagnetismo?, CARLA: Sí. A veces aparecían ecuaciones que nos parecen matemáticamente sencillas y otras no. (Carla 235-241)

En ningún momento se habla de funciones de onda de amplitud compleja ni de cómo se asocia ese formalismo a los sistemas cuánticos. Tampoco se vincula el formalismo a la interpretación probabilística en MQ

Modelos y conceptos (Categoría: MODELOS)

- El electrón y la localización:

La imagen de electrón “partícula” es muy fuerte y persistente. Suele afirmarse que nadie ha observado un electrón experimentalmente por una cuestión de tamaño del electrón y de la menor longitud de onda de la luz visible. Se considera que el avance de la ciencia y la matemática permitirán en un futuro localizar el electrón. Por otro lado, el problema de la localización si bien es una propiedad de las partículas cuánticas parece estar reservada para el electrón debido a su movimiento.

... E7 (entrevistador): ¿qué entendés vos qué es un electrón?, MARY: Una partícula con carga eléctrica negativa, se encuentra..., girando alrededor del núcleo del átomo..., está en el átomo. (Mary, 443-445)

... dentro del modelo atómico de Bohr hay... determinados estados o niveles de energía donde un electrón está... ubicado, está... **orbitando**... (Lucía, 414)

... el saltito del electrón cuando vuelve a un nivel más abajo, emite un fotón ... (Franco 160)

... de acuerdo al modelo de átomo, por qué un electrón no tiene más que dos posibilidades de rotación sobre su propio eje; eso tampoco la física clásica no lo puede justificar ..[] lo que pasa es que falta la tecnología para determinar si el electrón a su vez está constituido por otras partículas más pequeñas..... (Sandra, 298, 279)

Si bien se afirma haber superado el modelo de electrón bolita girando alrededor del núcleo se recurre a este modelo en forma reiterada. Se afirma que el electrón no puede localizarse, pero que ocupa un lugar en el espacio o está en algún lugar dando vueltas:

... me saqué un poco la idea de que el electrón era una partícula redonda que da vueltas. Ahora es una partícula, que no sé si es redonda o no, pero que está asociada a algún tipo de energía. O sea, si está por ahí dando vueltas es porque hay una energía asociada y una función de onda asociada, y cuando se desplaza de ahí, es porque está relacionada con alguna llegada o salida de energía, según para qué lado se desplace.(Franco, 431-434)

... (el electrón) lo tengo que representar como una esferita por una cuestión de costumbre, pero para mí es una porción de materia que se está moviendo y que **sigue siendo una porción de materia, es decir, hasta ahora lo acepto como una porción de materia, porque vos tocás y...** (golpea la mesa mostrando alguna propiedad de la materia). E1: ¿Y se puede localizar?. FRANCO: No, localizar no, ocupa un lugar en el espacio..[]. Yo sé que está dando vueltas en algún lugar, que si quiere salir de ahí tiene que haber un intercambio energético determinado, ya sea que le des energía y que salga, o que devuelva energía, pero lo acepto como una parte de materia que en alguna parte está dando vueltas.. (Franco, 716-722,743-745)

Orbitales:

En el caso de los orbitales, se repiten los resultados obtenidos por diferentes autores, que advierten sobre concepciones de los orbitales como zonas, espacios físicos, donde es más probable encontrar a los electrones (Solbes et al. 1987 y 1988)

... (orbital) no sabría darle forma. Estamos acostumbrados a ver... modelos planetarios... del átomo... -¡bah!, que representan el átomo, que podemos decir que, bueno, son elipses, circunferencias, pero no, yo diría que no, que no tienen forma, que son una zona donde pueden estar... Pero creo que eh..... hay suborbitales o subniveles...No tengo claro...[], el orbital, es como correctamente se llama la órbita... (Lucía, 398-402)

... (orbital) es la zona donde se encuentra el electrón... [], una franja, como una franja donde el electrón gira alrededor del átomo... , no sería una franja, eh... [], una zona de movilidad, no plana, a nivel, con volumen, (Mary, 449-457)

... (los orbitales) zonas –probables- donde se encuentran los electrones dentro de un átomo.... (Sandra, 445)

(un orbital) sería alguna región del espacio donde existe la posibilidad de encontrar un electrón. (Franco, 474)

Fotones:

Según los profesores la existencia de los fotones fue propuesta por Einstein. Se afirma que son paquetes de energía y se les confiere el comportamiento de las partículas, aunque no se explicita los aspectos distintivos de este comportamiento. Para los profesores el fotón es una partícula sin masa en reposo y al que se le asocia cantidad de movimiento. El efecto Compton es bien conocido y se interpreta que un fotón puede “chocar” con la materia; como con un electrón; y desviarlo. Sin embargo, cuando se cambia el contexto del efecto Compton, no creen que un fotón pueda imprimir cantidad de movimiento a una partícula luego de un choque ya que para ellos el fotón no posee masa. Algunos profesores, apoyándose en lo que han leído en textos de divulgación, afirman que el fotón también puede ser atraído por un agujero negro pero no saben si un campo gravitatorio podría desviarlo. No se atribuye realmente al fotón las propiedades de la materia.

¿Los fotones? Eh...Según...cómo los definió Einstein...: pequeños paquetes de energía, este...sin masa (o por lo menos con masa en reposo o) ...y que conllevan una cierta cantidad cuantizada de energía y que depende de esa energía tenés toda la variación del espectro de la radiación.(Sandra, 417)

... el fotón: partícula eh... que tiene que tiene que moverse a la velocidad de la luz, que no existe como partícula en reposo, y que tiene una determinada cantidad de energía cuantizada... [] ... paquete de energía... [], partícula de masa nula en reposo y por ende se mueve, porque si no, no existe, tiene que tener masa,, y la relacionaría con mc^2 o algo de eso (Lucía, 240,248)

...E4 (entrevistador): Podría darse el caso en que un fotón chocara contra una partícula como un electrón ¿te acordás de alguna experiencia?, LUCIA: Sí. La de Compton., E4: ¿Y que

sea atraído por un campo gravitatorio?, LUCIA: ¿Un fotón? No, yo no recuerdo (Lucía, 250-256)

... (el fotón) una esferita luminosa...pero sé que no es una esfera , pero si no le pongo forma de esfera luminosa...qué hago? Pienso que es una energía que está dando vueltas..., bueno sino sería una ecuación matemática, pero es demasiado abstracto. (Franco, 730)

Dualidad:

El concepto de dualidad está reservado casi exclusivamente a la luz. Se evidencia cierta claridad en la interpretación de la dualidad del fotón el cual se asocia fundamentalmente a la luz. Se afirma que la luz se compone de fotones, y que según las experiencias se comporta como partículas de fotones o como ondas, los fotones, además, pueden interaccionar con la materia (efecto Compton), etc.). (ver ejemplos en la sección anterior, modelo del fotón)

... bueno, Planck plantea, lo que pasa que ellos cuando trabajan en la física cuántica, eh..., digamos, manifiestan que la onda, que la luz se puede transformar, puede actuar como onda o como partícula y bueno..., y en la experimentación que realizan, la luz actúa como un fotón, ellos trabajan la idea del fotón. ... []. No es que trabajan dualidad, ellos responden que la luz se puede trabajar como onda o como partícula. Ellos están más para el lado de las partículas, porque trabajan con el fotón. Esto está bien o está mal lo que digo? (Mary, 245-247)

... E5: ¿Y qué entendés cuando te dicen por ejemplo "dualidad onda-partícula"? ¿qué es eso de "dualidad onda-partícula"? CARLA: Quiere decir que hay un electrón, por ejemplo, que puede comportarse en ciertos momentos como una onda y en otros como una partícula. **Por ejemplo un fotón, la luz, la puedo estudiar desde el punto de vista de onda o lo podés estudiar como un fotón que incide... [], hay algunas cosas que las podés explicar desde los dos puntos de vista y otras que desde uno de los puntos de vista no lo podés explicar....o se comporta de determinada manera y puedo explicarlo...No se me ocurre ahora un ejemplo** (Carla, 207-213)

... la dualidad, digamos cuando nosotros trabajamos, cuando alcanza una gran velocidad una partícula, esa partícula al llegar a la velocidad de la luz, ¿en qué se transforma?, se transforma en energía... muy elemental lo que estoy diciendo...(Mary, 229)

... el fotón tiene asociada una longitud y una frecuencia, y la frecuencia es una propiedad de las ondas. Después el fotón va, choca contra otras cosas y presenta cantidad de movimien-

to, porque va, pega y arranca partículas. O sea tiene frecuencia que es propiedad de las ondas pero choca como si fuera una partícula que tiene cantidad de movimiento (Franco, 452-454)

... (refiriéndose a la luz) aparentemente, por lo que pude interpretar, es que cuando hay algún tipo de intercambio energético con la materia, tenés que pensarla como partícula y cuando no necesariamente hay un intercambio energético, la podés tomar como una onda. [], Por ejemplo en el efecto fotoeléctrico hay intercambio de energía. La energía que trae se la adjudica a un electrón que se moviliza, entonces la tenés que pensar como partícula. En una difracción, pega en un borde, dobla, no hay intercambio de energía y funciona como una onda. (Franco, 566-570)

En cuanto al comportamiento dual de la materia sólo se habla de la dualidad del electrón al que se le asocia una onda y por lo tanto una longitud de onda y una frecuencia (¡pero que no deja de ser partícula en ningún momento!). Se cita a de Broglie pero no está presente la relación entre la longitud de onda asociada a la partícula, la cantidad de movimiento y la constante de Planck.

... de Broglie... introduce la idea de que la materia puede estudiarse como una partícula o como una onda, la tan famosa dualidad entre onda – partícula... [], Y... o sea, que la materia, las partículas subatómicas las podés pensar como un campo de onda, ... Eso fue el aporte que yo recuerdo más... [] podés también pensarla como que tiene una onda asociada – con una determinada frecuencia y una determinada energía, y una determinada cantidad de movimiento lineal, ... [], podríamos decir que solamente sería válido a nivel microscópico, yo creo que siempre podés trabajarlo como partícula o como onda (Sandra, 65-66-71, 100)
... uno en principio planteaba teoría ondulatoria separada de la teoría de partículas, pero hasta lo que aprendí en el curso de hace dos años, no lo podemos hacer más, tenemos que juntar las dos cosas... [], (de Broglie) dijo que partículas y ondas no son cosas contrapuestas (Franco, 445-446, 449)

En otros casos la frecuencia asociada es la vinculada al movimiento de giro del electrón alrededor del núcleo según el modelo de Bohr lo cual se aleja aún más de un modelo dual y confirma el concepto del electrón como la partícula bolita girando, aunque el encuestado afirma que ha superado ese modelo. Se habla con autoridad de la naturaleza

de la materia, pero se está muy lejos de una interpretación en acuerdo a los modelos planteados por la mecánica cuántica.

... el electrón es una partícula, sí, pero gira cumpliendo una cierta longitud de onda, porque pasa cada tiempo por ciertos lugares, tiene una frecuencia o ciertas longitudes de onda asociadas a ese movimiento (Nota: asocia frecuencia del movimiento circular” con frecuencia de las ondas), (Franco, 456)

... E1(entrevistador):¿qué querés decir cuando decís que ves la onda en el caso del electrón moviéndose? FRANCO: A un electrón en una órbita, describiendo una trayectoria, le puedo asociar una longitud de onda determinada, cuando estudiaba a de Broglie, mostraba que en la órbita se le podía asignar una longitud de onda entera... [], de última, el movimiento puede asociarse a un movimiento ondulatorio. (Franco, 662-667)

Difracción de electrones y de luz:

La difracción es un fenómeno propio de las ondas y se asocia exclusivamente a la luz. No se evidencian problemas en interpretar los anillos claros y oscuros del diagrama de difracción como el resultado de ondas que interfieren constructiva o destructivamente debido a una diferencia de caminos recorridos. Es de destacar que a pesar de haber afirmado conocer que la materia, en particular los electrones, presentan comportamiento ondulatorio, los profesores manifiestan sorpresa cuando se los enfrenta a diagramas de difracción de partículas.

... interferencia, pero de luz, bueno, como cualquier radiación, la luz...E4: Y si no es interferencia de luz, ¿de qué puede ser? LUCIA: De ondas electromagnéticas, (Lucía, 116-119)

... estaba pensando que cuando estudié interferencia y difracción lo di por el modelo de onda..., sí. E4: ¿Y en el caso de los electrones? LUCIA: Y, si a los electrones “se les asocia una onda”, los interpretaba de la misma manera...(Lucía, 212-216)

... Difracción es la desviación de la onda al atravesar una abertura muy, muy pequeña. Se desvía la propagación rectilínea de la onda, la propagación rectilínea sería si fuera un rayo, eh...¿qué veríamos? Veríamos zonas de claros y oscuros, digamos el experimento de Young... [], vos ves la superposición de onda y vos el aumento de la longitud de onda y la disminución de la longitud de onda,..., el efecto claro-oscuro de la interferencia, digamos, ves las cosas en el experimento de Young... []. E7: ¿y a qué se le llamará difracción de electrones? ¿o la difracción es algo que asociás sólo a la luz?, MARY: a la luz o las ondas en general. ¿Cómo sería con el electrón..., teóricamente, si el electrón, ...la desviación de su movimiento..., ¿que ven-

dría a ser?, ¿qué marca? el movimiento del electrón, o sea la desviación del movimiento de electrón? (Mary, 469,481)

En el caso de la figura de difracción de partículas (electrones o neutrones), los máximos de interferencia suelen ser interpretados como “amontonamiento” de electrones. Esta imagen se constituye en un obstáculo insalvable que no les permite explicar la presencia de zonas oscuras en el diagrama de difracción.

E5: Y si en lugar de un frente de ondas tengo una fuente de partículas. ..[], luego de cierto tiempo cuento la cantidad de partículas que llegan a cada punto detrás de la abertura podría hacer la siguiente gráfica (el entrevistador dibuja una gaussiana con un máximo central y el profesor acuerda) . Pensemos ahora que puedo disminuir tanto como quiero el tamaño de la abertura. La teoría predice que llega un momento que en lugar de tener la distribución de la figura anterior se tiene la siguiente (el entrevistador dibuja un diagrama de intensidades de difracción). CARLA: Sí, tiene que haber una mayor concentración en el centro. (Nota: no advierte la presencia de los máximos secundarios a pesar de estar viéndolos y sólo destaca que debe haber una mayor concentración de partículas en el centro. Su visión del electrón sigue siendo el de una partícula) (Carla, 335-337)

La imagen de onda asociada al electrón no es suficiente para explicar su comportamiento ondulatorio en la difracción. Se confunde el hecho de que se asocie una onda al comportamiento del electrón con que el mismo electrón sea una onda. Una onda puede aniquilarse en la interferencia destructiva, los fotones pueden anularse ya que son energía, en cambio los electrones tienen masa y la masa no puede desaparecer. Esto introduce una contradicción imposible de salvar.

... (refiriéndose a una figura de difracción de electrones), ¡Ah, ah! Con la luz funciona bárbaro... [], con la luz no tengo problemas en interpretarlo, es una diferencia de caminos y según esa diferencia de caminos podés llegar a interpretar la figura, hay máxima interferencia, interferencia constructiva y destructiva... []. Bueno, voy a tener que adaptarlo a lo que dijimos hace un rato (asociar una onda al electrón). Le asocio algún tipo de frecuencia a la partícula y la puedo interpretar como onda, es decir, es una cuestión de diferencias de caminos y cuando tengo un máximo... []. Tengo que interpretar que las zonas blancas es donde pegan los electrones y las claras donde no pegaron? Asociado a la frecuencia que traía el electrón... pero me está faltando algo en el medio... Hay algo que no me cierra... Yo lo

acepto porque le creo a De Broglie, pero me está faltando algo para entenderlo realmente...

(Franco, 575, 582-587, 608-611)

...yo lo que sé es que hay ciertos fenómenos que...un chorro de partículas atómicas cuando le ponés un obstáculo, responde de la misma manera que una onda; es decir: hay interferencia y hay difracción... [], ...no me doy cuenta de qué puede llegar a depender su comportamiento, (Sandra, 76,85)

...se me hace más complicado interpretar a la partícula como onda... [].La onda (de luz), en este tipo de fenómenos, la interpreto fácil, porque es una longitud, si interfiere con otra que llega en fase me da la parte luminosa y si llega en contrafase me da oscuro. No me cierra a mí mismo cómo interpretar la partícula en contrafase con otra partícula. Eso es lo que no entiendo, pero sé que tiene una longitud asociada y lo acepto, A ver, la partícula, el fotón, que tiene una cantidad de movimiento le asocio una frecuencia, pero cuando quiero llevar a esta partícula que se comporte como una onda..eso es lo que no me cierra... [], ¡Esto último! ¿Cómo interpretar que esa partícula hace interferencia o difracción? ... [], de última, el movimiento (del electrón alrededor del núcleo) puede asociarse a un movimiento ondulatorio, pero con la partícula hacer difracción...no,no. (Franco, 621-626, 660, 667-668).

En el caso de pensar a la luz como chorro de fotones también se presenta una dificultad. Se afirma que no llegan fotones a las zonas oscuras del diagrama de difracción, pero sí llegan ondas compuestas de fotones, que interfieren destructivamente, lo cual plantea una contradicción insalvable.

...E4 (entrevistador): Ahora, en una experiencia de difracción como esta... Acá, ¿llegan fotones? (señala las zonas oscuras de un diagrama de difracción de rayos X). LUCIA: Yo diría que no. E4: Pero antes decías que llegaban ondas que interfieren destructivamente. LUCIA: Uhm. Entonces tienen que llegar fotones... Porque la onda está asociada con un fotón. Lo que pasa es que... no tengo, no encuentro en este momento un modelo que explique que si llegan fotones uno con otro se están anulando. No, no, no tengo la teoría que lo sustente...[] Acá está interactuando con materia (en el efecto fotoeléctrico)..., y acá está pasando (en la difracción)... No, no tiene nada que ver. En realidad yo diría que se puede comportar de las dos formas en las dos situaciones... (Lucía, 270-276, 295)

Se pone en evidencia aquí que la asociación de ondas o funciones de onda a la materia es verbal y no se ha logrado una interpretación acabada del modelo de dualidad.

Postura epistemológica de los profesores (Categoría: EPIST)

Se plantea en general una *imagen de ciencia* en “evolución” que no permite establecer las rupturas epistemológicas que separan la física cuántica de la física clásica.

... yo creo que no es así. No se puede dar por cerrado ningún tema. Es cierto que cuando una da la física de Newton y dice estas cosas ya no van más...pero por qué no seguir buscando en otra parte! Yo creo que todo siempre está abierto.(Carla, 229)

... creería que sí, yo supongo que sí, que la ciencia no es acabada. (Mary, 183)

... yo creo que con el tiempo, de alguna manera se va a poder saber más....(Sandra, 332)

... matemáticamente siempre se puede avanzar más, pero lo que hay es suficiente... [], (refiriéndose a la incertidumbre en la medición) *yo creo que se va a poder profundizar ... []*, *Supongo que algún día se podrá llegar a saber, es parte de una realidad histórica,... []*, *si tanto se avanzó en este siglo, por qué no se va a seguir avanzando!*, *... []*, *mañana puede venir un licenciado en física o un ingeniero o quién sabe quién y les diga que esta interpretación ya no es más así y no hay electrones, no hay fotones, no hay no sé qué otra cosa y que hay que tirar todo los libros y empezar de vuelta, pero por ahora, con esta idea funciona, y mientras funcione...Por ahora lo aceptamos y somos todos creyentes, quién sabe si mañana no cambia todo y si sus hijos nietos se manejan con otras teorías* (Franco 505,538, 749,753, 831-833)

Sólo uno de los entrevistados ha tenido oportunidad de dictar estos temas y en sus clases, al hacerlo, omite y disimula la ruptura en Bohr: “...Bohr postuló estas cosas, pero naturalmente hubo motivos para que dijera eso,...pero no podemos en este curso desarrollar toda la historia...”. (Franco, 154). Este profesor considera que los postulados de Bohr fueron deducidos y afirma que es necesario plantear un corte entre la física clásica y la cuántica debido a que los alumnos no tienen suficiente base matemática, no se refiere a un corte de índole epistemológico. Plantea los avances de la ciencia como producto de la casualidad, de descubrimientos imprevistos, o de resultados inesperados.

... (Planck) descubre una ecuación que ajusta la gráfica de la radiación de la cavidad radiante, él nunca explicó qué era el quantum ni sabía por qué estaba, pero...le apareció un $h\nu$ ahí adentro y dijo: “...bueno, alguien más adelante lo solucionará”, *es más, creo que llegó por error* (Franco, 59-60)

Todos acuerdan que algún día con el avance de la ciencia la teoría cuántica ya no aportará resultados estadísticos y uno de los entrevistados afirma que, en algunos aspectos la física cuántica no siempre aporta resultados estadísticos, ya que en espectroscopía pueden conocerse las longitudes de onda de distintas sustancias con exactitud.

Factibilidad de implementación del tema en el nivel medio, dificultades y conveniencias (Categorías: OPINIÓN y PLANTEO DIDACTICO)

Factibilidad

Los profesores son partidarios de implementar contenidos de FQ en el nivel medio. Consideran que son temas de interés de los alumnos y que completan el panorama de la física. Reconocen que son teorías complicadas pero afirman que el desarrollo evolutivo de los alumnos no debe constituir un impedimento para buscar alternativas de presentación acorde a las circunstancias.

... yo pienso que está bien incluirlo... completa el panorama de la física... Además tenemos un vocabulario cotidianamente y diariamente que no conocemos bien su significado y que tiene que ver mucho con la física moderna... y forma parte de la cultura científica. (Ana, 121)

... yo creo que, bueno, la física clásica la van a poder conocer pero, ... ya tenemos que avanzar, de alguna manera... [], habrá que aprenderlas para poder trabajar en clase, ¿no?... se me ocurre que si uno le puede dar a nivel a lo mejor de física conceptual... o... descriptiva – no sé de qué forma, habría que ver, buscarle la vuelta, que no que te mate la matemática se podría trabajar en los cursos superiores del nivel medio-. (Lucía, 434, 438)

... hay que buscarle la vuelta para acomodarlo, Que es una teoría complicada, evidentemente que es una teoría complicada... [] pero se me ocurre que no es una justificación para no trabajarlo en el polimodal. (Lucía, 537)

... a mí me parece que también los puede llegar a motivar o a enganchar esos temas que por allí alguna vez leyeron, escucharon, entonces, bueno, pueden entrar a conocer ciertos textos de eso, ¿no?... Yo creo que eso los puede enganchar... (Lucía, 430)

... pienso que se puede introducir la idea de la física cuántica, sin haber desarrollado la física clásica, de hecho lo están haciendo. (Sandra, 367)

... el desarrollo evolutivo de los alumnos no lo hace posible... [], al alumno no le interesa... este tampoco estoy de acuerdo. (Ana, 172-173)

...yo pienso que sí, que los chicos lo pueden llegar a entender. Lo que pasa es que si me toca darlo a mí me tengo que poner a estudiar desde cero. Para mí incide muchísimo la preparación del docente en si podés o no llegar a dar un tema. (Mary, 383-384)

Impedimentos y formación

Se afirma que los programas son extensos, que la falta de tiempo impide incorporar nuevos temas y que no pueden implementarse trabajos experimentales, pero en el fondo, estas afirmaciones esconden los temores del profesor ante la falta de formación en estos temas y la carencia de herramientas apropiadas para bajarlos al nivel de los alumnos. El mayor impedimento está en la propia formación.

...los programas son extensos, no hay la cantidad de horas para poder desarrollarlos. Es muy distinto si vos empezás desde noveno o séptimo, a trabajar alguna idea de la física, que empezar en 3ro, con dos horas semanales... [] es prácticamente imposible implementar prácticas de laboratorios de estos temas... (Mary, 414, 441)

...una dificultad es el tiempo. Es decir... la mayoría de los profesores tiene más de 30 horas... Y bueno... para 30 horas tienen que tener 7 cursos – como para hacer un promedio- ...y diferentes materias... y diferentes escuelas y bueno... creo que el tiempo es una cuestión importante también. (Lucía 601)

... son (teorías) complicadas, ... [], nos cuesta a nosotros estudiarlo, me imagino que a los chicos también... [] (porque) no tenemos una formación adecuada...[] entonces; lo que no conocemos bien, en profundidad, de alguna manera es tabú para nosotros, pero no porque sea, tan complicado (Sandra, 359-361)

... programas muy extensos, tampoco; me parece que no es tan importante; pero para mí lo más importante es la falta de formación de parte del docente, entonces, sobre lo que no conocemos en profundidad uno no quiere enseñar... (Sandra, 368-369)

...yo no me siento con la formación adecuada" para desarrollar este tema... (Mary, 415)

... a nosotros, nos daban solamente los contenidos... [] a lo mejor a un investigador alcanza con los contenidos pero al docente no. Como docente te tienen que dar primero cómo puedo llegar a los chicos y después sí lo demás. Yo creo que el docente tiene que tener un poco más de conocimiento ... [] también el cómo, desde dónde, ¿puedo darlo?, ¿por qué puedo darlo?...y la ecuación también. Yo sé que si voy a casa y abro el libro, sí, me acuerdo, pero eso no me ayuda con un chico de 12 años. (Carla, 366)

Es interesante destacar la opinión de Ana, quien se desempeña también como profesor de profesorado y conoce la realidad de la formación docente a nivel superior.

... la formación docente, no está siendo bien encarada. Vamos a separar la formación del profesor de media y la formación del profesor de primaria. En la formación del profesor de nivel medio se pone mucho acento en las asignaturas de la orientación, en la disciplina específica,...y las didácticas corren paralelas, no integradas... [], hacen todas las “pedagógicas” :”fundamentos de la educación” en primer año, que lo dicta un profesor de ciencias de la educación y que no tiene la más mínima idea de la disciplina o de las asignaturas específicas. ..[], Puede estar muy lindo presentada en apariencia la clase (planificación) y ser muy innovadora en apariencia, pero si el profesor (del profesorado) no tiene el contenido específico ¿cómo puede reconocer si lo que está haciendo el alumno está bien o está mal?...[], por un lado corre el planeamiento y por otro corren los contenidos (Ana, 61-63, 68, 70)

...esto sí es importante...Los profesores no tienen una formación adecuada. Por lo menos para encarar estos temas o cómo encararlos. (Ana, 166)

Planteo didáctico

Los profesores son partidarios de un planteo didáctico basado en la historia del desarrollo de la mecánica cuántica. Resaltan la importancia de discutir los conceptos por sobre el desarrollo matemático y afirman que si bien son necesarios los conocimientos de física clásica, no debe esperarse a completar su desarrollo para discutir temas de física cuántica.

... es bueno ubicar a los alumnos en la época. A mí me cuesta mucho ubicarme...pero si uno poco a poco lo va incorporando...por lo menos la época, la secuencia histórica...sería tal vez más fácil para poder entender por qué un concepto evolucionó de determinada manera, no? (Carla 118)

...Creo que si bien la matemática, es una ayuda importantísima de la física, uno tiene que aprender a emplear conceptos, y bueno que la matemática sea una herramienta. (Lucía, 583)

... es una materia conceptual se da desde un punto de vista físico histórico... [], se les puede explicar cosas sin entrar en demasiado formalismo físico matemático y dejar algunos conceptos claros...[] . (Franco, 138, 362)

... yo pienso que hay que desarrollar antes los contenidos de FC que los de FQ. No es necesario ampliamente, sólo lo necesario. (Ana, 165)

... creo que no es necesario desarrollar ampliamente los contenidos de física clásica, obviamente se necesitan algunos conceptos, pero no ampliamente. (Franco, 315-316)

Destacan la conveniencia de comenzar tempranamente el dictado de estos temas, pero teniendo el nivel de razonamiento concreto de los alumnos a temprana edad y la necesidad de brindarles imágenes y representaciones que les permitan construir los conceptos, pero sin incurrir en deformaciones.

... muchos temas de mecánica, estamos hablando de chicos de 12 o 13 años, se manejan en términos de los que ven, lo que tocan, o lo que se imaginan. Cuando tenemos que poner las cosas en términos de imagínense o qué es lo que pasa con algo que no ven, entonces tenemos que pensar muy bien la forma de presentárselos o decírselo... [], A lo mejor chicos que empiecen desde chiquitos, charlando de otra manera, cuando lleguen al 7mo, 8vo. o 9no. año tienen otra formación, pero... [] para cambiar esto las maestras tienen que estar muy bien preparadas (Carla, 305)

... si empezamos desde primer año con la estructura atómica de la materia,... y vamos avanzando ... [] sobre la base del desarrollo de una estructura atómico molecular, llegar a las discusiones superiores sobre la naturaleza de la materia y a las discusiones actuales, parecería que se cerraría el ciclo...; Eso me parecería fantástico! Por eso digo llevarlo al final, pero empezar desde el principio. (Ana, 139)

... creo que se puede plantear en forma sencilla sin deformarla,... porque hay veces que por bajar el nivel se cae en deformaciones,... (Ana, 153)

Todos acuerdan que son temas que interesan a los alumnos y que la capacidad de aprendizaje de estas generaciones supera a la de los profesores.

... el bombardeo de información que les llega a los chicos es infinitamente mayor que el que me llegaba a mí... [], Los pibes, hoy en día, captan cosas que vos les podés explicar más o menos con lo que hablamos acá. (Franco, 352,358)

... existe una evolución, digamos que podríamos llamarle natural, que se las facilita el medio, y una en paralelo en la escuela. La escuela, a esta altura, está a pasos atrás de la realidad del chico. Es como que en la escuela estamos en blanco y negro y los pibes están en la TV color (Franco, 359-361)

...bien planteados, yo creo que son temas que les tienen que gustar. Ahora, hasta dónde llegar,...no te podría decir hasta qué nivel de profundización...Yo empezaría preguntando a qué llamamos FM, cuáles son sus límites...(Ana, 133-134)

6.3 Discusión final de los resultados y aportes para el diseño de una propuesta didáctica

Los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los instrumentos de análisis son totalmente convergentes. Como primera aproximación podemos afirmar que las respuestas vertidas en encuestas, textos y entrevistas son consecuencia de una formación muy limitada donde los avances parciales no logran el nivel necesario requerido para una comprensión de calidad. Los recuerdos de los profesores respecto de los temas desarrollados durante su formación en el profesorado resultaron ser vagos e imprecisos y la mayoría se limitó a citar cuestiones memorísticas sin dar detalles de los contenidos específicos. Las respuestas reflejaron un buen conocimiento “informativo” de los tópicos desarrollados en la etapa anterior a Bohr, pero en adelante se introducen nombres y cuestiones fragmentadas e inconexas.

Un análisis más minucioso sugiere la presencia de visiones *reduccionistas*, donde los *conceptos cuánticos aparecen* asociados, y no del todo diferenciados, con ideas clásicas, obviamente mejor conocidas por los profesores. Si bien esto puede ser algo esperado, debemos puntualizar, que la recurrencia reiterada a esta tendencia está señalando claras limitaciones conceptuales, y que la formación de los docentes no ha avanzado lo suficiente como para superar estas tentativas “naturales” de reducir los objetos cuánticos a los modelos o imágenes clásicas. La permanencia de imágenes de ondas o partículas, levemente modificadas, en las explicaciones del comportamiento de los fenómenos cuánticos, señala la sobrevivencia de la física clásica, e incluso de las visiones coloquiales o de sentido común de la realidad (“clásica”). En consecuencia, esto sugiere que la adquisición de conocimientos de física cuántica, debiera concebirse como un obstáculo a superar, más que como una mera acumulación de conocimientos (Fernández, 1997). A

partir del análisis de los resultados de esta serie de instrumentos detectamos la presencia de al menos tres reduccionismos conceptuales a superar:

- *reduccionismo primeros conflictos* → *visiones históricas lineales*: los experimentos conflictivos que dieron origen a las primeras discusiones de la mecánica cuántica y la participación de los científicos en los desarrollos sólo son reconocidos como parte de un enfoque histórico en el que no siempre se explicitan cuestiones diferenciadoras de la mecánica cuántica).
- *reduccionismo objeto cuántico* → *ondas “o” partículas*: Se mantienen dos modelos independientes, uno para la luz (que puede comportarse como partícula, el fotón) y otro para la materia (limitado al electrón, al que puede asociársele una onda cuando gira alrededor del núcleo). En esta visión, luz y materia no pueden dejar de ser, o bien ondas o bien partículas y, cualquier interpretación dual es una simple asociación o representa una analogía. Por otro lado, el término dualidad se limita casi exclusivamente a la luz, a la que puede asociársele ciertos cuantos de intercambio (los fotones), que no poseen realmente las propiedades de las partículas ya que no tienen masa. Así, el fotón “se comporta” como partícula en el efecto Compton y por eso se le asocia una cantidad de movimiento, pero no puede mover otra partícula luego de un choque, ni ser atraído por un campo gravitatorio, ya que no posee masa (*reduccionismo objeto cuántico* → *ondas de fotones sin masa*). En el caso de los electrones, se aceptaría en forma dogmática que *llevan una onda asociada* pues *así lo estableció de Broglie*, pero la frecuencia de esa onda estaría más bien relacionada con el movimiento del electrón ligado al átomo que a una propiedad intrínseca a su naturaleza de objeto cuántico. Por otro lado, la idea de un electrón *difuminado*, sin una ubicación espacial definida, resulta inadmisible ya que el electrón *por poseer masa está localizado* aunque no se disponga por el momento de esa información. Ésta es una de las razones por la que estos docentes no pueden utilizar este concepto en la explicación de los fenómenos de interferencia (*reduccionismo objeto cuántico* → *partículas (masa) de localización incierta*). Se pone en evidencia aquí que la asociación de ondas o funciones de onda a la materia es verbal y no se ha logrado una interpretación

adecuada del concepto de dualidad. El concepto de masa, asume un rol insoslayable en asociaciones del tipo *onda- fotón-energía-no masa*, y *electrón-partícula-masa-localización* que podría ser uno de los obstáculos más difíciles de erradicar. En síntesis, este estudio acuerda muy bien con las formulaciones de diversos autores que proponen referirse a los nuevos objetos cuánticos como algo enteramente diferentes a ondas o partículas; ondículas o quantones (Levy Leblond y Balibar, 1990).

- *reduccionismo descripción probabilística* → *descripciones exactas*: las relaciones de incerteza, más comúnmente llamadas “principio de incertidumbre” son un tema que resulta familiar y al que se lo relaciona automáticamente con Heisenberg. Se las entiende básicamente como una incerteza o desconocimiento de la posición y alguna otra magnitud (que algunos docentes logran identificar con el momento). En esta descripción la constante de Plank no juega ningún rol y dichos problemas de incerteza serían tal vez superables con los avances tecnológicos. Tampoco se vincula esta relaciones con el modelo ondulatorio, particularmente con la descripción formal de un paquete de onda clásico, donde se presentan expresiones muy similares. Por su lado, las interpretaciones probabilísticas, aparecen en cuántica como una manera de superar esta falta de información sobre la posición. Esta visión probabilista deventría entonces, más bien de problemas de medición que de una visión enteramente cuántica.

- *reduccionismo formalismo* → *resolución mecánica o ejercitación*: el manejo del formalismo, cuando aparece, se limita a la cuantización del momento angular, la expresión de los niveles de energía de Bohr y la ecuación de Schrödinger (que no se distingue de la ecuación de las ondas clásica). No se advierte el carácter complejo de las funciones de onda y en los pocos casos en que se han visto ejemplos de aplicación (pozo o barrera de potencial), éstos son vistos como simples ejercicios que no guardan relación con problemas físicos concretos. Se reproducen también los resultados ya conocidos (Solbes, 1987) respecto de significar los orbitales como órbitas o regiones donde pueden colocarse los electrones. Es decir, el formalismo no es pensado como

una herramienta capaz de dar interpretaciones de los fenómenos cuánticos sino una mera herramienta de resolución de ejercicios.

Finalmente, podríamos agregar que, en general, los profesores no son conscientes de la presencia de estas visiones semiclásicas en sus interpretaciones de los fenómenos cuánticos. Es razonable pensar, por lo tanto, que no vincularán sus esfuerzos de capacitación con la necesidad de superar estas limitaciones. Más aún, es de suponer que, ello no sucederá hasta tanto no se implementen alternativas didácticas que expliciten claramente estos objetivos. Entendemos, además, que el abandono de estas visiones reduccionistas exige de los profesores, transitar una serie de rupturas conceptuales, metodológicas y epistemológicas, que no son simples ni evidentes.

En adelante, nuestro estudio continúa hacia el diseño una alternativa didáctica que permita superar los reduccionismos encontrados.

PARTE III

Segunda etapa de la investigación:

Presentación de la propuesta didáctica y análisis de la evolución del pensamiento del profesor en temas de FQ

Capítulo 7: Presentación de la propuesta e instrumento didáctico

Capítulo 8: Resultados de la intervención didáctica y análisis de la evolución del pensamiento de los profesores

Capítulo 7

Presentación de la propuesta

Instrumento didáctico

CAPÍTULO 7: La propuesta didáctica

7.1 Introducción

La propuesta didáctica que presentamos, intenta resolver los problemas de formación descritos en capítulos anteriores. No pretendemos dar solución a todos los conflictos que plantea el aprendizaje de la física cuántica sino apenas proponer una alternativa didáctica de presentación que favorezca la superación de las dificultades que constituyen los principales obstáculos para el logro de un aprendizaje significativo.

Podemos afirmar que estos obstáculos están vinculados a la superación de concepciones fuertemente arraigadas sobre la ciencia y su desarrollo, el rol de los modelos, los alcances y límites de los mismos y cuestiones específicas de la disciplina. Así, en nuestra investigación identificamos varios reduccionismos presentes en las interpretaciones de los profesores que deberían tenerse en cuenta en el diseño de una propuesta didáctica:

- *reduccionismo primeros conflictos* → *visiones históricas lineales*
- *reduccionismo objeto cuántico* → *ondas “o” partículas*
- *reduccionismo descripción probabilística* → *descripciones exactas*
- *reduccionismo formalismo* → *resolución mecánica o ejercitación*

Entendemos que es fundamental discutir la diferenciación de los modelos de onda y partícula clásicos y la interpretación de la teoría cuántica a la luz de estos modelos, como punto de partida e hilo conductor de nuestra propuesta didáctica. Nos centraremos, entonces, en la superación de los dos primeros reduccionismos, particularmente en el segundo, y si bien se avanzará sobre el tercero y cuarto dejaremos para cursos posteriores un tratamiento más profundo.

La propuesta que se describe más adelante, fue implementada en un curso de formación en el que participaron 12 docentes de nivel medio del Instituto Politécnico Superior Gral.

San Martín. Se organizaron encuentros semanales durante 5 meses. Debo aclarar que el cursado no fue continuo, ya que hubo varias interrupciones debido al receso vacacional de invierno y reiterados paros ocurridos ese año en el nivel medio. Si bien el curso estaba programado para cuatro meses, se acordó con los profesores una extensión para terminar de desarrollar las unidades programadas.

El curso se tituló *Conceptos y modelos en la interpretación de la mecánica cuántica* el cual refleja el hilo conductor adoptado.

7.2 Marco conceptual general de la propuesta

Adoptamos como marco teórico referencial la teoría de aprendizaje en ciencias a partir de la construcción de modelos. Las actividades se plantean de manera que los alumnos avancen en la construcción de los modelos explicativos de los fenómenos analizados. Se insiste además en la noción de modelo como una aproximación a la realidad, incompleto y en continua evolución, creado con un propósito específico y en un contexto específico (Gilbert et.al, 2000), con alcance limitado y circunstancial.

Entendemos que la construcción de modelos no es una etapa auxiliar sino un aspecto fundamental del proceso de desarrollo de la ciencia. Los modelos permiten establecer un tejido de conceptos y proposiciones interrelacionadas que describen explican y prevén fenómenos (del Re, 2000). Desde esta visión, la comprensión de una teoría científica se logrará desarrollando las capacidades de los alumnos para construir conceptualmente modelos que incluyan las relaciones fundamentales de la teoría y que a la vez permitan extraer explicaciones y predicciones que acuerden con las concepciones científicamente compartidas. (Justi, 2006).

Según los estándares de la U.S. National Science Education (National Research Council, 1996), “Los modelos son esquemas o estructuras provisionales que se corresponden con objetos reales, situaciones, o tipo de situaciones, con un poder explicador. Los modelos ayudan los científicos e ingenieros a entender como funcionan las cosas”. Por otro lado,

es sabido que los expertos son capaces de emplear diferentes modelos simultáneamente, reconociendo las virtudes y limitaciones de cada uno y aplicándolos adecuadamente (Ireson, 2000; Brookes y Etkina, 2007; Grosslight et al., 1991. Sin embargo, frecuentemente los libros de texto presentan aproximaciones a los modelos como descripciones reales y correctas, ignorando que todo modelo tiene sus limitaciones y que sólo es útil si se es consciente de ellas (Silvestre et al. 2010).

En este contexto, el docente asume el rol de facilitador del proceso de construcción del conocimiento. El objetivo es que los alumnos logren apreciar la dinámica del desarrollo y evolución de diferentes modelos científicos y estén en condiciones de confrontarlos, evitando un aprendizaje de corte puramente anecdótico y secuencial.

Asumimos, además, que para conseguir una transformación significativa del pensamiento del profesor, debemos relacionar los nuevos conocimientos del alumno con los conocimientos que posee antes del inicio del proceso de enseñanza-aprendizaje. Como expresamos en capítulos anteriores (cap 2 marco teórico), ha sido ampliamente demostrado que estos conocimientos no son representaciones aisladas sino que se estructuran en la mente del profesor/estudiante como verdaderas teorías implícitas que ofrecen credibilidad y efectividad a la hora de explicar muchos fenómenos.

Lograr un cambio en estas teorías personales no es tarea fácil y requiere un verdadero cambio conceptual, en algunos casos este cambio conceptual simplemente requerirá la adaptación del marco previo a los modelos aceptados por la comunidad científica y en otros, la sustitución total de las concepciones previas por un nuevo modelo más convincentemente. Sea cual fuere la situación, es el profesor quien deberá crear las condiciones necesarias en el aula para que el alumno experimente insatisfacción con las ideas previas y consecuentemente la necesidad de construir un nuevo marco explicativo, para finalmente lograr la internalización de nuevas ideas inteligibles y más fructíferas (Posner et al, 1982).

No debemos olvidar tampoco que las dificultades de los estudiantes no pueden reducirse sólo a deficiencias conceptuales debidas a la existencia de concepciones alternativas

sino que también tienen dificultades de aprendizaje en otras dimensiones como la metodológica, centrada en las estrategias de razonamiento; la procedimental; la epistemológica; actitudinal y la propiamente afectiva que impregna el clima de aula (Solbes, 2009)

Teniendo en cuenta las contribuciones de la investigación educativa respecto al conocimiento profesional del profesorado (Gil 1991b; Abell, 2007; Furió y Carnicer 2002; Solbes et al., 2012 y 2013), entendemos que la formación del profesor no se restringe a la formación en contenidos disciplinares sino que no pueden faltar las discusiones sobre cuál sería mejor forma de organizar estos contenidos para llevarlos al aula, qué dificultades conceptuales conllevan, cual sería una secuenciación posible, qué alcance y profundización debe alcanzarse, qué pautas se pueden elaborar para un diseño instruccional, etc, (CDC, Shulman, 1989; Gess-Newsson y Lederman, 2003; Michelini et al., 2013)

Atendiendo al modelo de aprendizaje que planteamos, la alternativa didáctica que proponemos parte de la caracterización del pensamiento del profesor, las creencias sobre la ciencia y su rol en desarrollo humano, sus visiones en relación a conceptos clave de la física cuántica, y avanza hacia la construcción de esquemas conceptuales basados en la noción de modelos de la física cuántica interpretados como recortes diferentes de un único mundo natural que, según el caso, puede ser clásico o cuántico. Además, apunta no sólo a la profundización en contenidos, sino a generar los cambios epistemológicos y ontológicos que permitan una mejor comprensión de la FQ. En este sentido, en primer término distinguiremos los modelos de onda de los de partícula en la física clásica y analizaremos los aportes de cada uno de ellos a la construcción conceptual de un nuevo objeto de la física cuántica. Vincularemos a la vez la aparición de diferentes modelos al contexto histórico en que fueron propuestos y discutiremos la mayor potencialidad explicativa respecto a modelos anteriores. Se plantearán los principales conceptos de la física cuántica, partiendo de la discusión de los modelos propuestos por los profesores, las limitaciones que presentan, la propuesta de modelos de mayor alcance, y se avanzará hacia la formalización de la teoría presentando los principales problemas que el modelo puede resolver. El objetivo es, a partir del desarrollo del curso, involucrar a los docentes en la problemática de la comprensión de los modelos de la física cuántica, valorar las dificultades de los alumnos a partir de la explicitación de las propias dificultades, generar actitudes positivas hacia la enseñanza de estos temas en el nivel medio y superar un

modelo de enseñanza transmisiva limitado a los contenidos disciplinares. Las actividades se diseñaron para garantizar la participación activa de los profesores en la construcción de su propio conocimiento y para brindar múltiples oportunidades de examinar la propia formación y los procesos de aprendizaje a partir de procesos metacognitivos. En cada actividad, además, los profesores discutieron la factibilidad de llevar los temas tratados al aula y en las exposiciones que constituyeron la evaluación final del curso, se valoró el alcance posible de posibles presentaciones de los temas en el nivel medio.

Los múltiples aspectos involucrados en un proceso de formación docente y que fueron expuestos en el capítulo 1, son valorados y fueron tenidos en cuenta en desarrollo de curso a fin de brindar a los profesores algunas herramientas didácticas para el ejercicio de su profesión. En este trabajo, analizaremos sólo uno de esos aspectos, el pensamiento del profesor, buscando identificar los temas de mayor dificultad, los avances conceptuales y puntos de difícil remoción, e intentaremos dar una interpretación a la luz de los aportes de la investigación educativa actual.

7.3 Metodología

A lo largo del curso presentaremos situaciones anómalas que no puedan ser resueltas en base al conocimiento inicial de los profesores. La metodología utilizada es simple y recurre a múltiples recursos: lectura de material diverso, simulaciones, experiencias de laboratorio y experimentos simulados, clases expositivas de síntesis, discusiones grupales, resolución de problemas, videos educativos. A la vez, el material se propone generar en los docentes actitudes de curiosidad por indagar las causas de fenómenos alejados de su realidad o que contradicen sus expectativas. Debe tenerse en cuenta, por otro lado, que es importante no caer en reiteradas explicitaciones de ideas erróneas ya que esto a la larga podría redundar en cansancio y frustración, o en actitudes de baja estima en los mismos docentes al ver que sus ideas son frecuentemente equivocadas.

Las actividades se organizaron en doce encuentros iniciales a los que se agregaron algunas sesiones de exposición de temas por parte de los profesores/alumnos y que constituyeron la evaluación del curso.

En todo momento, se dejó en claro a los asistentes, que nuestro propósito era realizar una tarea en conjunto que fuera verdaderamente útil y evitar un curso meramente transmisor y formalista. Con este fin, el curso se iba a organizar en torno a actividades que permitirían potenciar la interacción entre el docente a cargo y los docentes asistentes. Se negociaron también otras cuestiones referidas al cursado como la extensión del temario, nivel de profundización, horarios y disponibilidad para trabajos extras.

Si bien en el ordenamiento sugerido de temas se dejó para el final el tratamiento de los modelos atómicos anteriores a Bohr incluido, se hizo alusión a ellos en forma transversal durante el cursado, el propósito fue evitar sentar el avance del curso sobre modelos planetarios, que ya ha sido demostrado son muy difíciles de erradicar.

El temario del curso resumidamente fue el siguiente:

Programa del curso: Conceptos y modelos en la interpretación de la mecánica cuántica.

Módulo 1: Presentación del curso y relevamiento de expectativas y concepciones y iniciales

Módulo 2: *La evolución de los modelos de la ciencia. El caso de los modelos para la luz*

Algo de historia sobre los modelos para la luz. El modelo corpuscular de Newton. El modelo ondulatorio. Alcances y limitaciones de cada modelo. Ruptura con la noción de ondas clásica: el efecto fotoeléctrico. Los cuantos de luz, los fotones. La ecuación $E=h \cdot \nu$. Actividades, problemas, ejercicios, análisis de gráficas.

Módulo 3: Partículas y ondas, dos modelos de la física clásicos

Necesidad de revisar los modelos clásicos de partícula y onda.

¿Cuándo hablamos de partículas? Características del modelo de partícula: las magnitudes relevantes para su descripción, las principales ecuaciones que rigen su comportamiento y las consecuencias que se derivan de este modelo (localización de la posición, valores ciertos para la energía y el momento, entre otras). Ejemplos: las partículas conocidas, los modelos de partícula para el átomo, el electrón (momento cinético, momento dipolar magnético, relación entre ellos).

¿Cuándo hablamos de ondas? Fenómenos que caracterizan los fenómenos ondulatorios. Difracción e interferencia. Condiciones necesarias para la observación de fenómenos de interferencia y difracción. Relaciones entre las longitudes de las ondas y el tamaño de las aberturas. Ejemplos. Las ondas armónicas y sus características: frecuencia ; período; no localización, etc. Superposición de ondas. Los pulsos y la delimitación en el

espacio y el tiempo. Relaciones de dispersión e indeterminación. Momento de una onda, energía y densidad de energía. Ejemplos. Experiencias.

Interacción de la radiación y la materia: el efecto Compton.

Módulo 4: El nuevo objeto cuántico

Análisis de algunos experimentos conflictivos. Difracción e interferencia de partículas. La interpretación de la difracción e interferencia de luz desde el modelo de fotones. Amplitud de probabilidad. Concepto de superposición de estados.

Un nuevo modelo para la partícula libre y el fotón. Asociación velocidad de grupo a la velocidad de la partícula. Consecuencias que se derivan de aplicar un modelo ondulatorio a las partículas. Relación de De Broglie. Relaciones de incerteza para las partículas (Heisenberg). Limitación en la posibilidad de conocer simultáneamente y con certeza posición y momento de la partícula. Ejemplos.

Las observaciones macroscópicas del carácter ondulatorio de la materia y el carácter discreto de la radiación. Ordenes de magnitud de las constantes fundamentales.

El problema de los espectros. Cuantificación de las frecuencias observadas. Series de Lyman y Balmer. La cuantificación de la energía y las ondas estacionarias. La ecuación $\Delta E = h \cdot \nu$ y sus características. La ecuación de Schrödinger para ondas estacionarias. Características de la función de onda. Consecuencias sobre el modelo de partícula. Los orbitales. Interpretación probabilística y superposición de estados. Resolución de casos sencillos. El átomo de hidrógeno. Efecto túnel. Los números cuánticos.

Los átomos multieléctronicos. La tabla periódica de elementos. Ejemplos. Aplicaciones.

Módulo 5: Otras cuestiones alrededor de la Mecánica cuántica

El problema de la implementación didáctica. Investigaciones sobre la concepción de los alumnos respecto a la estructura de la materia. Investigaciones sobre concepciones respecto a la interpretación del modelo dual. Experiencias en otros países.

Módulo 6: Algo de historia: Aportes de la física precuántica

La interpretación de Copenhague en el contexto histórico. Interpretaciones posteriores de la mecánica cuántica. Estado actual de la problemática. Discusiones.

Contexto histórico. Modelos anteriores del átomo. El descubrimiento del electrón. Modelo de Thomson. El descubrimiento del átomo nuclear (modelo de Rutherford). El modelo de Bohr. Descripción. Aportes, alcances y limitaciones de cada modelo. Los postulados de Bohr. Las ondas de De Broglie.

Los asistentes fueron 12 alumnos todos profesores de asignaturas de física del Instituto Politécnico dependiente de la Universidad Nacional de Rosario. Dos de los asistentes tienen título de grado (ingenieros) y el resto tienen formación terciaria (profesores de Matemática, Astronomía y Física). Sólo uno de los profesores tiene menos de 2 años de antigüedad en su práctica docente. La formación en temas de física cuántica, tanto de los profesores como de los ingenieros, es similar y puede caracterizarse en el nivel de texto de Alonso Finn, tomo III. Tres de los profesores, han realizado cursos de perfeccionamiento que incluían temas de física cuántica (Circuito E, Programa FOMEC)

En el Módulo 1 se realiza la presentación del curso y se aplicó una encuesta para caracterizar las representaciones iniciales de los profesores en algunos temas considerados pilares de la FQ y en los que según la investigación realizada hasta el momento los profesores evidencian especial dificultad.

En el Módulo 2, a partir de la evolución de los modelos para la luz, se discute el carácter provisorio de los modelos de la ciencia, se explicitan las propiedades de ondas y partículas y se observa la incompatibilidad entre estos modelos desde el punto de vista clásico, sin profundizar en el formalismo. Luego, a partir de una simulación del efecto fotoeléctrico, se cuestiona la interpretación puramente ondulatoria de la radiación y se trabaja en la construcción de un modelo que incorpore características del comportamiento corpuscular para explicar las observaciones. Se discutió finalmente cómo esto significa traspasar los límites de la interpretación ondulatoria clásica de la radiación y se establecen puentes entre ambos modelos.

En el Módulo 3 se formalizan las características de los modelos clásicos de partícula y de onda y se discuten los aspectos de estos modelos que aportarán a la descripción de un modelo dual para la materia.

En el Módulo 4 se construye un modelo para los objetos cuánticos que conjuga propiedades de ondas y partículas. Se interpretan las consecuencias que se derivan de extrapolar a las partículas aspectos propios de la teoría ondulatoria: longitud y frecuencia asociada (de Broglie), limitaciones en la determinación de posición y cantidad de movimiento (relaciones de incerteza de Heisenberg), comportamiento probabilístico (relación entre probabilidad y función de onda), analogía con las ondas estacionarias de partículas confinadas (cuantificación de la energía y estados prohibidos). Se discute el problema de los espectros atómicos y su relación con el modelo de Bohr y se presenta el número cuántico principal. Se construye una ecuación para la función de onda asociada al nuevo objeto cuántico: *la ecuación de Schroedinger*. Finalmente, se definen los números cuánticos, se establece el principio de exclusión de Pauli para átomos multielectrónicos, se observan los valores de energía de las capas superiores, se discute *superposición de*

capas, y se analiza la conformación de la tabla periódica. Se discute también la conformación de los sólidos y los grados de libertad que se agregan al considerar vibraciones y rotaciones internas en las moléculas.

Los Módulos 5 y 6 constituyeron parte de la evaluación del curso estuvieron a cargo de los mismos asistentes. Los profesores debían preparar una monografía o una presentación para sus compañeros, destacando los aspectos que consideraran de especial interés. Entre los temas del Módulo 5 se incluyó el relevamiento de propuestas didácticas publicadas en revistas reconocidas. A partir del material presentado por los profesores que eligieron estos temas, se estableció una discusión a través de la cual los asistentes elaboraron críticas personales y analizaron aspectos factibles de ser implementados en sus aulas. Los temas desarrollados a través del Módulo 6 estaban relacionados con el contexto histórico del desarrollo de la física cuántica: los aportes de la física precuántica, la evolución de los modelos de la estructura de la materia desde la antigüedad, la interpretación de Copenhague, discusiones filosóficas, etc. Todos los temas de las monografías fueron expuestos de forma tal de generar una discusión del tema que motivara su profundización posterior.

En este informe de tesis, por razones de extensión, se presentan solamente las actividades vinculadas a la construcción conceptual del nuevo objeto cuántico (Actividades 1 a 20 de módulos 1 a 4)

7.4 La propuesta

7.4.1 Módulo 1: Presentación del curso y relevamiento de expectativas y concepciones iniciales

7.4.1a Objetivos del módulo 1:

Presentar la programación del curso. Recabar información sobre las expectativas de los docentes asistentes y sus actitudes frente a las dificultades que consideran que presenta la mecánica cuántica. Realizar un diagnóstico previo de algunas representaciones que se

consideran de especial dificultad de comprensión. Generar un ambiente propicio para la discusión y comunicación entre todos los participantes, que será la base del aprendizaje en esta metodología netamente constructivista.

7.4.1b Comentarios generales sobre las actividades del módulo 1

El módulo 1 consiste en seis actividades consideradas de suma importancia, ya que a través de ellas se pretende generar un clima que propicie la discusión de los temas a tratar y la participación activa de los asistentes, cuestiones que consideramos indispensables en un proceso de apropiación activa del conocimiento. El inicio del desarrollo de contenidos se deja para los módulos siguientes.

7.4.1c Actividades del módulo 1

Actividad 1:

Actividad 1: Presentación de los participantes y del temario tentativo del curso

Objetivo de la actividad 1: La intención principal en esta instancia fue recabar información sobre el estado de conocimientos de los asistentes y acordar una metodología de trabajo en la que la participación activa en las discusiones entre pares y con el director del curso, sería la base a partir de la que se construyan los nuevos significados.

Comentarios: Es importante en esta instancia, reducir la distancia profesor-alumno planteada en los cursos tradicionales de clases magistrales e infundir confianza en los participantes respecto a que es posible un acercamiento a la comprensión de los temas de física cuántica prescindiendo de un manejo exhaustivo del formalismo. Asimismo, se resaltó que el hilo conductor a seguir sería la construcción de un nuevo modelo para la materia-radiación a partir de la discusión de la simbiosis onda-partícula, conceptos unificados en la mecánica cuántica pero contrapuestos clásicamente. Se insistió en que el objetivo no era sólo un avance en contenidos a partir del formalismo, (si bien esto es importante y quedaría para quienes desearan profundizar), sino principalmente discutir

los conceptos pilares de la física cuántica y avanzar en la comprensión de la naturaleza dual de la materia y la radiación desde un plano preferentemente conceptual, basado en el análisis de los modelos involucrados.

Se propuso una duración del curso en 12 clases de 3 horas semanales a las que eventualmente se agregarían algunas exposiciones de los asistentes, a manera de evaluación

Actividad 2:

Actividad 2: Lectura del artículo: “La inclusión de temas actuales de Física en el Polimodal. Algo más que ampliación de contenidos”. P. Fernández, E. González, J. Solbes. Revista Educación en Ciencias (Univ. de San Martín, Arg.). Vol 3, 1997.

Objetivo 1 de la Actividad 2: Conocer los argumentos de otros profesores a incluir temas de física contemporánea en la currícula del nivel medio.

Objetivo 2 de la Actividad 2: Conocer los posicionamientos de algunos autores respecto a cómo encarar la enseñanza de la FQ.

Comentarios: una vez entregado el material, y habiendo dado un tiempo apropiado para la lectura individual, uno de los profesores lee en voz alta los párrafos principales y a continuación entre todos debaten acuerdos y desacuerdos con las diferentes posiciones de los autores. Se presentan a continuación dos extractos del Artículo 1 con las principales cuestiones a resaltar referentes a cada objetivo planteado y comentarios sobre la participación de los docentes, que ponen de manifiesto su posicionamiento inicial respecto a la enseñanza de la MQ en el nivel medio.

Extracto 1 del artículo: “La inclusión de temas actuales de Física en el Polimodal. Algo más que ampliación de contenidos”

A. Oñorbe (1996), destaca entre las razones que suelen esgrimir los profesores en contra de la introducción de nuevos conceptos en los currículos, las siguientes:

- las nuevas teorías son muy complicadas,
- se necesitan muchos conocimientos previos para poder comprenderlas,
- los programas son muy extensos,
- es preferible enseñar los fundamentos clásicos en un orden histórico,
- los profesores no tienen la formación específica adecuada,
- los profesores no disponen de mecanismos para adaptar los nuevos conocimientos a la comprensión de los alumnos.

Solbes (1996), comenta que todo tema nuevo suele ser considerado difícil y no apto para la enseñanza. Algo similar ya ha sucedido con tópicos de otras ramas de la Física hoy tradicionales pero controvertidos en su momento, como lo fueron la teoría electromagnética, los campos y ondas, etc.

Otras veces, se atribuyen las dificultades a la matemática y se considera que debe reservarse el tratamiento del tema para la universidad.

La amplitud enciclopédica de las currículas, sumada a la escasez de tiempo y una veloz secuenciación de contenidos se constituyen también en obstáculos no sólo para una formación disciplinar sólida en estos temas, sino para la discusión de la transformación de concepciones que supone la interpretación del mundo natural desde la visión de la ciencia actual.

Extracto 2 del artículo: “La inclusión de temas actuales de Física en el Polimodal. Algo más que ampliación de contenidos”

Algunos autores, preocupados por el poco interés de los alumnos hacia la ciencia y en un intento de transformar los contenidos en algo atractivo, recomiendan modernizar los cursos introductorios de Física en la universidad mediante la presentación de las ideas cuánticas y relativistas en los primeros años de la instrucción universitaria (Holbrow et al, 1995).

Neressian (1992), resalta la importancia de recurrir al uso de analogías en el planteo inicial de una nueva teoría. Su propuesta se basa en la investigación del modo en que razonaban los grandes científicos de la historia, para quienes los modelos de teorías ya vigentes eran el punto de partida para la explicación de nuevos fenómenos.

Por el contrario, Fischler (1992) plantea lo perjudicial de la presencia de analogías en la presentación de la Física Cuántica, ya que no puede explicarse mediante el uso de modelos clásicos aquellos conceptos que motivaron la ruptura de las nuevas ideas con la Física Clásica.

Taylor y Zafiratos (1991), destacan la importancia de incluir los principios que rigen la física contemporánea en cursos de estudiantes que no continuarán con estudios científicos posteriores y presentan un texto en el que intentan desarrollar los tópicos de Física Moderna en un nivel accesible, pero sin perder, por ello, rigor en la presentación.

En España, los temas vinculados con la Física Moderna están desde hace algunos años incluidos en la currícula. Solbes et al (1989) sostienen que la introducción de la Física Moderna suele estar caracterizada por una presentación desestructurada de conceptos, en la que se mezclan o yuxtaponen concepciones clásicas y modernas sin poner en evidencia la ruptura entre ambas. Asimismo, afir-

man que la presentación lineal que se hace de la evolución de la ciencia, proporciona una imagen de la misma que no contribuye a una apropiada caracterización de la metodología científica. En tal sentido, elaboran una propuesta que toma como punto de partida las dificultades que originaron la crisis de la física clásica e intenta mostrar los límites de validez de ésta y las diferencias entre la concepción clásica y moderna del comportamiento de la materia.

Comentarios de los profesores sobre la lectura de estos artículos:

Los profesores se identificaron con las posturas descritas en la primera lectura y en general acordaron en que la mayor dificultad para la implementación de temas de FQ en el nivel medio radicaba en la falta de formación de los docentes y en la rigidez de las currículas, aunque esto último depende de las directivas en cada institución. Compartieron temores y dudas sobre el esfuerzo que representaría la enseñanza de la FQ y entendieron que es posible superarlos, ya que no son dificultades personales, sino compartidas, incluso, con docentes de otros países.

Luego, sobre la lectura del segundo extracto, los profesores discutieron las diferentes modalidades de enseñanza propuestas. La lectura permitió mostrar que han sido estudiadas diferentes variantes de presentación del tema lo que infundió cierta confianza y seguridad personal en relación a encarar la enseñanza de temas de FQ en el nivel medio. Se evidenció alguna sorpresa respecto de los resultados de algunas investigaciones que advierten sobre errores conceptuales derivados de una presentación temprana y descontextualizada del modelo de Bohr y si bien expresaron que no es necesario el desarrollo previo de toda la física clásica, se desestimó que pueda enseñarse FQ prescindiendo de la misma.

Actividad 3:

Actividad 3: Lectura del artículo: “Dificultades en la enseñanza/aprendizaje de la física cuántica”, J. Solbes, J. Bernabeu, J. Navarro, V. Vento. Revista Española de Física, Vol2, pp.22-27, 1988.

Objetivo de la Actividad 3: Plantear las dificultades encontradas en investigaciones en didáctica de las ciencias, en alumnos universitarios y observar que suelen ser las mismas que las de los docentes, es decir que las de los propios asistentes. Detectar, mediante

una reflexión personal, los propios nudos de dificultad a través de la discusión de las preguntas planteadas en el artículo.

Comentarios: se comentaron las conclusiones de los autores y se pidió a los profesores que intentaran responder individualmente (en sus casas) las preguntas que los autores presentaron a los estudiantes. Se aclaró que las dificultades encontradas por estos investigadores en sus alumnos, podrían llegar a ser las mismas que las de los propios asistentes, y que sería interesante que fueran registrando sus propios puntos de dificultad para intentar ir aclarándolos a lo largo del curso.

Las cuestiones a resaltar en este artículo se presentan en el extracto siguiente:

Extracto del artículo: "Dificultades en la enseñanza/aprendizaje de la física cuántica".

Los estudiantes que inician el tercer curso de la licenciatura en Físicas tienen una comprensión aceptable en lo que se refiere a conceptos clásicos, pero escasa en conceptos cuánticos.

Existen errores conceptuales en las ideas cuánticas y también en las clásicas algunos de los cuales persisten tras un curso de Física Cuántica

Dichos errores conceptuales tienen su origen:

- en la introducción directa o explícita de los errores por los textos y profesores y se transmiten de unos a otros por un mecanismo de "reacción en cadena" a causa de la aceptación acrítica.
- en la falta de un tratamiento didáctico clarificador que muestre cómo las nuevas ideas -en este caso las cuánticas- entran en conflicto con las clásicas y, por tanto, con la estructura conceptual de los alumnos dificultando las posibilidades de cambio conceptual.
- en el deseo de presentar sencillamente algunos conceptos y fenómenos nuevos, sobre los que carecemos de una previa experiencia sensible y cotidiana que nos proporcione una "intuición" (o "prejuicio"), sin utilizar un bagaje matemático fuera del alcance de nuestros alumnos.

Este afán simplificador conduce en numerosas ocasiones, a utilizar conceptos clásicos (que se suponen adquiridos por los alumnos) para explicar fenómenos que precisamente obligaron a abandonar las concepciones clásicas y en la mayoría de estos casos, los nuevos aspectos se presentan sin dejar de dar como "real" la imagen clásica

Es necesario plantear una enseñanza de la Física Cuántica que tenga en cuenta los conceptos y errores previos de los alumnos. La Física Cuántica debe introducirse como contraposición con las ideas clásicas e incluir junto con la formación matemática, la discusión de las ricas y provocadoras ideas de la nueva Física. Esto permitirá desarrollar un nuevo sentido físico, una nueva intuición, es decir, pensar de forma cuántica, dándose cuenta, por ejemplo, de que los electrones y fotones no son ni ondas ni partículas clásicas, sino objetos de un nuevo tipo con un comportamiento nuevo, el comportamiento cuántico.

Es relativamente fácil conseguir sensibles mejoras en los estudiantes, favoreciendo que el enfrentamiento entre las ideas clásicas y cuánticas sea positivo, de modo que estas últimas sean necesarias para interpretar la Física del siglo XX.

Finalmente, se recomendó hacer una lectura cuidadosa de ambos artículos en sus casas.

Actividad 4:

Actividad 4: Encuesta para el relevamiento de representaciones iniciales.

Título..... Antigüedad en la docencia:.....

CUESTIONARIO:

1. ¿Por qué la física moderna supone una ruptura con la clásica?
2. ¿Qué entiende por...?
 - a) Dualidad onda-partícula.....
 - b) Cuantificación.....
 - c) Relaciones de indeterminación.....
 - d) Orbitales.....
 - e) Interpretación probabilística.....
 - f) Ecuación de Schrödinger.....
3. ¿Cómo caracterizaría un fotón?
4. ¿Podría un fotón experimentar interferencias constructivas y destructivas?
5. ¿Qué entiende por comportamiento dual de una partícula? ¿Podría dar un ejemplo?
6. ¿Cómo describiría un objeto cuántico?
7. ¿Es la superposición de estados planteada por la mecánica cuántica una situación que describe el verdadero estado de los objetos cuánticos o sólo es una representación matemática ya que el objeto cuántico debe estar en algún estado determinado?
8. ¿Cómo describiría el modelo actual del átomo?
9. ¿Qué diferencias y similitudes encuentra respecto de los objetos clásicos?
10. Cite algunos productos tecnológicos que apliquen fundamentos de FQ y que se hayan incorporado al uso cotidiano, o satisfagan alguna necesidad de la sociedad actual.

Objetivo 1 de la actividad 4: Realizar un diagnóstico inicial de las representaciones de los docentes sobre temas de la física cuántica en los que se detectaron las principales dificultades de comprensión en los estudios descritos en capítulos anteriores. Poner en evidencia limitaciones en la formación personal de los asistentes y despertar la curiosidad por aspectos que pudieran resultar desconocidos.

Objetivo 2 de la actividad 4: Aportar datos para la investigación sobre la caracterización de las representaciones iniciales de los docentes asistentes.

Los resultados de esta encuesta se comentan en otros capítulos.

Comentarios: Respecto a las actitudes de los docentes frente a la encuesta: Previo a la distribución del cuestionario se aclaró debidamente que de ninguna manera representaba una evaluación ya que no se pretendía que los temas a desarrollar fueran conocidos de antemano, y que simplemente se pretendía detectar dificultades en las concepciones iniciales para establecer un punto de partida para el desarrollo del curso. Todos los asistentes respondieron el cuestionario aunque algunos dejaron ítems sin contestar. El ánimo de los profesores parecía haber decaído sustancialmente al encontrar serias dificultades para completar la totalidad de los ítems. Su sentimiento parecía ser el de “yo no sé nada de esto”. El trabajo les llevó alrededor de 45 minutos más del estimado. Durante ese tiempo se debió insistir en que no era una evaluación de conocimientos. El no poder contestar algunas cuestiones generó cierta decepción y sentimiento de molestia. Uno de ellos sugirió hacer nuevamente la encuesta al finalizar el curso. Se acordó en devolverles la encuesta al finalizar y analizar entre todos si se mantenían las respuestas actuales.

Actividad 5:

A manera de conclusión, se propone a uno de los asistentes leer un párrafo del texto de Stéphane Deligeorges (ed.), (1990). *Inquietante Mecánica Cuántica*. (en *El Mundo Cuántico*, ed. Alianza.). (Actividad 5)

Actividad 5: Lectura de un extracto de:



INQUIETANTE MECANICA CUANTICA

El mundo cuántico, Ed. Stéphane Deligeorges, Alianza, 1990.

Hace ochenta y cuatro años que llegaron los quanta. Aún no nos han abandonado.

Es una imagen ya legendaria. El 14 de diciembre de 1900, en la sociedad de física de Berlín, Max Planck lee su estudio sobre el problema de la radiación del cuerpo negro. Este problema de nombre tan estético plantea, en esa época, una cuestión poco importante. Sin embargo, sin miedo a exagerar, esta cuestión va a trastocar todos los conceptos de la física. Física cuántica, ¿qué significa eso? Propongamos una definición. Por ejemplo, la de un gran teórico, Richard Feynman:

“... la mecánica cuántica es la descripción del comportamiento de la materia y de la luz en todos sus detalles, y en particular, de todo aquello que tiene lugar a escala atómica. A muy pequeña escala, las cosas no se comportan en absoluto como aquellas de las cuales tenemos una experiencia directa. No se comportan como ondas, no se comportan como partículas, como nubes ni como bolas de billar, ni como un peso sobre una cuerda, ni como nada que se haya visto jamás...”

Entonces, cabe preguntarse, ¿cómo se comportan las «cosas»?

Esto es suficiente para excitar nuestra curiosidad, y partiendo de ello nos hemos lanzado el reto...

- ✓ Un reto, ya que, por lo que se refiere a la historia y los fundamentos, una biblioteca entera no sería suficiente.
- ✓ Un reto, porque la mecánica cuántica es muy abstracta, difícil, sin relación alguna con nuestras intuiciones sobre la materia, sobre las «cosas».
- ✓ Un reto, porque presenta delicadas dificultades de interpretación, un tupido bosque de interpretaciones con frecuencia divergentes entre sí.
- ✓ Un reto, en fin, porque ha habido que movilizar físicos, pero también historiadores de la física y filósofos de la ciencia, para tener una posibilidad de satisfacer correctamente nuestra curiosidad.

He aquí el resultado de nuestro desafío.

No nos engañemos, la teoría cuántica es difícil...; Físicos de primer orden, confiesan con humildad que les costó aprenderla. Idéntica dificultad entraña el divulgarla para que todos la puedan comprender...

Pero escuchemos de nuevo a Richard Feynman:

“... Newton creía que la luz estaba compuesta de partículas, pero en seguida se descubrió que se comportaba como una onda. Más tarde (a comienzos del siglo XX) se descubrirá que la luz se comporta a veces como una partícula. Históricamente, al electrón, por ejem-

plo, se le suponía un comportamiento típico de una partícula, pero después se vio que en varios aspectos se comportaba como una onda. Por lo tanto, en realidad no se comporta como una ni como otra. En la actualidad, ya hemos abandonado este dilema, y afirmamos que «no es ni lo uno ni lo otro.»

“Felizmente, hay una salida: 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, todos son «ondas-partículas”, o como se los quiera llamar.”

En resumen, se habrá sospechado que la teoría cuántica explica, describe la naturaleza, la realidad, si es que hoy pretendemos saber lo que significa «realidad»...

Stéphane Deligeorges

Objetivo de la actividad 5: el objetivo de esta lectura fue plantear la comprensión de los conceptos de la física cuántica como un reto que es posible de alcanzar y generar en los asistentes expectativas favorables al desarrollo del curso.

Comentarios: la transcripción de la opinión de físicos de relevancia que reconocían que comprender la mecánica cuántica no es trivial, fue de gran impacto. La lectura se realizó en voz alta y fue muy bien recibida generando un clima de optimismo en relación al logro de una mejor formación en temas de física cuántica y curiosidad por discutir la naturaleza de la materia en este nivel. Las palabras del propio Richard Feynman fueron reconfortantes para ellos y la lectura fue una oportunidad para dejar en claro que si bien las dificultades estarían presentes, el alcance y apropiación de los conceptos de la física cuántica era posible.

Actividad 6:

Actividad 6: reflexionar sobre cuáles son las expectativas personales en relación a este curso y escribir un listado de las mismas.

Objetivo de la actividad 6: generar una reflexión personal sobre las expectativas a los largo del curso para una puesta en común.

Comentarios: Para conocer las expectativas de los docentes sobre el curso, se les solicitó que reflexionaran sobre el tema y expresaran sus pareceres. Se inició un activo intercambio en el que los profesores participaron con entusiasmo. Algunas de las cuestiones planteadas fueron: entender cuál es el modelo actual del átomo, qué es eso de la dualidad, cómo explicarle esto “que ni yo entiendo” a los alumnos, cuánto hay que decirles, hasta dónde avanzar,...Como siempre hubo una fuerte demanda de alternativas de implementación de estos temas en el aula. Algunos de los profesores tienen alumnos de menor edad (12 a 14 años) y sólo les interesa la física cuántica a nivel personal. Se solicitó, como cierre de esta actividad, que para un próximo encuentro, trajeran por escrito las expectativas personales respecto al curso, es decir qué esperaban obtener al finalizar el mismo.

En el cierre, se presentó el material a trabajar en el próximo encuentro: La evolución de los modelos en la ciencia. El caso de los modelos para la luz.

7.4.2 Módulo 2: La evolución de los modelos de la ciencia. El caso de los modelos para la luz.

7.4.2a Generalidades y objetivos del módulo 2

En el Módulo 1 se realizó la presentación general del curso, se recabó información sobre las expectativas de los docentes asistentes, se caracterizaron las representaciones iniciales y se intentó generar un ambiente propicio para el desarrollo del curso.

El Módulo 2 se plantea los siguientes objetivos:

- ✓ poner en evidencia el carácter provisorio de los modelos de la ciencia a partir del análisis de la evolución histórica de los modelos para la luz,
- ✓ generar una visión más adecuada sobre la ciencia y la construcción del conocimiento científico a partir de la discusión de los alcances y limitaciones de los modelos corpuscular y ondulatorio de la luz y de la realización de predicciones posicionándose en cada modelo,

- ✓ construir un modelo para la radiación, más cercano a la visión científica actual, en el que las propiedades del modelo corpuscular y el ondulatorio se conjugan en un nuevo objeto cuántico con comportamiento dual.
- ✓ Discutir el efecto fotoeléctrico y presentar un modelo para la radiación basado en la energía asociada al fotón $E=h\nu$.

7.4.2b Comentarios generales sobre las actividades del módulo 2

A través de cuatro actividades se analiza la secuencia de modelos propuestos a lo largo de la historia para explicar la naturaleza de la luz, desde el modelo corpuscular de Newton al ondulatorio de Huyghens y Young, culminando en la discusión del modelo de fotón construido a partir de la ecuación de Einstein $E=hf$. Se pretende que los alumnos (profesores en formación o alumnos de nivel polimodal) discutan en grupo las diferentes cuestiones que se plantean, consensúen posturas epistemológicas a partir de la puesta en común con el resto del curso y construyan en conjunto los conceptos, en particular, el concepto de fotón. Esta construcción lleva implícita, como anclaje conceptual, la discusión sobre cómo el modelo dual de la radiación, extracta aspectos particulares de los modelos clásicos de onda y de partícula, pero sobrepasa los límites de ambos, y supone la síntesis de propiedades clásicamente irreconciliables en un nuevo objeto cuántico.

Primeramente se retomaron los textos que fueron entregados la clase anterior en base a los cuales se desarrollan las Actividades 7 y 8, y luego se presentó una simulación que posibilitó reproducir la experiencia del efecto fotoeléctrico y poner de manifiesto la necesidad de un modelo corpuscular para la radiación (Actividad 9).

Las actividades se desarrollaron en el laboratorio de Física III de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la U.N.R. ya que en este laboratorio se dispone de computadoras para el trabajo previsto en la Actividad 8.

7.4.2c Actividades del módulo 2

Contenidos

Algo de historia sobre los modelos para la luz. El modelo corpuscular de Newton. El modelo ondulatorio. Alcances y limitaciones de cada modelo. Ruptura con la noción de ondas clásica: el efecto fotoeléctrico. Los cuantos de luz, los fotones. La ecuación $E=h \cdot \nu$. Actividades, problemas, ejercicios, análisis de gráficas.

Introducción a cargo del profesor del curso

En 1905, Einstein ofreció una explicación del efecto fotoeléctrico, en un artículo notable que fuera publicado en el mismo volumen de los *Annalen der Physik* que sus artículos sobre relatividad especial y movimiento browniano.

En este artículo Einstein suponía que la cuantización de energía utilizada por Planck en el problema del cuerpo negro era una característica universal de la luz y que la energía luminosa, en lugar de estar distribuida de modo uniforme en el espacio por el que se propaga, tal como lo hacen las ondas, se compone de cuantos discretos de energía $h\nu$.

En esta unidad didáctica, a partir de la discusión de los diferentes modelos planteados para la luz a lo largo de la historia, plantearemos una visión más dinámica de la ciencia (Gil, 1993), en la que propondremos modelos alternativos para explicar anomalías en las teorías y en la que el consenso alcanzado por la comunidad científica juega un rol importante. El efecto fotoeléctrico, en este contexto, se presenta como una experiencia crucial en la discusión sobre la naturaleza de la luz a partir de la cual Einstein propone el modelo del fotón. Se ha elegido, además, por su interés histórico y por ser una experiencia cuya presentación no ofrece serias dificultades conceptuales ni formales.

En este módulo estudiaremos la caracterización de las propiedades distintivas de los modelos corpuscular y ondulatorio, analizaremos los argumentos esgrimidos en favor del modelo corpuscular newtoniano y el ondulatorio de Huyghens para la luz y construiremos un modelo para la radiación, a partir de una simulación del efecto fotoeléctrico.

Actividad 7

Actividad 7. LOS MODELOS DE ONDA Y DE PARTÍCULA

- Dar ejemplos de fenómenos en que se observe la propagación de ondas.
- Dar ejemplos de fenómenos en que se observe el movimiento de una o varias partículas
- Pensar cuáles son las características que nos inducen a clasificar un fenómeno como ondulatorio o como corpuscular
- Confeccionar un paralelo o una tabla donde se enumeren las características propias de las partículas y de las ondas

Objetivo de la actividad 7: explicitar, a partir de una discusión en pequeños grupos, las principales características de ondas y partículas.

Esta actividad abre un espacio de discusión para que afloren concepciones iniciales y se consensúen las propiedades que determinan las principales características del modelo corpuscular y el ondulatorio. Se realiza finalmente una puesta en común. En el módulo 3 se retomará esta descripción desde un punto de vista más formal.

Cuestiones a resaltar en la puesta en común:

mientras que una partícula puede ser localizada en un determinado lugar del espacio y en un cierto instante de tiempo, una onda se extiende en el medio en que se propaga abarcando una amplia región.

- ✓ cuando dos o más partículas chocan, intercambian energía y momento (choques elásticos o inelásticos), por el contrario, cuando dos pulsos de ondas que viajan en un mismo medio se superponen, se produce una perturbación en el medio por unos instantes y luego los pulsos continúan su trayectoria sin alterarse.
- ✓ las ondas, en general, no suponen transporte de masa como las partículas, sólo transportan energía y momento a través del espacio en el que se propagan.

- ✓ la velocidad de una onda está determinada por las características del medio de propagación (incluso en el vacío), mientras que en el caso de las partículas, excepto que sea viscoso, el medio no influye en su velocidad.
- ✓ ondas y partículas tienen comportamientos diferentes al enfrentar un obstáculo: mientras las partículas pueden chocar en algún punto por estar localizadas, las ondas se extienden en el espacio y se difractan, bordeando el impedimento.

Comentarios: La caracterización de los modelos de partícula y de onda expresados por los profesores alumnos no satisfizo las expectativas mínimas. Esto era algo esperado por lo que en la programación del curso se previeron actividades que permitieran ahondar en la caracterización de ambos modelos desde un punto de vista más formal (ver Módulo 3).

Actividad 8

Actividad 8. MODELOS PARA LA LUZ:

Lecturas previas:

Artículo1: Asimov I., (1986). Introducción a la ciencia. Ciencias Físicas.Vol1 Buenos Aires: Hyspamerica.

Artículo 2: Einstein A.; Infeld L., (1986), La evolución de la Física. Barcelona: Salvat.

En base a las lecturas

- Dar ejemplos de fenómenos en que la luz se comporte como onda y donde se comporte como corpúsculo. Justificar desde cada modelo.
- Dar ejemplos de algún fenómeno que no pueda ser explicado en el modelo corpuscular para la luz.
- ¿Por qué según la teoría corpuscular de Newton, la velocidad de la luz en el agua o el vidrio es mayor que en el aire?
- ¿Puede el modelo ondulatorio explicar todos los fenómenos observados dentro de la física clásica con la luz? ¿Cuál fue la mayor dificultad con que tropezó este modelo para ser aceptado?

Objetivo de la actividad 8: Analizar el surgimiento de los modelos clásicos para la luz (modelos corpuscular y ondulatorio) y los argumentos que los sustentan. Analizar fenómenos desde ambos modelos y discutir sus alcances y limitaciones. Explicitar cuestiones como el carácter provisorio de los modelos de la ciencia y la naturaleza dinámica de su desarrollo.

En el cuadro siguiente se presenta una síntesis de las lecturas sobre las que se trabajó.

Síntesis de los artículos discutidos en la actividad 8.

El primer texto presenta una breve descripción del modelo corpuscular de Newton para la luz, el modelo ondulatorio propuesto por Huyghens, la confirmación de este modelo a partir de las observaciones de Fresnel y Franhoufer, la naturaleza ondulatoria electromagnética propuesta por Maxwell, y plantea el problema de la existencia de un medio, el éter, para la transmisión de las ondas electromagnéticas versus la transmisión en el vacío y la acción a distancia.

El siguiente artículo presentado en la actividad 8 presenta un extracto del libro de Galileo Diálogos sobre dos nuevas ciencias. A través de una conversación del maestro y sus alumnos sobre la velocidad de la luz se discuten argumentos a favor y en contra del modelo corpuscular y el ondulatorio. Se muestra cómo el modelo corpuscular era suficientemente satisfactorio en los tiempos de Newton al ser capaz de explicar la refracción y reflexión de la luz (propagación rectilínea), y la conservación del momento en la reflexión. El texto muestra también las incoherencias de este modelo: el enigma del color, el aumento de velocidad predicho por el modelo cuando la luz atraviesa un medio diferente del vacío. Finalmente, plantea la posición de Huyghens según la cual la luz no es una sustancia como afirmaba Newton, sino una transferencia de energía en forma de onda. El texto también discute en forma de diálogo virtual entre dos personajes N (partidario de la teoría corpuscular de Newton) y H (partidario de la teoría ondulatoria de Huyghens), cómo la teoría ondulatoria explica todos los fenómenos ópticos explicados por la teoría corpuscular y plantea la ambigüedad que se desprende al existir dos teorías incompatibles para explicar un mismo fenómeno, decidiéndose en favor de una o de la otra después de una cuidadosa consideración de los méritos y defectos de cada una. El autor además destaca que en la época de Newton -e incluso más de cien años después- muchos físicos se inclinaron por la teoría corpuscular y sólo a mitad del siglo XIX la historia dio su veredicto en favor de la teoría ondulatoria de la luz. En su conversación con H, N plantea la posibilidad de una decisión experimental entre las dos teorías ya que la teoría corpuscular implica la existencia de sombras nítidas y no admite que la luz pueda bordear un obstáculo o cuerpo opaco, mientras que, según la teoría ondulatoria, un objeto suficientemente pequeño no producirá sombra alguna. Las limitaciones experimentales propias de la época no permitieron encontrar pruebas concluyentes a favor de la teoría ondulatoria. Los trabajos de Young y Fresnel demostraron experimentalmente el carácter

ondulatorio de la luz, extrayendo, además, nuevas consecuencias teóricas para la teoría de la luz.

Comentarios/Sugerencias: El material sugerido había sido entregado en un encuentro anterior y ya había sido leído al momento de realizar la actividad 8.

Esta actividad permite plantear una discusión epistemológica sobre la naturaleza de la ciencia, con el propósito de superar concepciones sobre la evolución lineal del progreso científico. La disidencia entre las dos posturas epistemológicas planteadas para explicar los fenómenos luminosos, es una oportunidad para diferenciar cuáles son los aspectos característicos de un modelo ondulatorio, de los correspondientes a un modelo corpuscular, a la vez que permite discutir el proceso dialéctico de la construcción de la ciencia en el que diferentes modelos pugnan por imponerse en una época dada. (Campanario, 2004). La puesta en común consistió en la lectura de las respuestas de cada grupo. El acuerdo fue general y el debate concluyó en poco tiempo sin que nadie discutiera los aportes de sus compañeros.

Cuestiones a resaltar

- los aspectos característicos del modelo ondulatorio y del modelo corpuscular según los personajes de las lecturas en relación con la actividad 1.
- el modelo corpuscular de la luz explica todos los fenómenos ópticos observados en los tiempos de Newton: la propagación rectilínea de la luz, la reflexión, la refracción y el color. Sin embargo este modelo tiene limitaciones o cuestiones no resueltas: la velocidad de la luz en cualquier medio material es mayor que en el aire (no se conserva el momento lineal) y existen tantas partículas de luz diferentes, como colores (cada color corresponde a un tipo diferente de partículas).
- no habían sido observados fenómenos de difracción ni interferencia en el caso de luz por lo que había resistencia en la comunidad científica de la época para aceptar el modelo ondulatorio. Las limitaciones experimentales impedían poner en evidencia el carácter ondulatorio de la luz y fueron decisivas en la elección del modelo corpuscular.

Actividad 9

La Actividad 9 consiste en una simulación del efecto fotoeléctrico. No se busca que los alumnos comprueben una ley sino que realicen inferencias, discutan la participación de las variables en juego, determinen cuáles son las relevantes, infieran la relación entre la energía de arranque y la frecuencia de la radiación incidente. Se intenta que a partir de la contrastación de sus predicciones con los resultados obtenidos en la simulación, y la guía del profesor del curso, los estudiantes construyan un nuevo modelo de la radiación. Se diseñó para este propósito una página web basada en el material ofrecido por Angel Franco en el curso interactivo Física con Ordenador (en: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/fotoelectrico/fotoelectrico.htm>), reformulando las consignas para darle un formato más abierto, respetando el diseño experimental elaborado por Franco, pero dejando planteadas diversas preguntas que motivan en los asistentes la emisión de hipótesis. La guía de la actividad incluye: una tabla de longitudes de onda emitidas por diferentes materiales conocidos con la intención de que los valores de trabajo no sean elegidos al azar sino que correspondan a valores de emisión observados experimentalmente, un desarrollo teórico-histórico y varios ejercicios finales en forma de preguntas. El material ofrecido por Franco permite realizar los cálculos y mediciones en la misma página web, sin embargo, es recomendable confeccionar las gráficas en papel para facilitar la comparación de los resultados obtenidos por los distintos grupos de trabajo. La figura 7.1 muestra el applet que representa el dispositivo experimental y la figura 7.2 una de las gráficas que pueden obtenerse exportando los resultados de la simulación.

Advertencia: La construcción del conocimiento exige del profesor del curso, orientar las observaciones y generar, las condiciones necesarias para la reflexión y la elaboración de conceptos por parte de sus alumnos. Por ello, es importante prevenir a los docentes que decidan implementar esta u otra simulación con sus alumnos, de la llamada ilusión de la interactividad (Utges et.al 2004, Fernández y Jardon, 2012), es decir, del error en el que se suele incurrir al creer que la sola interacción con el experimento simulado basta para que los alumnos arriben a los resultados esperados. Sugerimos conferir a la simulación un rol activo, como instrumento que propicia el análisis de situaciones, el intercambio de

ideas y el debate entre los estudiantes, superando un carácter simplemente operativo del uso de la misma (Utges et al. 2003)

La actividad está diseñada para ser desarrollada en dos clases. En la primera clase trabajan los alumnos, se familiarizan con la simulación, obtienen los primeros resultados, discuten la relevancia de las variables en juego (actividad 9.1). En la segunda clase, se realiza la puesta en común y la discusión general en la que los alumnos consensúan una ley que describe la emisión electrónica en un metal a partir de la frecuencia de la radiación incidente, discuten las consecuencias de las hipótesis realizadas durante la construcción de dicha ley y finalmente se cierra el tema con una actividad de síntesis (actividad 9.2). Esta parte de la actividad 9 pretende generar un espacio para aunar criterios y comparar los resultados obtenidos por los distintos grupos una vez que hubieron trabajado y discutido individualmente.

Actividad 9.1

Actividad 9.1. EFECTO FOTOELÉCTRICO.

Parte 1: Construcción de un modelo de la radiación a partir de observación realizadas sobre una simulación (Ver Anexo 3 TP Efecto Fotoeléctrico)

Cuestiones a resaltar/secuencia de trabajo

- en los casos en que se observa emisión: al aumentar la intensidad de la radiación incidente o disminuir el potencial de retardo, aumenta la corriente en el amperímetro, es decir, aumenta el número de electrones que circulan o bien su velocidad (el análisis de esta variación permitirá establecer un puente entre los modelos macroscópico ondulatorio y el corpuscular del fotón en la actividad 9.2).
- cuando no hay emisión, ésta no se consigue modificando los valores de la intensidad de la radiación ni el potencial de frenado. Para conseguir la emisión se debe cambiar adecuadamente el metal del electrodo, o bien, disminuir la longitud de onda.
- en la situación en que los electrones apenas logran alcanzar el electrodo opuesto: el potencial de detención V_0 es una medida de la energía cinética máxima (algunos

electrones tendrán una energía menor debido a la pérdida que experimentan al atravesar el metal).

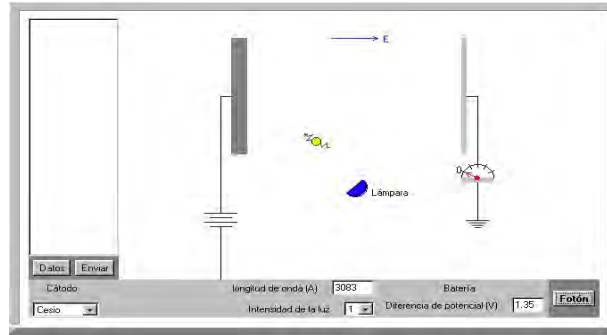


Figura 7.1: Applet efecto fotoeléctrico: permite variar la intensidad de la radiación incidente, la longitud de onda y el potencial de retardo. Los valores de interés se registran a través del botón **Datos** y se exportan para ser graficados haciendo clic en **Enviar**.

- la longitud de onda y el potencial de detención requerido para cada longitud guardan una relación de proporcionalidad inversa por lo que es conveniente graficar el V_0 en función de la frecuencia ($\lambda=c/v$). La gráfica resulta así una recta del tipo:

$$V_0 = mv + C \quad (1)$$

- las gráficas para otros metales, (si están en la misma escala) tienen todas la misma pendiente “m”, pero difieren en la ordenada al origen “C” (visualizar esta propiedad superponiendo ya sea las copias de las gráficas en papel o las transparencias en el retroproyector). Se deduce, entonces, que la ordenada al origen depende del metal que constituye el electrodo y puede relacionarse con la energía de arranque mínima necesaria para cada material (función trabajo).

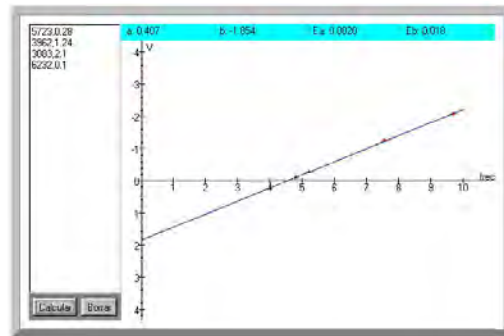


Figura 7.2: la gráfica del potencial de retardo vs. la frecuencia de la radiación incidente es una recta $V_0 = mv + C$. Teniendo en cuenta que la energía del electrón saliente es $eV_0 = E_{\text{rad}} - \phi_0$ la energía de la radiación resulta ser $E_{\text{rad}} = eV_0 + \phi_0 = h\nu$ donde h es la constante de Planck y puede calcularse a partir de la pendiente de la

- la pendiente calculada a partir de las gráficas es una constante para todos los materiales y resulta $m=4,12 \cdot 10^{-15} \text{V} \cdot \text{seg}$

Interpretación de los resultados

- la energía de la radiación se utiliza en parte para arrancar el electrón (ϕ_0) y en parte para entregarle energía cinética (eV_0):

$$E_{\text{rad}} = \phi_0 + eV_0$$

la energía del electrón, resulta, entonces:

$$eV_0 = E_{\text{rad}} - \phi_0 \quad (2)$$

donde ϕ_0 se denomina función trabajo

- multiplicando (1) por la carga del electrón e se obtiene la expresión (2) de la energía del electrón saliente, de donde se deduce que la gráfica de la energía es también una recta.
- la energía de la radiación incidente resulta entonces $E_{\text{rad}} = emv = h \cdot \nu$ donde h es la conocida *constante de Planck* y es la misma para todos los materiales. Observación: h es la pendiente de la recta que resulta de la expresión (2) y su valor calculado es $h = 6,59 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{seg}$.
- en el proceso de arrancar un electrón la energía de la radiación consiste en *paquetes de energía*, también llamados *fotones*, caracterizados por su frecuencia y de valor $h\nu$. (Esto equivale a la hipótesis de Planck para la explicación de la radiación de cuerpo negro).
- la ecuación (2) queda entonces: $eV_0 = h \cdot \nu - \phi_0$ llamada a veces ecuación de Einstein.

Comentarios/sugerencias

Se sugiere en particular:

- tener en cuenta en la programación el tiempo necesario para la familiarización con el programa, antes de registrar resultados en la actividad.

- asignar metales diferentes a cada grupo para que no trabajen todos con electrodos del mismo material.
- realizar las gráficas en la misma escala para poder comparar las pendientes
- pedir a los alumnos que intercambien las gráficas con sus compañeros y a partir de la comparación de las mismas, den una interpretación de la ordenada al origen y de la pendiente. Un retroproyector puede ser de gran utilidad para presentar transparencias de las gráficas obtenidas para distintos metales. El retroproyector permite además superponer las gráficas en igual escala y mostrar cómo la pendiente se mantiene constante para todos los metales.

En caso de disponerse de un cañón de proyección, puede en un breve tiempo repetirse la experiencia en conjunto, para algunos valores de interés particular. Una secuencia de valores sugeridos que permiten barrer casos de interés particular.

Actividad 9.2

Actividad 9.2. EFECTO FOTOELÉCTRICO.

Parte 2: cuestiones finales sobre el modelo de radiación

- ¿Cómo se explica el resultado de que la corriente máxima sea proporcional a la intensidad en el modelo corpuscular de la luz?
- ¿Qué características experimentales del efecto fotoeléctrico pueden explicarse mediante la física clásica? ¿Cuáles características no se explican?
- La longitud de onda umbral para el potasio es de 558 nm. ¿Cuál es la función trabajo para el potasio? ¿Cuál es el potencial de detención cuando se utiliza una luz de longitud de onda de 400 nm?
- Luz de longitud de onda de 400 nm e intensidad 10^{-2} W/m² incide sobre el potasio. Estimar el retraso de tiempo esperado clásicamente si la función trabajo para el potasio es 2,22 eV. (Considerar $r = 10^{-10}$ m como un radio típico del átomo).
- En el ejemplo anterior, ¿cuántos fotones inciden por segundo y por metro cuadrado?

El objetivo de esta actividad es que los profesores resuelvan diferentes cuestiones posicionándose en el modelo ondulatorio (tratado en las actividades anteriores) o en el corpuscular (que da cuenta del efecto fotoeléctrico), analicen cuál es el modelo más apropiado en cada caso y establezcan cuando fuera posible, puentes entre los mismos. Tiempo estimado de ejecución: 1 hora.

Comentarios/Sugerencias:

Si los alumnos los asistentes no tienen presente los temas desarrollados de ondas tendrán dificultades en responder algunas de estas cuestiones, en especial las cuestiones 4 y 5. En este caso, el profesor deberá hacer algunos comentarios analizando cualitativamente cada situación, profundizando la discusión en la medida en que el desarrollo de contenidos previo lo haga posible.

Cuestiones a resaltar

- Diferencia entre los conceptos de intensidad y potencia de la radiación. Un ejemplo útil es analizar la energía emitida por unidad de tiempo por una antena (potencia emitida) y cómo ésta se distribuye sobre una superficie cada vez mayor a medida que se propaga, disminuyendo la energía por unidad de área (intensidad).
- El modelo desde el cual se responde cada cuestión y las razones para ese posicionamiento.
- Pueden establecerse puentes entre ambos modelos a partir del cálculo de la energía total transportada por los fotones y la intensidad de la radiación en la cuestión 5.

Nota: una adaptación del Módulo 1 para su aplicación en el nivel medio fue publicado en la *Revista de Enseñanza de la Física*, . Vol 18 (1), pp. 69-80, 2005, ISSN 326 7091, 2005 bajo el título “De los corpúsculos de luz al efecto fotoeléctrico”. P.Fernández, E. González, J. Solbes. El artículo puede leerse en www.fceia.unr.edu.ar/revistaapfa

7.4.3 Módulo 3: Partículas y ondas, dos modelos de la física clásica

7.4.3a Generalidades y objetivos del módulo 3

En el Módulo 2 se plantearon las generalidades del modelo de onda y del modelo corpuscular, y se estableció la incompatibilidad entre estos modelos desde el punto de vista de la mecánica clásica, sin profundizar en el formalismo descriptivo de ambos modelos. Se analizó el cuestionamiento que plantea el efecto fotoeléctrico a la interpretación ondulatoria clásica de la radiación y se trabajó en la construcción de un modelo que incorpora características del comportamiento corpuscular para explicar las observaciones. Se discutió finalmente cómo esto significa traspasar los límites de interpretación ondulatoria clásica de la radiación y se establecieron puentes entre ambos modelos. Las actividades pusieron de manifiesto la necesidad de precisar más detalladamente las características de cada uno de estos modelos, tal como estaba previsto en la diagramación original del curso.

En el Módulo 3 nos planteamos los siguientes objetivos:

- ✓ Precisar formalmente las características del modelo de partícula a partir de las leyes de Newton y las magnitudes descriptivas propias de la mecánica clásica.
- ✓ Precisar formalmente las características del modelo de onda de la mecánica clásica.
- ✓ Extraer las características del modelo de onda y de partícula clásicas que aportarán a la descripción de un modelo dual para la materia.
- ✓ Presentar el efecto Compton como ejemplo de un caso en que la radiación interactúa con la materia intercambiando cantidad de movimiento momento.

7.4.3b Comentarios generales sobre las actividades del módulo 3

El desarrollo de este módulo se organizó en dos partes y un cierre final. La parte 1 estuvo gran parte a cargo del profesor del curso y consistió en una presentación de las

características del modelo de partícula y de onda y la síntesis de ambos modelos por parte de los asistentes. Se realizó además, una visita al laboratorio de ondas de la FCEIA, UNR, donde los profesores experimentaron con cubetas de ondas y observaron diversos fenómenos ondulatorios. En la parte 2, se analiza el efecto Compton a través de un trabajo individual que consistió en la deducción de la expresión de la longitud de onda Compton a partir de algunas de las expresiones presentadas en la parte 1. El foco de atención estuvo puesto en el análisis del comportamiento corpuscular de la radiación (fotón) en la colisión con una partícula. Finalmente, el cierre de la clase consistió en una lectura que presenta la dicotomía entre los modelos corpuscular y ondulatorio a principios del siglo XX y la necesidad emergente de un nuevo modelo que reúna características de ambos en una nueva concepción de la materia-radiación.

7.4.3c Actividades del módulo 3

Contenidos

Necesidad de revisar los modelos clásicos de partícula y onda.

¿Cuándo hablamos de partículas? Características del modelo de partícula: las magnitudes relevantes para su descripción, las principales ecuaciones que rigen su comportamiento y las consecuencias que se derivan de este modelo (localización de la posición, valores ciertos para la energía y el momento, entre otras). Ejemplos: las partículas conocidas, los modelos de partícula para el átomo, el electrón (momento cinético, momento dipolar magnético, relación entre ellos).

¿Cuándo hablamos de ondas? Fenómenos que caracterizan los fenómenos ondulatorios. Difracción e interferencia. Condiciones necesarias para la observación de fenómenos de interferencia y difracción. Relaciones entre las longitudes de las ondas y el tamaño de las aberturas. Ejemplos. Las ondas armónicas y sus características: frecuencia ; período; no localización,

Actividad 10:

Actividad 10: El modelo de partícula y su formalización

Lectura del material suministrado sobre modelo corpuscular (este material fue elaborado por el profesor del curso como una guía de temas a tratar pero los asistentes podían recurrir a la bibliografía que les resultara más familiar.

Un resumen de notas del profesor puede verse en z-Anexo 4- El Modelo de Partícula-Notas del Profesor)

En base a la lectura realizada, completar la tabla de propiedades de las partículas enunciadas en la Actividad 7

Objetivo específico de actividad 10: Explicitar las propiedades que caracterizan el modelo corpuscular, en particular aquellas que contribuirán a construir el modelo cuántico (expresiones del momento, de la energía, relaciones entre ellas, leyes de conservación) y aquellas que serán cuestionadas (localización, reversibilidad temporal, determinismo causal). Establecer relaciones entre las propiedades atribuidas a las partículas y el comportamiento de la radiación.

A continuación se enumeran los aspectos en los que se hizo hincapié.

Generalidades

- En la mecánica las partículas se caracterizan por su masa y su estado de movimiento.
- La masa es una cantidad positiva.
- Las masas generan campos gravitatorios.
- Una partícula en un campo gravitatorio experimenta una fuerza. Dado que la masa es una cantidad positiva, estas fuerzas tienen un único sentido, son *siempre de atracción* (es decir, en el sentido del campo).
- Las leyes que rigen el comportamiento mecánico de un sistema de partículas permiten determinar la ley de movimiento de cualquier objeto en movimiento. Es decir, permiten predecir la posición y velocidad de una partícula (o un sistema de partículas) en cualquier instante de tiempo (anterior o posterior ya que las *leyes de movimiento clásicas son reversibles respecto al tiempo*). Se dice que la partícula puede *localizarse*.
- La energía de una partícula puede expresarse en función del momento lineal como:

$$E = \frac{p^2}{2m} \quad \text{de donde} \quad v = \frac{dE}{dp}$$

- Una partícula también puede poseer carga eléctrica q .
- La carga eléctrica está cuantizada, es decir existe una carga mínima que es la carga e del electrón de manera que se verifica $q=N.e$ (con $e=1,6.10^{-19}$ Coulomb).
- A diferencia de la masa que es siempre positiva, las cargas eléctricas pueden ser positivas o negativas.
- Una partícula con carga eléctrica genera un campo eléctrico E .

- Si una carga q está en un campo eléctrico E experimentará una fuerza $\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$. Dado que las cargas eléctricas pueden ser positivas o negativas, las fuerzas eléctricas pueden ser de atracción o de repulsión (es decir, en el sentido del campo eléctrico o en el opuesto).
- Un chorro de partículas en movimiento constituye una corriente eléctrica i .
- Una partícula cargada en movimiento genera campo magnético. Una corriente eléctrica genera campo magnético.
- Si una partícula cargada se mueve en una región donde existe un campo magnético B , experimentará una fuerza magnética que modificará su trayectoria $\vec{F}_m = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$.
- Si un conductor que transporta corriente se coloca en un campo magnético B , el conductor en su conjunto experimentará una fuerza magnética.
- Si el conductor tiene forma de espira las fuerzas magnéticas pueden generar una cupla sobre la espira:

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} = i \cdot S \cdot \vec{n} \times \vec{B} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

- donde S es el área de la espira, \vec{n} el versor normal y $\vec{\mu} = i \cdot S \cdot \vec{n}$ se define como el momento dipolar magnético.
- Una partícula de masa m y carga q que se mueve con velocidad v en una trayectoria circular de radio r puede pensarse como una corriente de carga única y por lo tanto posee un momento angular mecánico $L = m \cdot r \cdot v$ y un momento dipolar magnético que resultan ser proporcionales :

$$|\vec{\mu}| = \frac{q}{2m} L.$$

- Entonces una partícula de masa m y carga q que presente un momento dipolar magnético μ , presentará también un momento angular proporcional L (esta conclusión luego pensar en un modelo de átomo en que los electrones giran en torno al núcleo dado que el átomo presenta dipolo magnético. Igualmente para el electrón y su spin y el propio núcleo atómico.)

Energía y momento de las partículas:

- Las partículas interactúan entre sí ejerciendo fuerzas entre ellas e intercambiando energía y momento.
- Este intercambio de energía y momento se produce en un lugar dado del espacio y en un determinado tiempo.
- Dos de los principios fundamentales de la física postulan que en un sistema aislado, tanto la energía total E como el momento lineal p se conservan.
- Para una partícula libre moviéndose a velocidades pequeñas respecto a la de la luz, su energía y momento verifican, entre otras, las siguientes ecuaciones:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m} \Rightarrow v = \frac{dE}{dt}$$

- Si la velocidad de las partículas es muy grande (comparable a la velocidad de la luz) su masa dependerá de su velocidad y por lo tanto también su cantidad de movimiento:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad \text{y} \quad p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

donde m_0 es la masa en reposo de la partícula y c la velocidad de la luz.

- La energía de una partícula puede escribirse entonces como la suma de dos términos, uno que representa el aporte de la energía en reposo y otro vinculado a la energía cinética.

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2$$

- Si $m_0=0$, como es el caso de la radiación, se tiene que $E=pc$ donde en este caso E y p representan la densidad de momento y de energía de la radiación. Recordando el resultado obtenido en el caso del efecto fotoeléctrico $E=h\nu$ (donde ν es la frecuencia de la radiación) se tiene entonces que: $pc = h\nu$ y finalmente $p = \frac{h}{\lambda}$.
- Este resultado obtenido para el caso de la radiación vincula la cantidad de momento lineal de la radiación, con la longitud de onda.
- Una expresión análoga, es propuesta por de Broglie para la materia, asociando una longitud de onda a la cantidad de movimiento de una partícula.

Actividad 11:

Actividad 11: El efecto Compton

Analizar el choque de un fotón de frecuencia ν_0 y momento lineal p con un electrón en reposo

Objetivo de la actividad 11: Analizar una experiencia en la que interaccionan la radiación y la materia y que no es tan familiar como el efecto fotoeléctrico. Observar, en particular, algunas de las propiedades de las partículas en el comportamiento de la radiación.

Observación: Los alumnos analizaron el efecto Compton a partir de una presentación inicial del tema a cargo del profesor del curso que consistió en la descripción de la experiencia de dispersión del fotón por el electrón en reposo. Con la guía del docente, los asistentes plantearon las ecuaciones de partida y hallaron la longitud de onda Compton. Se entregó luego un material de lectura a modo de resumen final elaborado a partir los textos de J Claramonte.(1995) y Wichmann (1996).

El centro de atención no estuvo puesto tanto en el formalismo que permite escribir la longitud de onda compton, sino en el hecho de que al fotón se le atribuye cantidad de movimiento al igual que a las partículas y por lo tanto en la colisión con el electrón, se conserva se conserva esta magnitud y la energía total, tal como sucede en un choque elástico.

Actividad 12: Observación de fenómenos ondulatorios

La clase anterior a esta actividad, se sugirió a los profesores que hicieran una lectura de repaso de los temas referidos a los fenómenos ondulatorios utilizando la bibliografía que les resultara más familiar. Se les entregó como alternativa un material escrito extraído de Claramonde (1995), que sería utilizado en la Actividad 13, sin que éste representara un texto a seguir.

Actividad 12: Observar las diferentes manifestaciones del comportamiento ondulatorio y estimar, cuando sea posible, los factores que determinan que se observe, o no, dicho comportamiento.

Se observará:

1. Interferencia y difracción de ondas en el agua (cubeta de ondas)
 - propagación de un frente plano
 - difracción a través de una abertura
 - interferencia de frentes que atraviesan dos aberturas
2. Ondas estacionarias (ondas en una cuerda sujeta en un extremo)
3. Batido (ondas sonoras)
4. Interferencia y difracción de luz (aberturas y obstáculos en el caso de la luz, redes de difracción)

Objetivo de la actividad 12: Visualizar aspectos del comportamiento ondulatorio: fenómenos de difracción e interferencia, condiciones sobre los tamaños de las aberturas u obstáculos en relación con la longitud de onda, límites de validez del modelo.

En esta actividad los alumnos observan diferentes manifestaciones de las ondas y discuten las condiciones que determinan los límites de validez del modelo ondulatorio. Se detalla a continuación las experiencias realizadas y sus objetivos específicos.

1) *Interferencia y difracción de ondas en el agua (cubeta de ondas)*

Objetivo específico: visualizar los diferentes comportamientos ondulatorios, poner en evidencia que fenómenos ondulatorios típicos en una cubeta de ondas, tales como la difracción, pueden dejar de observarse en casos en que los tamaños de las aberturas u obstáculos y las longitudes de onda del frente incidente no sean comparables.

En la cubeta de ondas los profesores pudieron visualizar diferentes comportamientos ondulatorios en el agua:

- *propagación de un frente plano:* se resaltó cómo el fenómeno se extendía en el plano de la cubeta (no localizable en el espacio) y se propagaba a través del tiempo a todas las regiones de dicho plano.
- *difracción a través de una abertura:* a partir de una abertura extensa, se observó cómo se iba curvando el frente de onda plano a la salida, a medida que el tamaño de la abertura disminuía. Se observó el fenómeno de difracción y se estimó la longitud de onda del frente concluyéndose que, se producía difracción cuando la misma era del orden del tamaño de la abertura. Se resaltó que para aberturas grandes comparadas con la longitud de onda, el frente no se curvaba y un modelo de rayos podía ser útil para la descripción en este caso. Es decir, el fenómeno ondulatorio, se evidencia para ciertos rangos de longitudes de onda y tamaños de aberturas. Se vinculó esta observación con la lectura de clase 2, en la que se discutió el modelo newtoniano corpuscular para la luz: si bien se estaba trabajando con otro medio, el agua, era fácilmente entendible que los tamaños de aberturas necesarios para visualizar fenómenos de difracción en la luz, deberían ser sensiblemente pequeños.

- *Interferencia de frentes que atraviesan dos aberturas:* colocando una doble rendija en la cubeta, se observaron máximos y mínimos de interferencia y nuevamente se sacaron conclusiones respecto de las condiciones sobre los tamaños de aberturas y longitudes de onda en que era posible visualizar el fenómeno
- *Efecto túnel:* colocando barreras se visualizó en algunos casos la transferencia de energía al otro lado de la barrera.

2) *Ondas estacionarias (ondas en una cuerda sujeta en un extremo)*

Objetivo específico: Mostrar un comportamiento ondulatorio en que no se evidencia propagación y que podría localizarse dentro de ciertos límites. Discutir un caso clásico de cuantificación de las frecuencias.

Se observó el movimiento oscilatorio de puntos de una cuerda sujeta en un extremo y sometida a una excitación periódica en el otro. Se discutió que el comportamiento de la onda no era el de una onda estrictamente viajera, sino que podían localizarse nodos y antinodos en puntos fijos del espacio a lo largo de la cuerda. Se entendió la onda como confinada en cierta región del espacio y variando la tensión de la cuerda se observaron varios modos normales de vibración. Se resaltó el hecho de que las condiciones de contorno imponían ciertas condiciones sobre las frecuencias posibles a las que la cuerda podía vibrar, es decir, las frecuencias de alguna manera estaban preestablecidas o *cuantificadas* y no se observaban en forma estacionaria ondas de frecuencias intermedias entre las frecuencias correspondientes a los modos normales de vibración.

3) *Batido (ondas sonoras)*

Objetivo específico: Observar cómo a superposición de dos de frecuencias próximas, reduce la extensión espacial de una onda armónica. Introducir la idea de paquete de onda y superposición de Fourier.

En el caso de ondas sonoras, se trabajó con diapasones de diferentes frecuencias y se observó el batido en el caso de dos diapasones de frecuencias próximas. Primeramente se hizo una observación cualitativa, en forma auditiva (escuchando en forma directa el batido del sonido resultante) y se interpretó el batido como una modulación en la amplitud de la onda sonora resultante. Luego, usando un micrófono conectado a una interfase, se visualizó a través de una computadora la señal modulada y se estimaron las frecuencias de las señales audibles y portadora. Se simuló luego la superposición de más de dos ondas y se observó la tendencia a formar paquetes de ondas al superponer muchas señales de frecuencias similares. Se introdujo la idea de la superposición de Fourier y se distinguió entre la velocidad de propagación y la velocidad de fase.

4) *Interferencia y difracción de luz (aberturas y obstáculos en el caso de la luz, redes de difracción)*

Objetivo específico: máximos de interferencia y de difracción, relación entre el orden de los máximos y el número de líneas de una red de difracción, variación de la intensidad luminosa en función del tamaño de diferentes aberturas y obstáculos.

Se trabajó con un láser de Helio-Neón iluminando diferentes redes de difracción y observando la distribución de máximos y mínimos sobre una pantalla. Se compararon las observaciones realizadas al iluminar redes de diferentes números de líneas y se analizó cómo el número de máximos de interferencia principales aumentaba al aumentar el número total de líneas. Se observó también, cómo afectaba el número de líneas por centímetro (es decir el tamaño de la línea), al ancho del máximo central de difracción. Se distinguieron las contribuciones de los fenómenos de difracción e interferencia y se concluyó que si las aberturas eran muy grandes frente a la longitud de onda incidente sólo se observaría un máximo central (los máximos de interferencia contenidos en el máximo central de difracción aparecerán superpuestos en una imagen única sin que se evidencie difracción ni interferencia, es decir, la luz *parecería* comportarse como un rayo o como una haz de partículas).

También se observó difracción e interferencia de luz (láser) por aberturas y obstáculos circulares y se resaltó la similitud entre ambos resultados.

Comentarios generales sobre la Actividad 12

Los profesores visualizaron diferentes fenómenos que, si bien conocían teóricamente, no todos habían tenido oportunidad de observarlos. En general la cubeta de ondas resultó familiar, aunque no todos recordaban las condiciones impuestas sobre el tamaño de la abertura en relación a la longitud de onda, para que sean observables los fenómenos de interferencia y difracción. También las ondas estacionarias y sus modos normales eran asunto alguna vez visto. Respecto al batido sonoro, si bien todos habían experimentado la sensación del batido golpeando dos diapasones de frecuencia cercana, no podían hacer una descripción formal del evento ni interpretarlo a partir de la modulación de las ondas. La visualización del batido en la computadora permitió interpretar el batido como una superposición particular de ondas que resulta en una cota espacial para la extensión de la onda en la que la amplitud es modulada, dando lugar a la sensación auditiva experimentada. Asimismo, la superposición de un número mayor de ondas a través de la simulación, permitió discutir el concepto de paquete de ondas, proponer una herramienta matemática para la descripción formal (superposición de Fourier) y establecer la diferencia entre las velocidades de fase y de propagación de la onda.

Los profesores se mostraron entusiastas y en algunos casos sorprendidos al constatar en forma tan sencilla resultados que sólo conocían teóricamente.

Se recordó que en la siguiente actividad se discutiría la teoría vinculada a los fenómenos observados y la necesidad de leer el material de lectura distribuido.

Actividad 13

Actividad 13: El modelo ondulatorio: contribución al modelo cuántico
Lectura del material suministrado sobre ondas mecánicas:

J.Lahera Claramonde (1995) Introducción a la física moderna en la enseñanza secundaria. Ed. Síntesis: Madrid.

En base a la lectura realizada, completar la tabla de propiedades de las ondas enunciadas en la Actividad 7

Objetivo específico de actividad 13: Destacar la importancia del modelo ondulatorio clásico como generador del nuevo modelo cuántico. Discutir aspectos de este modelo que aportan conceptos considerados pilares del modelo cuántico. Analizar específicamente casos de superposición de ondas (pulsos, ondas estacionarias, superposición de Fourier) que aportarán a la interpretación del modelo cuántico dual.

Desarrollo

Continuando con lo anticipado la clase anterior, en esta clase se discutieron las principales características del modelo ondulatorio. Los profesores asistentes habían leído el material de lectura con anterioridad. Este material se elaboró en base al texto de Claramonde (1995). Con el propósito de discutir algunos conceptos importantes considerados pilares del modelo cuántico que marcarán una ruptura con la Física Clásica, e identificar otros que no contribuirán significativamente, y habiendo los profesores leído el material base, esta actividad se desarrolló a través del trabajo en grupos de los docentes, con cierre parciales de cada tema en el pizarrón. Los principales temas desarrollados fueron:

- Refracción y reflexión de ondas
- Superposición de ondas (superposición de Fourier)
- Superposición e interferencia de ondas
 - a) ondas de igual frecuencia y amplitud que se propagan en igual dirección y sentido,
 - b) ondas de igual frecuencia y amplitud que se propagan en sentido opuestos,
 - c) ondas de igual amplitud pero de frecuencias levemente diferentes que se propagan en igual sentido.
- Difracción de ondas.

En el inicio de la clase se revisaron en forma conjunta los fenómenos de reflexión y refracción de ondas. Estos temas resultaron familiares ya que son aspectos presentes en la óptica geométrica, temática que integra la currícula que los profesores asistentes desarrollan en su labor docente. Se hizo especial hincapié en que dichos fenómenos son característicos del comportamiento ondulatorio general (es decir, no son exclusivos de las ondas luminosas) y se buscaron ejemplos en casos de ondas mecánicas. Resultó sorprendente para los alumnos ver que fenómenos como el efecto túnel también puede observarse en las ondas mecánicas clásicas.

Estos temas habían sido leídos previamente por los profesores por lo que se desarrollaron en forma sintética con el propósito de arribar rápidamente a la discusión de los fenómenos de superposición.

Se discutió la validez del principio de superposición para las ondas. Se presentaron diferentes tipos de superposición y luego los alumnos trabajaron en base a las lecturas realizadas y a la siguiente actividad que les proponía discutir los resultados de varios casos de interés.

Actividad 13.1: Superposición de ondas

Supongamos que dos ondas armónicas :

$$y_1(x, t) = y_{01} \text{sen}(k_1 x - \omega_1 t) \quad \text{e} \quad y_2(x, t) = y_{02} \text{sen}(k_2 x \pm \omega_2 t + \delta)$$

viajan en el mismo medio (y por lo tanto tienen igual velocidad de propagación), y se encuentran en un punto x del espacio, en el instante t .

Consideraremos los siguientes casos:

- las ondas tienen la misma frecuencia y se propagan en igual dirección y sentido,
- las ondas tienen la misma frecuencia y se propagan en sentido opuestos,
- las ondas se propagan en igual sentido pero sus frecuencias son levemente diferentes.

¿Cuál será respuesta del medio en ese punto en cada caso?. Trabaje analíticamente e interprete el resultado. Intente imaginar cómo sería la forma de la onda en cada caso y grafique. Si bien estos fenómenos son propios del comportamiento ondulatorio general, para simplificar, puede imaginar las ondas armónicas como ondas transversales propagándose a lo largo de una cuerda.

Los alumnos se dividieron en grupos cada uno de los cuales desarrolló uno de los casos. Antes de finalizar la clase, un representante de cada grupo expuso a sus compañeros las conclusiones del grupo. Esto permitió barrer los diferentes casos de superposición, con una participación activa de los alumnos y con una puesta en común final.

Se resaltaron, en particular, las características de las ondas estacionarias y de los pulsos. En el caso de las ondas estacionarias se hizo especial hincapié en la cuantificación de las frecuencias, y en el caso de los pulsos en la expresión $\Delta k \cdot \Delta x \approx 2\pi$ para las ondas. Se buscó establecer vínculos entre estos aspectos del modelo ondulatorio, las hipótesis de De Broglie y las relaciones de incerteza de Heisenberg y se establecieron analogías entre la superposición de estados cuánticos y la superposición de Fourier, como un anticipo de los temas que vendrían. Es de vital importancia dedicar especial atención al desarrollo de estos temas, ya que constituirán la base de fundamentación sobre la que se construirá la nueva física.

Por tal motivo, se transcriben a continuación algunas de las notas y comentarios del profesor en relación a la generación de pulsos. (La secuencia completa de notas del profesor propuesta puede verse en z-Anexo 5- Modelo de Ondas _Notas del profesor.) Particularmente se discutió en profundidad y detalle el caso de la superposición de dos ondas de igual amplitud pero de frecuencias levemente diferentes que se propagan en fase en el mismo sentido (generación de pulsos). Este es caso típico del batido sonoro que se escucha al golpear dos diapasones de frecuencias cercanas. Se observó cómo la modulación de la amplitud, confina la perturbación resultante en pulsos tanto más definidos cuanto más cercanas sean las frecuencias de las componentes. Así cuando se superponen dos ondas de igual amplitud y_0 y frecuencias cercanas w_1 y w_2 :

$$y_1(x,t) = y_0 \cdot \cos(k_1x - w_1t) \quad \text{y} \quad y_2(x,t) = y_0 \cdot \cos(k_2x - w_2t)$$

Resulta

$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t) = A(x,t) \cdot \text{sen} \left(kx - wt + \frac{\delta}{2} \right)$$

donde k y w son los valores medios de los números de ondas y frecuencias de las ondas que se superponen,

$$k = (k_1 + k_2)/2 \text{ y } w = (w_1 + w_2)/2.$$

En este caso, la amplitud es variable y depende tanto del tiempo como de la posición:

$$A(x,t) = 2y_0 \cos\left(\frac{\Delta k}{2}x - \frac{\Delta w}{2}t\right)$$

donde $\Delta k = k_1 - k_2$ y $\Delta w = w_1 - w_2$.

Es decir, la perturbación resultante tiene una frecuencia w cercana a las de las ondas participantes en la superposición pero su amplitud $A(x,t)$ variará en el

tiempo con un frecuencia $\frac{\Delta w}{2}$ sensiblemente menor que la de cualquiera de las componentes como se muestra en la figura 7.3.

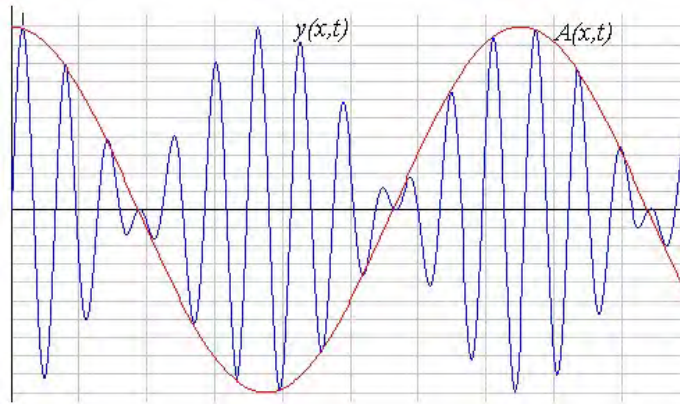


Figura 7.3: superposición de ondas de frecuencias cercanas

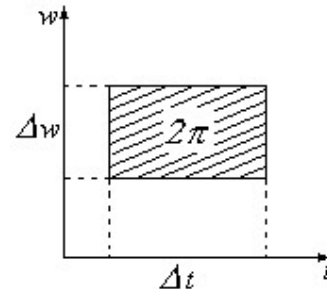
Se analizó a continuación cuál es la extensión temporal de cada pulso, es decir, cuánto tiempo duraría cada pulso si pudiéramos escucharlo. Esto es el tiempo que transcurre entre dos nodos de la amplitud (curva exterior):

$$\Delta t = T/2 = \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{w_{\text{amplitud}}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{\Delta w/2} \right) = \frac{2\pi}{\Delta w},$$

a partir de esta expresión puede escribirse la relación:

$$\Delta w \cdot \Delta t = 2\pi. \quad (1)$$

Se destacó que cuanto más cercanas sean las frecuencias, mayor será la extensión del pulso. Por el contrario, si las frecuencias son muy diferentes, la duración del pulso será muy corta y nuestro oído no será capaz de diferenciar entre pulsos sucesivos y percibirá sólo una señal extendida en el tiempo. Podríamos decir que existe una relación entre las incertezas de los valores de frecuencia presentes y la extensión temporal del pulso. Si se representa esta expresión en una gráfica de frecuencia en función del tiempo (w versus t), el producto $\Delta w \cdot \Delta t$ representa un área fija igual a 2π . Es decir, si se aumenta el largo horizontal, automáticamente deberá disminuir el alto para mantener el área $\Delta w \cdot \Delta t = 2\pi$.



De la misma manera se analizó también, cuál sería la extensión espacial del pulso. Esta información puede obtenerse a partir de la distancia entre nodos de la amplitud en un tiempo fijo, es decir de la semilongitud de onda asociada a la amplitud:

$$\Delta x = \frac{\lambda_{\text{amplitud}}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{\Delta k / 2} \right) = \frac{2\pi}{\Delta k}$$

A partir de lo cual podemos expresar :

$$\Delta k \cdot \Delta x = 2\pi \quad (2)$$

es decir, no puede disminuirse la extensión del pulso sin alterar el rango de longitudes de las componentes. También en este caso podríamos hacer una representación gráfica similar a la analizada para el caso temporal.

Este es un antecedente muy importante de las relaciones de incerteza de Heisenberg y razón por la cual no debieran considerarse como un principio estrictamente cuántico sino una consecuencia lógica de la extrapolación del modelo ondulatorio a las partículas. Veremos en adelante otras consideraciones que fortalecen esta hipótesis.

A continuación el profesor del curso estableció una relación entre los resultados arribados y aspectos de la radiación discutidos con anterioridad. Así, recordó a los asistentes la

expresión propuesta para la energía de la radiación en el efecto fotoeléctrico

$$E = hf = \frac{hw}{2\pi} \text{ de donde } w = \frac{E}{h/2\pi} = E/\hbar \text{ y diferenciando, } \Delta w = \Delta E/\hbar.$$

Reemplazando en la expresión (1) se obtiene:

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar \quad (3)$$

Asimismo, teniendo en cuenta que toda onda transporta cantidad de movimiento, que su densidad de energía por unidad de volumen es $E=pc$ (p densidad de momento), y que a partir de las expresiones que cuantifican la energía de la radiación $E=hf=hc/\lambda$, podemos escribir

$$p=h/k \text{ o bien } k=h/p \text{ y diferenciando, } \Delta k = \Delta p/\hbar$$

Reemplazando en la expresión (2) se llega finalmente a :

$$\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar \quad (4)$$

Aprovechamos aquí la oportunidad para destacar que la expresión $p=h/k$ se deduce a partir de la relación que Einstein propuso para cuantificar energía radiante, tradicionalmente considerada de índole ondulatoria, y que de Broglie atribuye la misma relación también a la materia. Es decir, la propuesta de de Broglie, plantea el verdadero hito del nacimiento de la física cuántica, el principio por excelencia y uno de sus pilares fundamentales. Por el contrario, las relaciones de Heisenberg pueden ser deducidas del modelo ondulatorio, por lo que no es correcto llamarlas *principio* de incertidumbre.

Comentarios:

Los profesores recordaban muy poco sobre el modelo ondulatorio. Este tema no pertenecía a la currícula de ciencias de la escuela media antes de la transformación educativa iniciada a partir de la Ley Federal. Actualmente los contenidos de Física para el nivel medio no han sido modificados sustancialmente y contemplan los fenómenos ondulatorios, pero las horas asignadas a Física en las diferentes terminalidades, no son suficientes. Únicamente en la modalidad que corresponde a la especialización en ciencias naturales y las orientaciones técnicas se destinan algunas horas más al área de Física, por lo que la escasez de tiempo, sumada a la falta de formación docente, resulta en un trata-

miento pobre, si no inexistente, de estos temas. Por esta razón, se consideró conveniente, dedicar un tiempo apreciable al tratamiento de las ondas, en particular a los fenómenos de interferencia y difracción, tan importantes en la interpretación del comportamiento ondulatorio de la materia.

Actividad 14: cierre del Módulo 3

Actividad 14: Cierre del Módulo 3

Lectura de: Agassi E. (1978). *Temas y problemas de la filosofía de la física*, cap. VIII, Ed. Herder: Barcelona.

Objetivo específico de la actividad 14: reflexionar sobre la dicotomía entre los modelos corpuscular y ondulatorio surgida a principios del siglo XX y la necesidad de un nuevo modelo que reúna características de ambos en una nueva concepción de la materia-radiación.

Comentarios.: La lectura resalta atributos clásicamente contrapuestos de la imagen corpuscular y la imagen ondulatoria, y que supuestamente no son aplicables a un mismo fenómeno. Comenta que, sin embargo en la mecánica cuántica, todo resulta ser a la vez partícula y campo, materia y radiación; es decir, todas las cosas presentan la estructura continua y las propiedades ondulatorias bien conocidas del campo, pero también la estructura discreta y las propiedades corpusculares de las partículas. A partir de esto, plantea que la *representación* del mundo físico se torna incierta, lo cual provoca auténticas dificultades de conceptualización.

Este texto resume el estado del pensamiento epistemológico de la física a comienzos del siglo XX: dos imágenes clásicas contrapuestas, las ondas y las partículas, y la necesidad de construir una nueva representación que superponga ambas imágenes.

Se recalcó, a partir de la lectura, que ése es el objetivo fundamental que se persigue en este curso.

Se transcribe a continuación el texto trabajado.



ONDAS, CORPÚSCULOS Y COMPLEMENTARIEDAD

Agassi, E. *Temas y problemas de la filosofía de la física*, cap. VIII, Ed. Herder Barcelona, 1978

Imágenes corpuscular y ondulatoria

Todos saben que la física que hoy llamamos clásica, es decir aquella que puede considerarse idealmente acabada a fines del siglo XIX, había llegado a una especie de gran cuadro sintético de los fenómenos naturales, dentro del cual los distintos conceptos se alineaban en torno a uno u otro de los polos de una bipartición fundamental. Por un lado estaban las *sustancias materiales*: esencialmente, los átomos de los distintos elementos químicos, a los que se suponía inmutables, y las moléculas de las más variadas sustancias obtenidas por unión química de estos átomos, y por otro lado estaban los *campos y radiaciones*: luz, calor radiante y electromagnetismo. La tendencia general respecto a esta clasificación consistía en considerar a las sustancias materiales como la base natural de los fenómenos físicos, mientras que, por el contrario, los campos y radiaciones eran considerados más bien como esquemas mentales y modelos lógicos para representar la evolución de los primeros. Esta postura se adoptó muy especialmente después de que fracasara el intento de «sustanciar» el campo mediante el concepto éter.

A cada uno de estos dos polos conceptuales se le atribuían algunas características propias. La materia se suponía constituida por *partículas*, y por tanto provista de una estructura *corpuscular y discreta*, y además *localizable* en una región circunscrita del espacio. Por el contrario los *campos y radiaciones tenían* naturaleza *ondulatoria y continua*, y debían pensarse como *extendidos* a todo el espacio y como portadores de *energía*.

En esta situación era del todo natural que físicos, confrontados con fenómenos nuevos que emergían en la escena de la investigación, intentaran encuadrarlos en uno u otro de los dos complejos conceptuales existentes.

Sin embargo, como es bien sabido, desde principios del siglo xx se revelaba cada vez más problemática la posibilidad de encuadrar los entes de la física en uno u otro de estos dos sectores. La teoría de la relatividad, aún cuando contenía algunas afirmaciones que no eran fácilmente conciliables con las ideas precedentes como por ejemplo la afirmación de que la masa y la energía no son entidades realmente distintas podía, sin embargo, considerarse en cierto sentido más como la coronación de la mecánica clásica que como el inicio de un nuevo período en la historia de la física. De hecho desembocaba en la eliminación del concepto de acción a distancia, eliminación que se había iniciado en cierto sentido con la teoría del potencial y que había encontrado una formulación casi perfecta en la teoría maxwelliana del campo electromagnético. Por otra parte no es casual que en la relatividad, materia y campo continúen siendo sustancialmente dos cosas distintas, aún cuando muy próximas, y por ello siguieron apareciendo como dos constituyentes fundamentales de la relatividad física.

Por el contrario, en el terreno de la física de los cuantos, el cuadro clásico se rompe de una manera significativa. En primer lugar Planck descubrió que los sistemas físicos sólo pueden *intercambiar* energía electromagnética por medio de bloques unitarios (cuantos de energía). Poco después Einstein demuestra que la energía en realidad sólo *existe* en bloques discretos (fotones), de tal manera que la dicotomía «discreto-continuo» no puede aplicarse para distinguir la materia (discreta) de la energía radiante (continua).

Después de estos primeros pasos que sustancialmente consistían en reconocer un cierto carácter corpuscular a las radiaciones, se produjeron otros desarrollos que, recorriendo conceptualmente el camino inverso, llevaron a reconocer una naturaleza ondulatoria a todas las partículas materiales. De hecho éstas se revela-

ron capaces de dar lugar a los fenómenos ondulatorios clásicos, tales como los de interferencia y difracción. No parece que debamos detenernos en ilustrar y discutir estos hechos bien conocidos, cuyo resultado fue la disolución del esquema interpretativo clásico del cual hemos hablado primeramente. A partir de aquí todo resultaba ser a la vez partícula y campo, materia y radiación; es decir, todas las cosas presentaban la estructura continua y las propiedades ondulatorias bien conocidas del campo, pero también la estructura discreta y las propiedades corpusculares no menos conocidas de las partículas.

Sin embargo, a causa de ello la *representación* que se puede hacer del mundo físico se torna incierta. De hecho no se puede negar que la superposición de las imágenes corpuscular y ondulatoria del mundo físico para describir un mismo fenómeno provoca auténticas dificultades de conceptualización. Sin entrar en detalles, por otra parte muy conocidos e incluso excesivamente discutidos en las publicaciones de tipo divulgativo, puede observarse que ya en la relación de Planck que establece la proporcionalidad entre la energía y la frecuencia que constituye la base de la mecánica cuántica, se encuentra inherente la dificultad fundamental. Se trata de que el concepto de energía debe referirse exclusivamente a una partícula individual, es decir a una cosa típicamente pequeña en extensión, mientras que el concepto de frecuencia se refiere, típicamente, a una onda, es decir a algo que se extiende en el espacio hasta ocuparlo, al menos idealmente, por entero. Las demás dificultades son de estructura análoga: la imagen corpuscular y la imagen ondulatoria presentan determinados atributos que intuitivamente aparecen como contrapuestos, y que por tanto no son aplicables a un mismo fenómeno.

7.4.4 Módulo 4: El nuevo objeto cuántico

7.4.4a Generalidades y objetivos

En el Módulo 3 se formalizaron las características de los modelos clásicos de partícula y de onda y se discutieron aspectos que aportarán a la descripción de un modelo dual para la materia. El modelo dual para la luz, discutido inicialmente en el módulo 2, es más familiar para los docentes asistentes, por el contrario, pocas veces han analizado casos en que es la materia quien presenta comportamiento dual.

En el módulo 4 los profesores se enfrentarán con fenómenos en que las partículas se comportan como ondas y se construirá un modelo matemático que describa su comportamiento. En este contexto, la función de onda se plantea como una necesidad más que como una definición. Se analiza la información que aporta la función de onda en cuanto a la probabilidad de encontrar una partícula en cierta región del espacio y se resuelven casos sencillos que ilustran su potencialidad.

El Módulo 4 se plantea los siguientes objetivos

- ✓ construir el modelo de un nuevo objeto cuántico que permita explicar su comportamiento ondulatorio de la materia y la radiación a nivel cuántico.
- ✓ asociar una función de onda a este nuevo objeto cuántico y analizar su potencialidad en diferentes situaciones
- ✓ construir la ecuación de Schrödinger para el caso de una partícula en una dimensión.

7.4.4b Comentarios generales sobre las actividades del módulo 4

En esta sección, se analiza el comportamiento ondulatorio de la materia (el comportamiento de la radiación ya fue analizado en el módulo 2) y se construye un modelo para los objetos cuánticos que conjuga propiedades de ondas y partículas. Inicialmente se discute la experiencia de Feynman que permite comparar el comportamiento de ondas y partículas que atraviesan un sistema de dos aberturas y se extrapola este comportamiento a los electrones. A partir de esta experiencia ideal se analizan similitudes y diferencias en el comportamiento en cada caso y se establece la necesidad de asociar una función similar a la que describe una onda al electrón que llega a una pantalla luego de atravesar una abertura del orden de su tamaño. En este contexto, la asociación de una frecuencia y una longitud de onda a la partícula surgen como una cuestión que se deriva de su comportamiento ondulatorio.

Luego, se discuten las consecuencias de extrapolar a las partículas otros aspectos propios de la teoría ondulatoria. Se trabaja más en profundidad el concepto de longitud y frecuencia asociada (de Broglie), las limitaciones en la posibilidad de determinar con exactitud posición y cantidad de movimiento (relaciones de incerteza de Heisenberg), definición de la probabilidad a partir de la función de onda, las partículas confinadas y su analogía con las ondas estacionarias y cómo este modelo llevaría a predecir las limitaciones en los valores de posible de la energía (cuantificación de la energía y estados prohibidos). Se discute el problema de los espectros atómicos y su relación con el modelo de Bohr y se presenta el número cuántico principal.

Finalmente, se construye una ecuación para la función de onda propuesta para el nuevo objeto cuántico, que conjuga aspectos descriptivos de partículas y ondas: *la ecuación de Schrödinger*.

El módulo incluye la resolución de problemas de aplicación vinculados a cálculo de longitudes de onda de objetos grandes y pequeños (de Broglie), cálculo de tamaño del átomo (relaciones de incerteza de Heisenberg), cálculo de probabilidades de localización de una partícula a partir de la función de onda (interpretada como densidad de probabilidad), aplicaciones de la ecuación de Schrödinger en casos sencillos (partícula libre, confinada en una dimensión, pozo de potencial infinito y semi-infinito, efecto túnel).

Luego de esto, se presenta el caso del átomo de hidrógeno en coordenadas esféricas, se definen los números cuánticos asociados a otras dimensiones espaciales, se establece el principio de exclusión de Pauli para átomos multielectrónicos, se observan los valores de energía de las capas superiores y se discute *superposición de capas*, y se analiza la conformación de la tabla periódica. Se discute finalmente la conformación de los sólidos y los grados de libertad que se agregan al considerar vibraciones y rotaciones internas en las moléculas.

En este informe de tesis, por razones de extensión, sólo se presentan las actividades 15 a 20 vinculadas a la construcción del objeto cuántico.

7.4.4c Actividades del módulo 4

Contenidos

Análisis de algunos experimentos conflictivos. Difracción e interferencia de partículas. La interpretación de la difracción e interferencia de luz desde el modelo de fotones. Amplitud de probabilidad. Concepto de superposición de estados.

Un nuevo modelo para la partícula libre y el fotón. Asociación velocidad de grupo a la velocidad de la partícula. Consecuencias que se derivan de aplicar un modelo ondulato-

rio a las partículas. Relación de De Broglie. Relaciones de incerteza para las partículas (Heisenberg). Limitación en la posibilidad de conocer simultáneamente y con certeza posición y momento de la partícula. Ejemplos.

Las observaciones macroscópicas del carácter ondulatorio de la materia y el carácter discreto de la radiación. Ordenes de magnitud de las constantes fundamentales.

El problema de los espectros. Cuantificación de las frecuencias observadas. Series de Lyman y Balmer. La cuantificación de la energía y las ondas estacionarias. La ecuación $\Delta E = h \cdot \nu$ y sus características. La ecuación de Schrödinger para ondas estacionarias. Características de la función de onda. Consecuencias sobre el modelo de partícula. Los orbitales. Interpretación probabilística y superposición de estados. Resolución de casos sencillos. El átomo de hidrógeno. Efecto túnel. Los números cuánticos.

Introducción a cargo del profesor:

“Hemos visto que la propagación de las ondas a través del espacio es muy diferente de la propagación de las partículas. Las ondas se curvan alrededor de las esquinas de un obstáculo (difracción) e interfieren entre sí produciendo diagramas de interferencia. Cuando una onda incide sobre una pequeña abertura, se propaga al otro lado como si la abertura fuera un foco puntual. Cuando dos ondas de igual intensidad I_0 y procedentes de focos coherentes se encuentran en el espacio, el resultado puede ser una onda de intensidad $4I_0$ (interferencia constructiva), de intensidad cero (interferencia destructiva) o de intensidad comprendida entre cero y $4I_0$, según la diferencia de fase que exista entre las ondas en su punto de encuentro.

La propagación de las partículas es muy diferente. Sus trayectorias están perfectamente definidas y cuando se encuentran en el espacio, nunca producen un diagrama de interferencia.

Las partículas y las ondas también intercambian energía de modo muy distinto. Las partículas intercambian energía en los choques que tienen lugar en puntos específicos

en el espacio y en el tiempo. En cambio, la energía de las ondas se difunde en el espacio y se deposita continuamente cuando la onda interactúa con la materia.

Algunas veces la propagación de una onda no se distingue de la correspondiente a un haz de partículas. Cuando la longitud de onda λ es muy pequeña comparada con el tamaño de aperturas u obstáculos, los efectos de difracción son despreciables y la onda parece propagarse a lo largo de una trayectoria bien definida. Igualmente, los máximos y mínimos de interferencia están tan próximos en el espacio que resultan inobservables. Del mismo modo, cuando tenemos muchas partículas pequeñas intercambiando cada una de ellas una pequeña cantidad de energía, el intercambio no se distingue del correspondiente a una onda. Por ejemplo no podemos detectar el choque de las partículas individuales de aire sobre nuestra cara al soplar el viento, y en cambio, percibimos la interacción de miles de millones de estas partículas en su conjunto como si se tratara de una onda.

A principios del siglo xx se pensaba la luz y otras radiaciones electromagnéticas tales como las de radio eran ondas, mientras se consideraba que electrones, protones, átomos y otros constituyentes de la naturaleza eran partículas. Durante los primeros 30 años del siglo XX se hicieron avances sorprendentes tanto en la física teórica como en la experimental, tales como el hallazgo de que la luz - que se consideraba una onda- intercambiaba energía en cantidades discretas (o cuantos) del mismo modo que las partículas y que a su vez, los electrones - que se consideraban partículas- presentan difracción e interferencia cuando se propagaban por el espacio, tal como lo hacen las ondas. El comportamiento ondulatorio de las partículas será el principal tema a desarrollar en este módulo (Tipler, 2000). ”

Actividad 15

Actividad 15: El comportamiento ondulatorio de las partículas

Lectura: Feynman, R.; Leighton, R. y Sands, M. (1987). *Física*. Vol III: Mecánica Cuántica. Secciones 37-1 a 37-7. Addison-Wesley Iberoamericana: Wilmington, Delaware, USA.

Objetivo específico de actividad 15: Predecir el comportamiento de ondas y objetos macroscópicos sobre una pantalla, luego de atravesar un sistema de doble rendija.

Analizar el comportamiento de electrones en un experimento ideal similar y establecer patrones de diferencias y similitudes con los caso anteriores.

Plantear la necesidad de una función de onda llamada *amplitud de probabilidad* para asociar a los electrones y describir su comportamiento en la experiencia planteada.

Principales aspectos a destacar:

Experimento con ondas: cuando una onda atraviesa un sistema de doble rendija -cuyo tamaño es del orden de la longitud de onda-, se generan dos ondas idénticas que se desfasan en el camino recorrido hasta llegar a una pantalla colocada detrás de las rendijas, generando patrones de interferencia sobre la misma. Entonces, si:

A_1 y A_2 son las amplitudes de las ondas e I_1 e I_2 son las intensidades de energía de cada onda, entonces:

$$I_1 \propto |A_1|^2$$

$$I_2 \propto |A_2|^2$$

y resulta: $I_{total} \propto |A_1 + A_2|^2 \neq I_1 + I_2$

Es decir, si bien sus amplitudes se suman (teniendo en cuenta el desfase) la intensidad detectada sobre la pantalla no es la suma directa de las intensidades de cada onda: se produce interferencia.

Experimento con proyectiles: análogamente al experimento anterior realizado con ondas, se analiza la acumulación de impactos de proyectiles sobre una pantalla colocada detrás de un sistema de doble rendija. Se supone los proyectiles indestructibles, es decir, no pueden dividirse en mitades (en analogía con los electrones), por lo tanto cada detección corresponde al impacto de un proyectil entero. Entonces, si:

P_1 = distribución de probabilidad para los proyectiles que pasan por el agujero 1 cuando el 2 está tapado.

P_2 = distribución de probabilidad para los proyectiles que pasan por el agujero 2 cuando el 1 está tapado

P_{total} = distribución de probabilidad para los proyectiles que llegan a la pantalla cuando ambos agujeros están abiertos

Resulta: $P_{total} = P_1 + P_2$

Es decir, se observa que la distribución de probabilidad de hallar un impacto en cierto lugar de la pantalla es la suma directa de las distribuciones de probabilidades de que los proyectiles pasen por uno u otro agujero separadamente: *no hay interferencia*.

Experimento con electrones: Se imagina un experimento ideal similar a los anteriores, pero donde los proyectiles son electrones y el espaciamiento de las rendijas tan pequeño como el orden de magnitud del tamaño de los electrones. Los electrones se consideran indivisibles, por ser partículas elementales., por lo tanto pasan a través de una u de otra abertura, análogamente a los proyectiles y a diferencia de un tren de ondas.

Sin embargo, si:

P_1 = distribución de probabilidad de los electrones que pasan por el agujero 1 cuando el 2 está tapado.

P_2 = distribución de probabilidad de los electrones que pasan por el agujero 2 cuando el 1 está tapado.

P_{total} = distribución de probabilidad de los electrones que llegan a la pantalla cuando ambos agujeros están abiertos (es decir que no importa por dónde pasen).

Resulta: $P_{total} \neq P_1 + P_2$

Es decir la distribución de probabilidad de que un electrón impacte en cierto lugar de la pantalla *no es la suma directa* de las distribuciones de probabilidades de los electrones pasen por uno u otro agujero separadamente: *hay interferencia (comportamiento similar a l de las ondas)*.

Pero si imaginamos un sistema de detección que permita identificar el agujero por el que pasa cada electrón, entonces resulta: $P'_{total} = P_1 + P_2$,

Es decir, cuando observamos los electrones, *no hay interferencia (comportamiento similar al de las partículas)*. La observación significa una interacción con el electrón e influye en su comportamiento a tal punto que decide si el electrón se comportará como una onda (mostrando interferencia) o como una partícula (que no interfiere).

Concluimos que cuando no se interacciona con las partículas, éstas presentan comportamiento ondulatorio.

Cierre de la Actividad 14 (comentario a cargo del profesor):

“Feynman propuso el experimento a finales de los 50 pero nunca pensó que pudiera llegar a realizarse. En 1961 Claus Jönsson lo logró utilizando un haz de electrones. La versión más ambiciosa del experimento la realizó Akira Tonomura en 1989, confirmando trabajos previos de Pier Giorgio Merli. Tonomura logró lanzar contra la doble rendija electrones, de uno en uno, asegurándose así que cada electrón pudiera tan solo interferir consigo mismo.” (en <http://dobleandoalarazon.blogspot.com/2010/06/juega-dios-los-dados.html>)

Actividad 16

Actividad 16: Diagramas de difracción de partículas y fotones

Observar diferentes diagramas de interferencia de rayos XX, electrones, neutrones y protones y analizar desde la perspectiva del experimento ideal analizado en la actividad anterior.

Videos y animaciones que muestran difracción de partículas

Objetivo específico de actividad 16: Observar evidencias experimentales del comportamiento ondulatorio de la materia y compararlo con el comportamiento de la radiación en circunstancias similares.

Observación: Los profesores se sorprendieron al ver la similitud entre los fotogramas de difracción de rayos X y de partículas llevadas por el docente del curso, a pesar que habían aceptado como plausibles las cuestiones discutidas en la Actividad 15.

De la discusión emerge la necesidad de construir un nuevo modelo para los objetos cuánticos, que permita describir comportamientos a escala microscópica.

Comentarios a cargo del profesor del curso

Se recuerda el párrafo leído en Feynman: “...los electrones se comportan exactamente como la luz ... todos son ondas corpusculares o como quieran llamarlas... de modo que lo que aprendemos respecto a las propiedades de los electrones se aplicará a todas las “partículas” incluyendo los fotones de luz”

Se propone definir una función, que juegue un rol similar a la amplitud de las ondas, a partir de la cual pueda estimarse la probabilidad de encontrar un electrón sobre la pantalla. Esta función, a la que llamaremos amplitud de probabilidad Ψ verifica que:

- la probabilidad de un evento en un experimento ideal viene dada por el cuadrado del valor absoluto de la amplitud de probabilidad ϕ , de forma tal que si:

$$P = \text{probabilidad} \quad \text{y} \quad \Psi = \text{amplitud de probabilidad}$$

Resulta, $P = |\Psi|^2$

- cuando un evento ocurre en varias formas alternativas, la amplitud de probabilidad del evento es la suma de las amplitudes de probabilidades para cada uno considerado individualmente. Hay interferencia.

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$$

$$P = |\Psi_1 + \Psi_2|^2$$

- si se ejecuta un experimento que sea capaz de determinar si una u otra alternativa es la que realmente ocurrió, la probabilidad del evento es la suma de las probabilidades de cada alternativa. La interferencia se pierde.

$$P = P_1 + P_2$$

Se sugiere, además, asociar al electrón una longitud de onda y una frecuencia según postula de Broglie a través de la relación $p = \frac{h}{\lambda}$ y las relaciones de incerteza $\Delta x \cdot \Delta p \approx h$ obtenidas para la radiación (ver Actividad 10).

Actividad 17 y 18

Actividad 17: Cálculo de longitudes de onda de de Broglie

- Determinar la longitud de onda de de Broglie correspondiente a una masa de 10^{-6} g que se mueve a una velocidad de 10^6 m/s (Rta: $6,63 \cdot 10^{-19}$ m, mucho menor que el diámetro del núcleo atómico, a pesar de la reducida velocidad)
- Hallar la longitud de onda asociada a una pelota de béisbol de 0,17kg que se mueve a 100 km/h
- Hallar la longitud de onda asociada a un electrón de energía cinética 10 eV. (Rta.: 0,388 nm, del orden del tamaño del átomo o del espaciado entre átomos de un cristal, por lo que puede ser difractado por una lámina cristalina)
-

Actividad 18: Estimación del tamaño del átomo de hidrógeno a partir de las relaciones de incerteza (radio de Bohr)

Objetivo específico de las actividades 16 y 17:

Aplicar las relaciones de de Broglie y Heisenberg en diferentes casos, familiarizar a los profesores asistentes con los órdenes de magnitud asociados a longitudes de onda de de Broglie de objetos pequeños y macroscópicos.

Observaciones

- Los valores de λ para partículas macroscópicas son tan pequeños que explican por qué no observamos interferencia en el caso del experimento con proyectiles. En este caso, los diagramas de interferencia se hacen tan finos, que no pueden distinguirse los máximos y mínimos separados y sólo se observa una especie de promedio, que es la curva clásica.
- El valor estimado del tamaño del átomo de hidrógeno a partir de la energía de un sistema clásico de una carga (el electrón) con momento lineal y energía potencial eléctrica debido a su interacción con otra carga de igual magnitud y signo opuesto (el protón), es aproximadamente igual al radio de Bohr si se impone que el momento y el radio están relacionados a través de las relaciones de incerteza vistas para el caso de los pulsos de ondas y propuestas por de Broglie para la materia $p.a \propto h$

Actividad 19

Actividad 19: La necesidad de construir un nuevo cuántico. Sus características. (Actividad a cargo del profesor)
El profesor presentará información de interés vinculada a la comprobación experimental del comportamiento ondulatorio de la materia y conducirá un diálogo durante el cual se discutirán las propiedades de las ondas a incluir en el modelo de un nuevo objeto cuántico, y sus derivaciones.

Objetivo específico de la actividad 18:

Destacar las propiedades de la teoría ondulatoria que es necesario imponer a las partículas para explicar su comportamiento cuántico y explicitar las consecuencias que esto conlleva.

Desarrollo a cargo del docente del curso:

El comportamiento ondulatorio de los electrones fue observado por primera vez por C. J. Davisson y L. H. Germer. En 1927, observaron accidentalmente que la dispersión de electrones por un blanco de níquel mostraba máximos y mínimos de intensidad, es decir, observaron difracción e interferencia de electrones. La longitud de onda del diagrama observado, coincidía con la calculada a partir de la relación propuesta por de Broglie correspondiente a la energía de los electrones que utilizaban. En el mismo año, G. P.

Thomson, (hijo de J. J. Thomson, descubridor del electrón como partícula constituyente del átomo), también observó la difracción de electrones transmitidos a través de hojas delgadas de metal.

Estamos construyendo un nuevo objeto, no es una onda y tampoco es una partícula en el sentido clásico. Es un objeto de naturaleza diferente, portador de energía y momento y que se propaga como una onda, pero intercambia energía como una partícula.

Texto motivador (Feynman)

... A uno le gustaría preguntar: “¿Cómo funciona esto? ¿Cuál es el mecanismo de la ley?” Nadie ha encontrado ningún mecanismo detrás de la ley. Nadie puede “explicar” nada más de los que ya hemos “explicado”. Nadie les dará una respuesta más profunda de la situación. No tenemos idea acerca de un mecanismo más básico del que puedan deducirse estos resultados... (Richard Feynman)

¿Qué otras consecuencias se derivan de imponer a las partículas un modelo de onda?

- Pérdida de localización: este aspecto se refleja en las relaciones de incerteza de Heisenberg ya vistas en la Actividad 13 del módulo 3:

$$\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar \quad \text{y} \quad \Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar$$

Las cuales expresan la imposibilidad de precisar la posición de una partícula a la vez que su cantidad de movimiento, o su energía en un instante dado.

- Imposibilidad de predecir el estado de la partícula (carencia de una ley de movimiento en el sentido determinista clásico). Cuando una partícula participa de un evento que puede ocurrir de varias formas posibles (en el caso del experimento ideal el electrón llegaba a la pantalla habiendo pasado el agujero 1 o por el agujero 2), su estado viene descrito por una superposición de funciones de onda o amplitudes de probabilidad, que representan los “estados posibles del sistema”. En la medición, sólo una de ellas se manifiesta. Una situación análoga en física clásica la encontramos en el caso de un pulso que, como vimos en el módulo 3, puede describirse por una superposición de ondas armónicas de amplitudes, frecuencias y velocidades de fase particulares y una velocidad de grupo resultante. Un sintonizador, “sintoniza” una de las tantas frecuen-

cias presentes y ésta es la que detecta. En el caso del experimento de la doble abertura, podríamos pensar en asociar a cada electrón dos posibles amplitudes de probabilidades: Ψ_1 si pasó por el agujero 1 y Ψ_2 si pasó por el agujero 2. El estado de cada electrón vendría dado por una amplitud de probabilidad total que representa la superposición de ambas posibilidades o estados:

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$$

en acuerdo a lo sugerido por Feynman.

Si no se interacciona con la partícula, la probabilidad de encontrarla una partícula en cierto lugar del espacio será proporcional al cuadrado de la amplitud total.

$$P = |\Psi_1 + \Psi_2|^2$$

Si intentamos determinar por dónde pasa la partícula, la superposición de estados se romperá, el electrón se manifestará en uno u otro estado, y no evidenciará efectos ondulatorios.

Si interesa determinar la probabilidad de encontrar una partícula en una región extensa del espacio, la función de onda deberá dar la densidad de probabilidad. En una dimensión sería:

$$P(x) = \int |\Psi|^2 dx$$

En general Ψ es función de la posición y del tiempo, excepto para el caso de ondas estacionarias en que sólo dependerá de la posición.

El comportamiento de una partícula “confinada” en una región del espacio es análogo al una onda estacionaria clásica fija en ambos extremos. En el caso clásico la perturbación está confinada a la región del espacio en que se manifiesta la onda, las longitudes de onda están determinadas por la extensión de la región y las frecuencias resultan ser múltiplos enteros de cierta frecuencia fundamental, es decir la frecuencia y la energía están cuantizadas presentando varios modos de vibración que se superponen llamados armónicos. En el caso de las partículas confinadas en una región del espacio, veremos que también se manifiestan sólo ciertos valores de energía posibles, es decir, la energía

está cuantizada y, por lo tanto, también lo estarán los cambios de energía. Una partícula confinada en una caja, sólo absorberá o emitirá energía en cantidades discretas perfectamente determinadas.

Frase motivadora (a manera de cierre de esta actividad)

“Nos gustaría poner énfasis en una diferencia muy importante entre la mecánica clásica y cuántica. Hemos estado hablando sobre la probabilidad de que un electrón llegue en una circunstancia dada. Hemos supuesto que en nuestro dispositivo experimental (o aún en el mejor posible) debería ser imposible predecir exactamente qué va suceder. ¡Solamente podemos predecir las probabilidades! Esto significa que, de ser verdad, la física ha desistido del problema de tratar de predecir exactamente lo que va a suceder en una determinada circunstancia. ¡Sí! La física ha desistido. No sabemos cómo predecir qué sucedería en una circunstancia dada, y ahora creemos que esto es imposible, que lo único que puede ser predicho es la probabilidad de diferentes eventos. Debe reconocerse que esto es una disminución en nuestro primitivo ideal en la comprensión de la naturaleza. Puede ser un paso atrás, pero nadie ha encontrada cómo evitarlo”.
(Feynman)

Actividad 20

Actividad 20: Otro indicio de la cuantificación de la energía: los espectros atómicos

Observar los espectros luminosos de la luz emitida por una lámpara de mercurio, de sodio y otras sustancias. Observar imágenes de los espectros de emisión y absorción del hidrógeno.

Objetivo específico de la actividad 19:

Discutir otra de las experiencias conflictivas de los inicios de la mecánica cuántica: los espectros de emisión y construir un modelo del comportamiento de la materia basado en la cuantificación de la energía. Relacionar este modelo con los postulados de Bohr.

Cuestiones a resaltar

- Cada material tiene asociado determinadas líneas espectrales que los identifican
- Los materiales absorben cierta energía y la devuelven (absorben ciertos colores y reflejan otros)
- Los científicos determinaron experimentalmente que:

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \text{ con } n_2 > n_1 \quad (1)$$

y donde R_{∞} es la constante de Rydberg ($R_{\infty} = 1,096 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ para el caso del hidrógeno)-

- Expresando λ en función de la frecuencia, y teniendo en cuenta la ecuación de Einstein

$E = h\nu$, puede escribirse:

$$E = h\nu = R_{\infty} ch \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \quad (2)$$

$$E = En_2 - En_1 \text{ donde } E_n = \frac{R_{\infty} hc}{n^2} \quad (3)$$

Para el electrón (con $n=1$) se tiene $E_n = 13,6eV$

(1) y (3) relacionan la longitud de onda observada en los espectros, con cierto cambio en la energía del átomo. Es decir, puede pensarse en ciertos niveles de energía posibles para el electrón, el electrón no puede emitir o absorber cualquier valor de energía, sino que existen sólo ciertos niveles permitidos, lo cual equivale a afirmar que la energía está cuantificada.

- Bohr asimila este hecho a un modelo de órbitas permitidas en las que mágicamente el electrón no irradia a pesar de poseer cantidad de movimiento y aceleración centrípeta. De esta forma Bohr explica los espectros observados y la estabilidad de los átomos. Sin embargo, este modelo es insuficiente para átomos multielectrónicos.

Comentario

El modelo de Bohr se presenta en esta propuesta como un modelo de gran utilidad en su momento para explicar el problema de los espectros y la estabilidad de los átomos, pero actualmente superado. El desarrollo histórico de los modelos propuestos para explicar la estructura de la materia desde Dalton hasta Bohr será uno de los temas de las monografías que presentarán los asistentes como la evaluación del curso.

Actividad 21

Actividad 21: La función de onda

Proponer una función de onda para la partícula y deducir una expresión que vincule su energía con su comportamiento ondulatorio.

Analizar casos particulares:

i) partícula libre

ii) partícula en un estado independiente del tiempo

iii) partícula confinada: pozo de potencial, barrera de potencial (efecto túnel)

Objetivo específico de las actividad 20: Presentar la ecuación de Schrödinger y adquirir un manejo formal aceptable en casos sencillos.

Comentario

Esta actividad consta de dos partes. En la primera, el profesor presenta la ecuación de Schrödinger (como se describe a continuación) y luego los profesores resuelven casos sencillos. Se requiere una fuerte presencia del profesor del curso en este caso.

Presentación de la ecuación de Schrödinger (resumen de las notas del profesor del curso)

Vimos en las secciones anteriores que las partículas presentan un comportamiento ondulatorio. Expresamos su energía y su momento como:

$$E = \hbar\omega \quad \text{donde } \hbar = \frac{h}{2\pi} \quad \text{y } p = \hbar k \quad \text{donde } k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4)$$

¿Cuál es entonces la ecuación de onda asociada? Clásicamente la energía total de una partícula puede escribirse como:

$$E = \frac{p^2}{2m} + U$$

donde el primer término representa la energía cinética y U es la energía potencial.

Así como las funciones que describen las ondas verifican la ecuación de onda, Schrödinger presenta una ecuación de onda para esta nueva función que describe el comportamiento ondulatorio de una partícula. Reemplazando las expresiones (4):

$$\hbar\omega = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + U \quad (5)$$

Asociemos a la partícula una función similar a la de las ondas $\psi(x, t) = A_0 \cdot e^{i(kx - \omega t)}$ y multipliquemos ambos miembros de la expresión (5) por ψ :

$$\hbar\omega\psi = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}\psi + U\psi \quad (6)$$

Observemos que $\frac{\partial\psi}{dt} = -i\omega\psi$ y que $\frac{\partial^2\psi}{dx^2} = -k^2\psi$, reemplazando en (6) tenemos:

$$i\hbar \frac{\partial\psi}{dt} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2\psi}{dx^2} + U\psi \quad (7) \text{ Ecuación de Schrödinger (general)}$$

Notar que la ecuación Schrödinger es una ecuación de onda diferente a la clásica, ya que aparece la primera derivada en el tiempo y no la segunda. Su solución matemática llevará a la necesidad de plantear menos condiciones de contorno que en el caso clásico y por lo tanto, el estado del sistema no podrá determinarse con la misma certeza que en mecánica clásica. Este hecho, justifica matemáticamente la incerteza presente en la mecánica cuántica la cual no tiene raíz en dificultades en las mediciones, sino en el diseño mismo del modelo cuántico.

Los profesores asistentes analizan la expresión de la ecuación de Schrödinger en algunos casos particulares como en el de una partícula libre ($U=0$) moviéndose en una dimensión, estados de energía independientes del tiempo, estados estacionarios.

Se resuelven ejemplos sencillos y se calcula la probabilidad de encontrar una partícula en cierta región del espacio, a partir de la solución encontrada. Se determinan las condiciones de contorno a partir del análisis de la probabilidad de hallar la partícula en cada zona, estableciendo claramente el carácter probabilístico de su comportamiento y resaltando la interpretación de la función de onda como densidad de probabilidad y no como ley de movimiento. Se analizan los valores de energía posibles, se destaca la cuantificación de dichos valores en cada caso y se interpreta su significado. Se presenta el efecto túnel como aplicación del tema.

Cuestiones a destacar en las actividades que siguen:

Una vez analizado el comportamiento ondulatorio de una partícula en una dimensión, se presenta el átomo de hidrógeno en estado estacionario como un sistema en tres dimensiones cada una de las cuales introduce una cuantificación que se describe a través de un número cuántico.

$$\psi(r, \varphi, \theta) = R(r) \cdot \Phi(\varphi) \cdot \Theta(\theta)$$

Así en coordenadas esféricas la función de onda será dependerá de r , φ y θ y la resolución introducirá los número cuánticos n , l y m_l que establecerán los posibles niveles de energía en cada caso.

Se destaca aquí que la función $\psi(r, \varphi, \theta)$ llamada *orbital*, no representa el orden de la “órbita” en que se mueve un electrón, sino que es una herramienta útil para determinar si dicho electrón está o no en cierta región del espacio. La función ψ representa uno de los posibles estados en que puede estar partícula y la probabilidad de encontrarla en dicho estado vendrá dada por $P = \int |\psi|^2 dx$ (en una dimensión)

Asimismo, la solución más general de la ecuación de Schrödinger será la suma de las soluciones posibles, o sea, la solución general ψ es el estado general de la partícula, es decir la partícula estará en una superposición de estados posibles.

Se recuerda la experiencia de Feynman en que el electrón en una superposición de dos estados: el estado que corresponde al paso de la partícula por la abertura 1 y el estado que corresponde al paso de la partícula por el agujero 2. Se relata la paradoja del gato de Schroedinger y se discute el texto de Dirac sobre superposición de estados.

Frase de cierre

Einstein no aceptaba lo que parecía derivarse de la física cuántica. Y sentenció con una de sus famosas frases: "Dios no juega a los dados con el universo". Stephen Hawkins años después replicó: "Dios juega a los dados y los echa además donde no podemos verlos"

(en: <http://doblegandoalarazon.blogspot.com/2010/06/juega-dios-los-dados.html>)

7.5 El cierre de la propuesta

En lo que sigue, se profundiza en la definición de los números cuánticos, se establece el principio de exclusión de Pauli para átomos multielectrónicos, se observan los valores de energía de las capas superiores y se discute *superposición de capas*, y se analiza la conformación de la tabla periódica. Se analiza, además, la conformación de los sólidos y los grados de libertad que se agregan al considerar vibraciones y rotaciones internas en las moléculas.

Finalmente en los módulos siguientes se trataron, a través de la lectura y discusión de artículos de investigación publicados en revistas de reconocimiento internacional, otras cuestiones alrededor de la Mecánica cuántica y su implementación didáctica (*Módulo 5*), y la interpretación de Copenhague y otras cuestiones históricas referidas a los aportes de la física precuántica (*Módulo 6*).

La descripción de las actividades realizadas en los módulos 5 y 6 no se incluyen en este informe.

La evaluación del curso consistió en la exposición de un tema vinculado a la temática del curso dos semanas después de la finalización, que debía incluir, si correspondía, una propuesta de implementación en el aula. Algunos temas a desarrollar fueron propuestos por el profesor del curso y se dejó la posibilidad de proponer otros que fueran del interés personal

de alguno de los asistentes. Una vez acordados los temas de desarrollar, los asistentes eligieron cuál desarrollaría cada uno. Los temas propuestos fueron los siguientes:

Tema 1: Analice en la bibliografía disponible para el nivel medio (al menos 5 libros) en relación con su enseñanza en el tercer año de la Educación Polimodal.

- Cómo presentan los temas de FQ
- Qué secuencia de temas adopta cada uno
- Qué modelos de átomo discuten.
- Qué profundidad alcanzan en su desarrollo.
- Qué dificultades conceptuales introducen y cómo intentan resolverlas
- Cómo presentan o no las cuestiones básicas de la MQ, (incerteza, superposición de estados, orbitales, funciones de onda, comportamiento dual, etc.)

Deberá incluir un comentario personal de ventajas e inconvenientes de cada texto

Tema 2: Analice en la bibliografía disponible para el nivel universitario básico (al menos 5 libros) en relación con su enseñanza en el tercer año de la Educación Polimodal.

- **Cómo presentan los temas de FQ**
- **Qué secuencia de temas adopta cada uno**
- **Qué modelos de átomo discuten,**
- **Qué profundidad alcanzan en su desarrollo.**
- **Qué dificultades conceptuales introducen y cómo intentan resolverlas**
- **Cómo presentan o no las cuestiones básicas de la MQ, (incerteza, superposición de estados, orbitales, funciones de onda, comportamiento dual, etc.)**

Deberá incluir un comentario personal de ventajas e inconvenientes de cada texto

Tema 3: Analice el tema dualidad onda partícula, en particular interesa:

- Introducción teórica del tema, su relación y ruptura con los conceptos clásicos.
- Interés (o no) del tema para su enseñanza en el nivel medio
- Modelo escolar deseable y su relación con el modelo científico
- Propuesta de presentación para su enseñanza en el nivel medio .
- Análisis de las dificultades conceptuales para su enseñanza en el nivel medio .
- Comentario personal sobre las dificultades en su implementación.

Tema 4: Analice el tema estructura de la materia, en particular interesa:

- Introducción teórica del tema, su relación y su ruptura con los conceptos clásicos
- Interés (o no) del tema para su enseñanza en el nivel medio
- Modelo escolar deseable y su relación con el modelo científico
- Propuesta de presentación para su enseñanza en el nivel medio .
- Análisis de las dificultades conceptuales para su enseñanza en el nivel medio.
- Comentario personal sobre las dificultades en su implementación.

Tema 5: Analice el tema orbitales y funciones de onda, en particular interesa:

- Introducción teórica del tema, su relación y su ruptura con los conceptos clásicos
- Interés (o no) del tema para su enseñanza en el nivel medio

- Modelo escolar deseable y su relación con el modelo científico
- **Propuesta de presentación para su enseñanza en el nivel medio .**
- **Análisis de las dificultades conceptuales para su enseñanza en el nivel medio.**
- **Comentario personal sobre las dificultades en su implementación.**

Tema 6: Analice objeto cuántico y sus características más significativas (superposición de estados, interpretación probabilística, incerteza, etc.), en particular interesa

- Introducción teórica del tema, su relación y su ruptura con los conceptos clásicos
- Interés (o no) del tema para su enseñanza en el nivel medio
- Modelo escolar deseable y su relación con el modelo científico
- Propuesta de presentación para su enseñanza en el nivel medio .
- Análisis de las dificultades conceptuales para su enseñanza en el nivel medio.
- Comentario personal sobre las dificultades en su implementación.

Tema 7: Analice los experimentos que históricamente llevaron a la ruptura entre la física clásica y la MQ, (recuerde que no son sólo los analizados en el curso), en particular interesa

- El análisis del momento histórico en que se produjeron, en particular.
- Dificultades que presentaron a la interpretación clásica, explicitando el modelo cuyas predicciones **cuestionaron.**
- **Qué nueva idea o modelo se propuso para salvar esas dificultades y qué consecuencias tuvieron esas ideas o nuevos modelos.**
- **Interés (o no) del experimento para su enseñanza en el nivel medio**
- **En relación con el punto anterior seleccione los que a su criterio son más importantes y diseñe una presentación para su enseñanza en el nivel medio .**
- **Análisis de las dificultades conceptuales para su enseñanza en el nivel medio.**
- **Comentario personal sobre las dificultades en su implementación.**

En los capítulos siguientes se presentan los resultados del análisis de la evolución del pensamiento de los profesores luego del curso y una discusión de las dificultades encontradas.

Capítulo 8

Resultados de la intervención didáctica.

Análisis de la evolución del pensamiento de los profesores

8.1 Introducción

En el capítulo anterior presentamos los módulos principales de una intervención didáctica destinada a superar obstáculos de comprensión detectados en una investigación previa. Particularmente nos interesó cuestionar el pensamiento inicial del profesor en relación a algunos tópicos que consideramos fundamentales para una buena interpretación de la mecánica cuántica. Estos son:

- Visión dual de la materia y la radiación (dualidad onda-partícula)
- Propiedades ondulatorias en la materia (relaciones de incerteza de Heisenberg y de de Broglie y principios fundamentales de la cuántica)
- Interpretación probabilística y determinista
- Superposición de estados
- Concepción de un nuevo objeto o modelo de estructura de la materia a nivel cuántico

En este capítulo presentamos una descripción de las representaciones sobre esos tópicos particulares tratados a lo largo del curso. Se describen las concepciones al inicio y al final de la intervención y una propuesta de ordenamiento en categorías que intenta interpretar la naturaleza de dichas concepciones. La metodología es la de un estudio pre experimental sobre una muestra no probabilística de conveniencia en el sentido de Cohen, Marion y Morrison (2007). Este tipo de estudio consiste en un diagnóstico inicial y uno posterior luego de cierta intervención sin grupo control. En estos casos, las categorías halladas, si bien no son generalizables en forma amplia, establecen tendencias ciertas cuya diversidad podrá ser ampliada por futuros investigadores sin que esto cuestione la validez de las categorías ya establecidas. Se analizan los progresos de las representaciones de los profesores y finalmente, se describen dos estudios de caso que ejemplifican en mayor profundidad los resultados obtenidos.

Los instrumentos de recolección de datos fueron un cuestionario pre y post curso (actividad 4, cap 7) aplicados al comienzo y finalización del curso con un intervalo de cuatro

meses entre ambas aplicaciones, registros fílmicos de algunas de las exposiciones de los asistentes, análisis de notas de clase y entrevistas informales cuando había necesidad de alguna aclaración. Para el registro de opiniones en clase, se contó con un observador externo que registraba en un cuaderno los comentarios de los asistentes y sus impresiones personales, y en caso de ausencia del mismo, el profesor del curso, realizaba un informe pormenorizado inmediatamente al terminar la clase. El observador tenía conocimientos científicos y había participado en investigaciones en el área de la enseñanza de las ciencias. Se tuvieron en cuenta, además, las opiniones vertidas en las entrevistas de la caracterización específica en el caso de los profesores que además participaron del curso y se realizaron entrevistas informales en las ocasiones en que se requería algún tipo de aclaración.

La muestra estuvo constituida por once profesores asistentes a un curso de formación organizado por el Instituto Politécnico Superior Gral. José de San Martín (IPS) dependiente de la Universidad Nacional de Rosario. En esta institución se dictan cursos de nivel medio y terciario universitarios, siendo el nivel medio el de mayor población en con un total aproximado de más de mil alumnos en 6 divisiones de primero a quinto año. La muestra de trabajo se eligió en este ámbito aprovechando la demanda de la institución en la temática que nos interesa y su intención de introducir temas de actualidad en el nivel medio. Por otro lado, dado que todos los cursos tienen alguna asignatura relacionada con la física o la química, concentra una cantidad considerable de profesores del área. El IPS se caracteriza por incentivar a sus docentes a participar en actividades de formación y actualización y su vinculación con la universidad hace que su dinámica supere la enseñanza tradicional de los institutos educativos dependientes de la provincia. Participan de su planta docente profesores egresados de ISFPs y profesionales de distintas áreas. En nuestro caso, la muestra de profesores estuvo constituida por seis profesores de Matemática y Física, dos ingenieros electricistas, un ingeniero químico y un ingeniero civil (cuatro varones y siete mujeres). Ninguno de los ingenieros ejerce profesionalmente y todos se dedican a la docencia como principal actividad laboral, teniendo la mayor cantidad de horas en el IPS.

8.2 Análisis de Pre y pos encuesta. Resultados y Diagramas de evolución

Analizaremos las respuestas al cuestionario que constituyó la Actividad 4 presentada en el capítulo anterior. Once profesores asistentes respondieron el cuestionario al comienzo y finalización del curso con un intervalo de cuatro meses entre ambas aplicaciones. Sólo un profesor que había asistido al curso irregularmente prefirió no presentar los resultados del cuestionario final. Las respuestas se analizaron independientemente para cada ítem, y se establecieron relaciones entre los resultados previos y posteriores para cada profesor. Los profesores solicitaron sus resultados iniciales luego de contestar el cuestionario por segunda vez, y se manifestaron sorprendidos por los cambios en el propio pensamiento.

A continuación se presenta la síntesis de las respuestas obtenidas en la pre y pos encuesta, agrupadas en categorías. Estas categorías surgen de la lectura repetida de las respuestas y de la discusión con otros investigadores que acordaron en el análisis realizado, la pertenencia de cada profesor a cada categoría fue corroborada en entrevistas informales.

Para cada pregunta:

- se analizaron las respuestas vertidas y se las agrupó en categorías separadas para la pre y pos encuesta
- se estableció la pertenencia de cada individuo a cada categoría y se siguió su evolución detectando las categorías de partida y de llegada
- se establecieron los *progresos notables* y los *progresos moderados*.
- se detectaron los temas en que se observa menor evolución y se analizan posibles causas y se proponen alternativas de mejora.

Las categorías se nombran por un número seguido de una letra en mayúscula: el número indica si la categoría emana de las respuestas de la pre o post encuesta (1: pre-encuesta

o 2: post-encuesta), y la letra identifica la categoría. Se reservaron las letras de la A a la J para las categorías de la pre-encuesta y de la K a la Z para las de la post-encuesta.

Para una mejor visualización de los resultados, se diseñaron *diagramas de evolución* que dan cuenta del progreso de cada profesor en la comprensión de los temas investigados. Los diagramas muestran las categorías de partida y de llegada, los progresos notables, moderados o escasos, según el caso, y reflejan en el nivel de horizontalidad, el nivel de comprensión alcanzado a juicio de este investigador. Los números entre paréntesis, sobre la línea de evolución, identifican los casos. El número entre corchetes, en cada categoría, indica la cantidad de casos incluidos en la misma.

Pregunta 1: ¿Por qué la Física Moderna supone una ruptura con la clásica?

Las respuestas a la pregunta 1 en la Pre encuesta pueden agruparse en dos categorías: Categoría 1.A: se acepta que la Física Clásica tiene limitaciones pero no se especifica cuáles son esas limitaciones, y Categoría 1.B: se cita alguna característica propia de la Física Cuántica sin profundizar qué la diferencia de la FC y sin especificar suficientemente.

En el caso de la Pos encuesta se advierte en todos los casos una mayor argumentación acompañada de un mejor uso del vocabulario específico, evidenciando un avance en la claridad de conceptos. Las respuestas se agruparon, también, en dos categorías: 2.K: se atribuye la ruptura entre la FQ y la FC a “una necesidad” de explicar fenómenos que escapan a los modelos clásicos y que se sitúan específicamente en el plano de lo “microscópico” y 2.L: se alude a conceptos o experiencias propios de la FQ como incertidumbre vs. determinismo clásico, dualidad del objeto, efecto túnel, interferencia de partículas, etc.

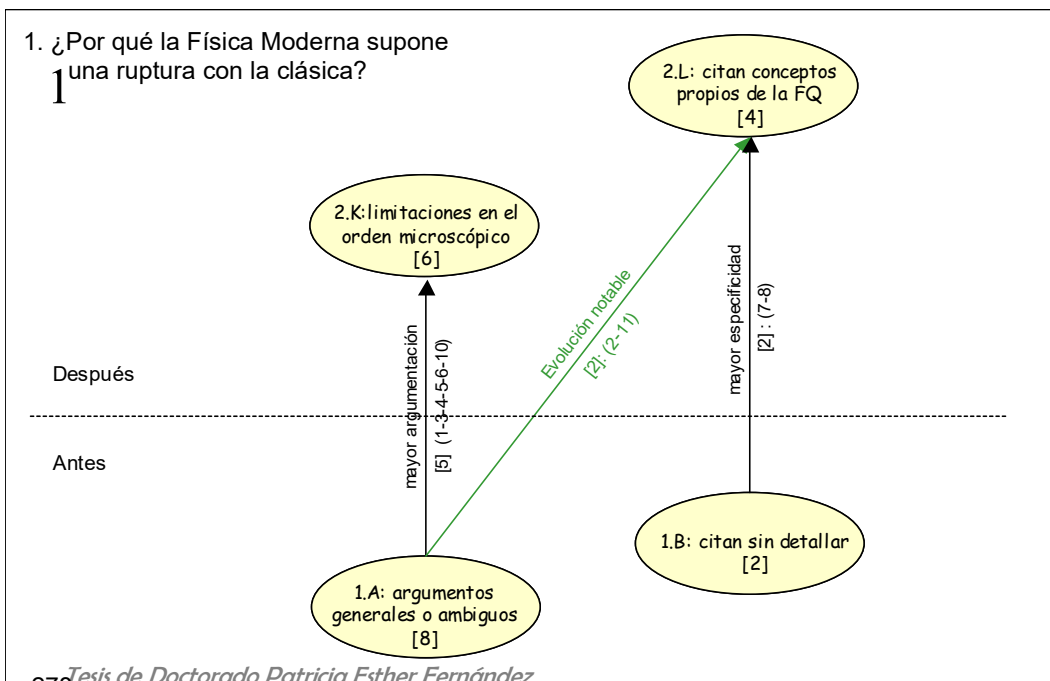
Pregunta	Categorías Pre-encuesta	Categorías Pos-encuesta
1: ¿Por qué la Física	1.A: Plantean limitaciones para la Física	2.K: Atribuyen la ruptura entre la FQ y

<p>Moderna supone una ruptura con la clásica?</p>	<p>Clásica sin especificar cuáles</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Por las limitaciones que presentan los modelos de la FC para explicar algunos fenómenos. 2. Porque se trata de modelos diferentes, donde ciertas leyes dejan de tener validez 3. Por una evolución de los modelos explicativos de muchos fenómenos. 4. No se utilizan los mismos modelos. Hay determinados fenómenos que se explican utilizando modelos de la FC y otros fenómenos en que esto no se puede aplicar. 5. Por la utilización de modelos diferentes. 6. La Física Moderna supone una ruptura con la clásica en el sentido de no haberse encontrado una teoría general de la física que abarque los descubrimientos nuevos. 10. Porque determinados fenómenos no pueden ser explicados por la FC por sus velocidades y tamaños 11. Los modelos de la física con los que cada uno trabaja no sólo son diferentes sino que la física moderna propone un modelo que posee características combinadas de modelos disímiles de la FC. <p>1.B: Citan alguna característica de la Física Cuántica con poca claridad.</p> <ol style="list-style-type: none"> 7. Por el abandono de la concepción mecanicista a la luz de los nuevos descubrimientos del siglo XIX: rayos X, electrón, radioactividad. 8. Hecha por tierra concepciones previas sostenidas por la MC. Ej.: constancia de la masa, etc. Se asume el principio de incertidumbre, la relación masa-energía, etc. 	<p>la FC a la “necesidad” de explicar fenómenos “microscópicos”</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Ante la necesidad de explicar el comportamiento de partículas subatómicas se evidencian las limitaciones que la FC tiene al respecto y surgen nuevos conceptos que constituyen las bases de la Física Moderna. 3. Los modelos clásicos no pueden explicar los fenómenos microscópicos experimentados con objetos cuánticos, de allí surge la necesidad de nuevos modelos, los de la física moderna. 4. Porque con la FC no se pueden explicar fenómenos a nivel microscópicos, como por ejemplo la radiación de cuerpo negro, o el hecho de que el electrón al moverse alrededor del núcleo no irradie energía. 5. La física clásica no es aplicable a objetos microscópicos (átomos, electrones, protones, neutrones, fotones). El análisis de su comportamiento es tarea de la física cuántica. 6. La Física Moderna supone una ruptura con la Clásica debido a que cambia el modo de pensar el mundo viéndolo desde lo microscópico. La Física Clásica, en cambio, analiza los fenómenos macroscópicamente. 10. Porque la Física moderna nos permite dar una explicación a fenómenos a nivel microscópicos que no se pueden dar desde la Física Clásica. <p>2L: Se refieren a cuestiones propias de la FQ.</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. La FC es determinista, mientras que en la FQ el azar y la incertidumbre juegan un papel muy importante. 7. La Física Moderna analiza las propiedades de la materia a nivel fundamental; es decir, más allá de lo sensorial pues ni el concepto clásico de onda ni el de partícula son ade-
---	--	---

		<p>cuados para explicarlos.</p> <p>8. La FQ no es determinista como la clásica, además, asume que la naturaleza es discontinua y asume la dualidad onda-partícula.</p> <p>11. La física Clásica tiene una insuficiencia de conceptos para explicar los fenómenos a nivel microscópico donde el resultado de un experimento no se puede predecir y la observación afecta el fenómeno. Por ejemplo, la teoría electromagnética clásica no explica la estabilidad de los átomos y moléculas (colapso del átomo). Los calores específicos de los sólidos (clásicamente: valor aproximadamente constante, cuántica: $T \rightarrow 0, c \rightarrow 0$), fenómenos de difracción e interferencia, dispersión de radiación, emisión fotoelectrónica, etc.), tunneling.</p>
--	--	---

Diagrama de evolución. Análisis por sujeto y por categoría:

Las categorías de partida presentan una escasa diferencia en el nivel conceptual siendo las repuestas de la categoría 1B algo más precisas. Las categorías de la pos encuesta se diferencian en el nivel conceptual alcanzado siendo la 2L la más aceptable.



Los progresos más notorios se dan en las respuestas que alcanzan la categoría 2L.

En el caso del tránsito 1.A→ 2.L, partiendo de una concepción inicial ambigua, luego del curso los profesores pueden citar elementos distintivos claros como el determinismo clásico y la incertidumbre cuántica (se consideran como *progresos notables* la evolución desde la categoría más baja a la más alta, [casos 2 y 11]). Sin embargo, persiste la idea de asociar la FC a lo macroscópico y la MQ a lo microscópico. En la respuesta 11, además, se citan el problema del cuerpo negro y el de los calores específicos. Estas cuestiones son las más frecuentemente desarrolladas en la presentación tradicional que hacen algunos libros de texto.

En el caso del tránsito 1.B →2.L, las respuestas iniciales eran más precisas y luego del curso, se incorporan la idea de dualidad, los fenómenos de difracción e interferencia y el efecto túnel (se considera *progreso moderado* la evolución hacia la categoría máxima partiendo de un nivel conceptual aceptable, [casos 7 y 8]).

La evolución 1A→2K, es la más frecuente, si bien persiste la idea de asociar la FC a lo macroscópico y la MQ a lo microscópico, los argumentos son más específicos y mejor fundamentados [casos 1, 3, 4, 5, 6, 10].

Resumen de progresos en la pregunta 1:

- La evolución experimentada en los *progresos notables* puede resumirse en la premisa:
Argumentos generales o ambiguos → conceptos propios de la MQ [2, 11]
- La evolución experimentada en los *progresos moderados* puede sintetizarse en el enunciado:
Citan sin detallar → citan conceptos propios de la MQ. [7, 8]
- Las diferencias planteadas entre la FC y la FQ podrían resumirse en:
 - macroscópico vs. microscópico
 - *determinismo clásico vs. azar e incertidumbre cuántico.*
 - *enuncian limitaciones de la FC, citan fenómenos y experiencias como la radiación de cuerpo negro, la estabilidad de los átomos y los calores específicos.*

Pregunta 2a: ¿Qué entiende por dualidad onda-partícula?

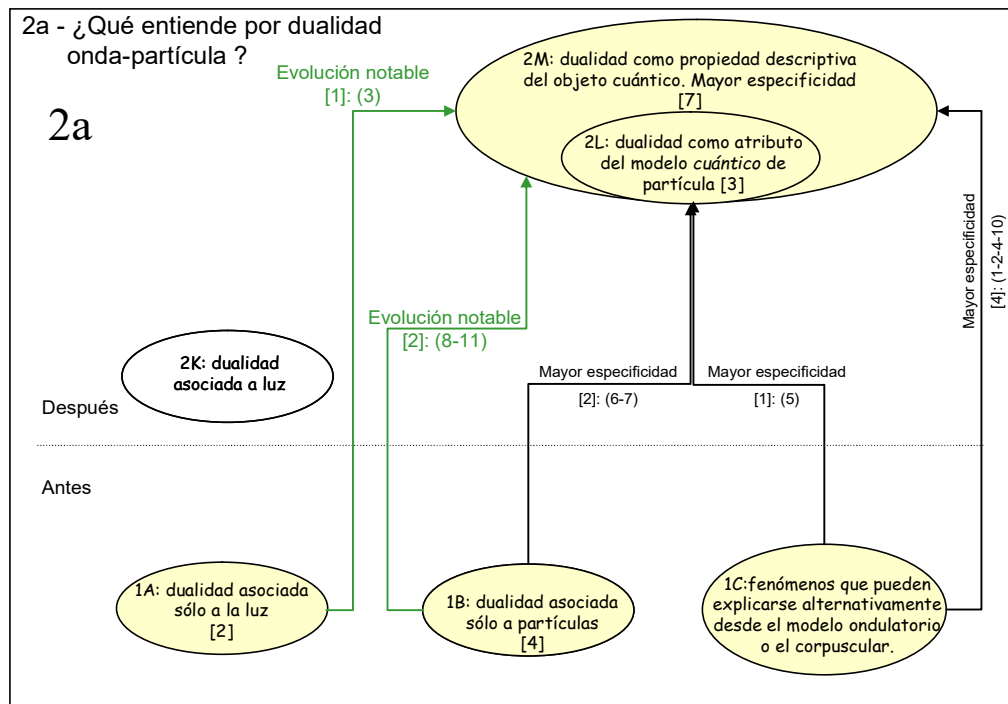
Las respuestas recogidas en la pre-encuesta reflejan una visión general de la dualidad. La dualidad es un fenómeno, una necesidad, un comportamiento de la luz, o bien, de las partículas. Se establecieron tres categorías o respuestas típicas que no guardan un orden jerárquico: 1A: sólo aluden al comportamiento dual de la luz, 1B: sólo aluden al comportamiento dual de partículas, y 1C: Aluden al comportamiento dual de un objeto (sin especificar si es materia o radiación) o a fenómenos que pueden explicarse desde el modelo corpuscular u ondulatorio alternativamente.

Las repuestas en la pos encuesta también consideran que la dualidad es una *propiedad* o una *atribución*, un *comportamiento*, una *interpretación*, un *modelo*, un *fenómeno*, sin embargo, en general, son más específicas que en la pre encuesta y agregan ejemplos y alusiones a la idea de comportamiento dual. En el caso de la pos-encuesta las respuestas se agruparon en categorías que poseen el mismo núcleo temático de la pre-encuesta, pero que difieren notablemente en la especificidad de su contenido. Es decir, los objetos aludidos en las categorías 2.K, 2.L y 2.M parecen estar mucho mejor definidos conceptualmente que en las categorías 1.A, 1.B y 1.C respectivamente.

Pregunta	Categorías Pre-encuesta	Categorías Pos-encuesta
2a: ¿Qué entiende por dualidad onda-partícula?	<p>1.A: Aluden sólo al comportamiento dual de la luz</p> <p>3. Necesidad de explicar físicamente a la luz, sin contar con un único modelo explicativo y por lo tanto hacer uso de ambas posibilidades.</p> <p>9. Asociado al comportamiento de la luz. Algunas teorías luminosas pueden explicarse mediante un modelo ondulatorio de la luz y otros mediante el modelo corpuscular</p> <p>1.B: Aluden sólo al comportamiento dual de partículas</p> <p>6. Entiendo el comportamiento por</p>	<p>2.K: Aluden sólo al comportamiento dual de la luz</p> <p>Ninguno</p> <p>2.L: Aluden a modelos, interpretaciones o comportamiento desde el punto de vista de las partículas</p> <p>6. Podemos interpretar los fenómenos cuánticos pensando en términos de ondas (funciones) aunque desde lo clásico las partículas estén asociadas a cantidad de movimiento y tienen masa.</p> <p>7. Modelo físico en el cual la materia a nivel fundamental presenta propiedades tanto ondulatorias como corpusculares.</p>

	<p>ejemplo de un electrón, a veces como partícula y a veces como onda según el modelo utilizado.</p> <p>7. Comportamiento tanto ondulatorio como corpuscular de los objetos subatómicos.</p> <p>1.C:Aluden al comportamiento dual de un objeto ambiguo. (Definiciones de diccionario, descontextualizadas)</p> <p>1. Doble naturaleza. Comportamiento dual explicado a través de partículas u ondas.</p> <p>10. Fenómenos que pueden ser explicados desde el punto de vista de partícula o desde el punto de vista ondulatorio.</p>	<p>2.M: Aluden al comportamiento dual de un objeto cuántico o de fenómenos, con mayor especificidad.</p> <p>2. Propiedad de partículas llamadas objetos cuánticos cuyo comportamiento es tanto de partícula como de onda.</p> <p>4. Los objetos cuánticos en determinadas experiencias se comportan como ondas y otras como partículas.</p> <p>8. Fenómeno o comportamiento que puede presentar un mismo objeto según las circunstancias. Ej.:fotones o electrones que pueden manifestar propiedades ondulatorias y también corpusculares.</p>
--	---	---

Diagrama de evolución. Análisis por sujeto y por categoría:



Como en el caso anterior, el nivel de horizontalidad del gráfico refleja un mismo nivel de comprensión. Las categorías de la pre encuesta pueden ubicarse en un mismo nivel,

mientras que las de la pos encuesta en tres niveles. Los dos niveles en amarillo 2L y 2M de la pos encuesta son muy cercanos ya que, si bien en el más elemental sólo se alude a partículas, se confiere a estas partículas un comportamiento especial y un modelo propio y diferente dentro la mecánica cuántica por lo que esta categoría se inserta dentro de la 2M, de carácter más amplio y preciso. La categoría 2K en blanco de la pos-encuesta representa en un conjunto vacío que da cuenta de la ausencia de respuestas en dicha categoría.

Las evoluciones de los grupos 1.A y 1.B al grupo 2.M, corresponden a *evoluciones o progresos notables* y tienen igual peso de relevancia ya que en ambos casos las opiniones parten de una visión parcial de la dualidad, limitada o bien a partículas o bien a ondas, y luego coinciden en que éste es un comportamiento que puede observarse en ambos entes por igual [3, 8 y 11].

La evolución del grupo 1.C al 2.M no representa una permanencia en el mismo nivel conceptual ya que las respuestas en la pos-encuesta reflejan mayor precisión en la idea de dualidad como una propiedad de los objetos cuánticos, o como característica del modelo cuántico, dejando atrás ideas ambiguas como comportamientos o fenómenos sin especificar, o incluso respuestas que parecen aludir sólo a la etimología de la palabra dualidad (*progresos moderados*: [1, 2, 4, 10]).

Es importante destacar que nadie luego del curso atribuye la dualidad únicamente a la luz, es decir se ha removido una idea generalizada que predomina en los libros de textos de física general, que reserva el tratamiento de la dualidad propia de la física cuántica, a la luz (categoría 2.K vacía).

Resumen de progresos en la pregunta 2a:

- La evolución experimentada en los *progresos notables* puede resumirse en la premisa:
La dualidad asociada sólo a la luz → la dualidad como propiedad de los objetos cuánticos. [3]

La dualidad asociada sólo a las partículas → la dualidad como propiedad de los objetos cuánticos.[8, 11]

- La evolución experimentada en los progresos moderados puede sintetizarse en el enunciado:

De la dualidad asociada a ondas o partículas → la dualidad como propiedad de los objetos cuánticos. [1, 2, 4, 10]

Pregunta 2b: ¿Qué entiende por cuantificación?

Las respuestas en la pre encuesta se agruparon en dos categorías bien definidas. 1A: la cuantificación se entiende como una cantidad discreta, o como la mínima parte de algo, aludiendo al significado etimológico de la palabra (definición de diccionario) y 1.B: las cuantificación asociada únicamente a la radiación, fundamentalmente a la luz.

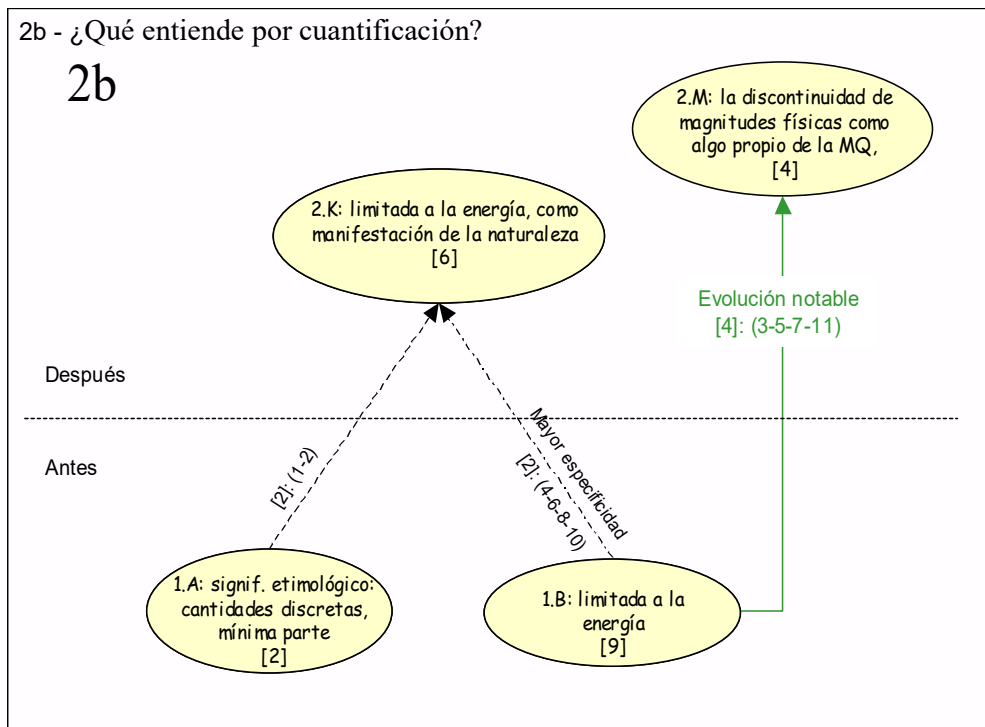
En la pos encuesta se establecieron dos categorías. 2.K: la cuantificación limitada a la energía, como una manifestación de una propiedad de la naturaleza, y 2.M: la cuantificación asociada a la discontinuidad en los valores que pueden tomar otras magnitudes físicas, además de carga eléctrica y energía.

Pregunta	Categorías Pre-encuesta	Categorías Pos-encuesta
2b: ¿Qué entiende por cuantificación?	<p>1.A: La cuantificación entendida en su significado de diccionario (cantidades discretas, mínima parte de algo), o de una manera muy ambigua.</p> <p>2. Mínima parte de algo que no puede seguir subdividiéndose; por ej. la carga del electrón.</p> <p>1.B: La cuantificación asociada a la emisión y absorción de radiación. Sólo en un caso se admite que la radiación se propaga en paquetes discretos o fotones.</p> <p>4. Las cantidades de energía están cuantificadas. Existen determinados valores de energía que pueden absorber un electrón para pasar a otro nivel</p>	<p>2K: Reduccionismo de la cuantificación a la energía.</p> <p>6. Establecer desde el modelo microscópico una cuantificación es pensar por ejemplo un sistema en cuantos de energía.</p> <p>10. La discontinuidad de la naturaleza hace que la misma esté cuantizada, por ejemplo la energía se propaga en cuantos.</p> <p>2.M: la cuantificación como una característica propia de la MQ, referida no sólo a la discontinuidad en los valores de la carga y la energía, sino con un alcance mayor que incluye magnitudes físicas tales</p>

	<p>y estos valores están bien determinados.</p> <p>7. Principio por el cual la materia sólo puede emitir o absorber energía en pequeñas unidades o cuantos.</p>	<p>como el momento angular entre otras.</p> <p>5. Cuando en física cuántica se estudia por ejemplo la constitución del átomo, se concluye en que algunas magnitudes relacionadas con el electrón, no pueden adoptar valores cualesquiera, sino que están perfectamente definidos (se dice que están cuantificadas). Son ellas: la energía, el momento angular orbital y momento angular rotacional)</p>
--	---	--

Diagrama de evolución. Análisis por sujeto y por categoría:

Las categorías de partida tienen un nivel conceptual similar muy bajo. Las categorías finales, presentan diferente grado de avance, siendo la de más alto nivel la 2M la cual refleja una concepción de la cuantificación como una característica propia de la descripción de la MQ, más cercana a la concepción científica.



Inicialmente la mayoría de los asistentes al curso asociaban la cuantificación únicamente a la energía (9 individuos, 81%) o bien respondían dando una definición de diccionario, lo cual indica una ausencia de significado físico (2 individuos, 19%). Luego del curso, el 40% de quienes responden a la pos encuesta ha entendido que la energía no es la única magnitud cuantificable en MQ. Extienden la noción de cuantificación a otras magnitudes físicas tales como el momento angular y la asocian a un comportamiento característico de la MQ no observado en la MC (*evolución o progreso notable*: 1B a 2M: 3,5,7,11).

Sin embargo, un número importante de alumnos permanecen en la idea de que la cuantificación es propia de la energía y no extienden el concepto a otras magnitudes. En otros casos, se le asigna un valor ontológico a la cuantificación entendiéndose que es una expresión de la manera en que opera el mundo natural (*evoluciones 1A y 1B a 2L*: 1,2,4,6,8,10).

Resumen de progresos en la pregunta 2b:

- - La evolución experimentada en los *progresos notables* puede resumirse en la premisa:
La cuantización limitada a la energía → valores erminados de ciertas magnitudes
[3,5,7,11]

- - La evolución experimentada en los *progresos escasos* (línea punteada) puede sintetizarse en el enunciado:
La cuantización limitada a la energía → *La cuantización limitada a la energía, con mejor fundamentación* [1,2,4,6,8,10]

Pregunta 2.c: ¿qué entiende por relaciones de incerteza?

En la pre encuesta se establecieron 3 categorías claramente diferenciadas:

1.A: no responden, 1.B: las relaciones de indeterminación se entienden como una característica propia de la MQ sin precisar (en este caso, las respuestas son totalmente ambiguas y se remiten a dar el significado etimológico de la palabra incertidumbre como algo contrapuesto al determinismo causal propio de la mecánica clásica) y 1.C: refieren a la

imposibilidad de conocer simultáneamente la posición y la cantidad de movimiento (o, a veces, la velocidad) de una partícula. No se hace referencia a la energía ni se explicitan las relaciones de Heisenberg ($\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar$).

En la pos encuesta, las respuestas son más precisas pero aluden a las mismas tres categorías anteriores:

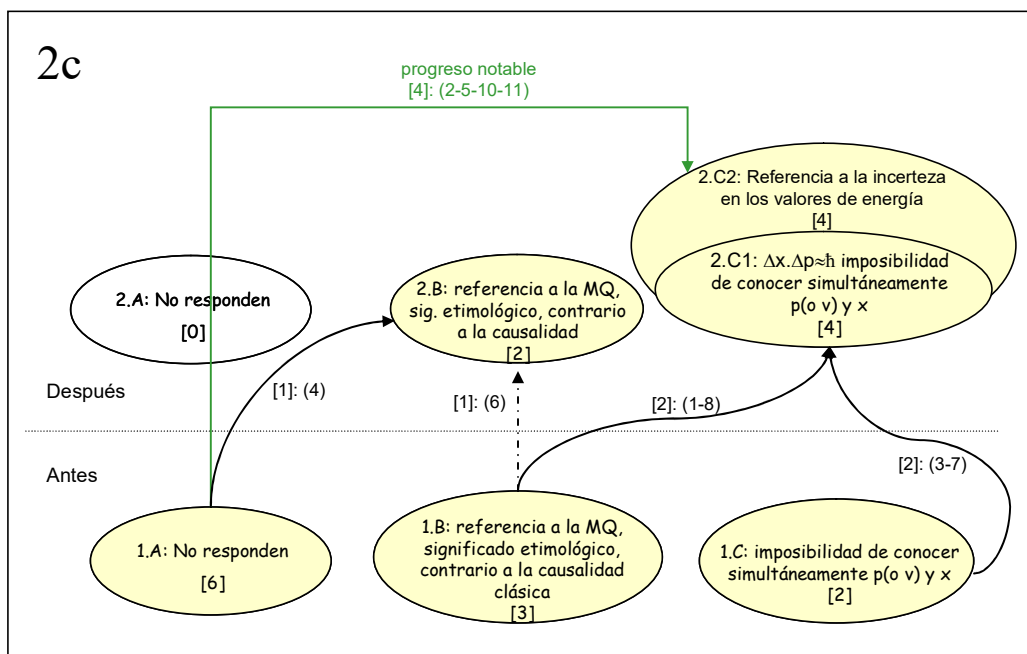
2.A: no responden, 2B: sentido etimológico de la palabra, alusión general a la MQ, y 2.C: citan explícitamente la cuestiones propias de la MQ. En este último caso las respuestas evidencian mayor conocimiento y pueden dividirse en dos subgrupos: 2.C1 (al igual que en la 1C, se refieren únicamente a la imposibilidad de conocer simultáneamente la posición y la cantidad de movimiento pero explicitan su expresión formal $\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar$) y 2.C2 (además de lo anterior reconocen las relaciones de incerteza para la energía).

Pregunta	Categorías Pre-encuesta	Categorías Pos-encuesta
2.c: ¿qué entiende por relaciones de incerteza?	<p>1.A: No responden: 2-4-5-9-10-11.</p> <p>1.B: característica propia de la MQ sin precisar , algo contrapuesto al determinismo causal de la mecánica clásica. Respuestas ambiguas y definiciones de diccionario.</p> <p>1. Contrario a las relaciones de determinación o de causa efecto en la FC.</p> <p>8. Posibilidad de certeza o no para especificar condiciones/ cantidades.</p> <p>1.C: Se refieren a la imposibilidad de conocer simultáneamente la posición y la cantidad de movimiento (o, a veces, la velocidad) de una partícula. No se hace referencia a la energía ni se explicitan las relaciones de Heisenberg ($\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar$)</p> <p>3. Imposibilidad de conocer posición y velocidad de una partícula en un instante</p> <p>7. E imposible medir simultáneamente en forma precisa, posición y</p>	<p>2.A: No responden</p> <p>Categoría vacía (no existen respuestas vacías, todos dan alguna respuesta)</p> <p>2.B: característica propia de la MQ sin precisiones , algo contrapuesto al determinismo causal propio de la mecánica clásica. Definiciones de diccionario, descontextualizadas.</p> <p>4. La FC es determinista (un único resultado), relación causa-efecto, la física cuántica no es determinista causal.</p> <p>6. La probabilidad determina el estado de un sistema. Es la incertidumbre (ppio de Heisenberg) de encontrar, por ejemplo un electrón, en alguna parte que rodea al núcleo.</p> <p>2.C: Aparecen en forma explícita cuestiones propias de la MQ. Las respuestas se agrupan en dos subcategorías:</p> <p>2C1: la imposibilidad de precisar o medir simultáneamente la posición y</p>

	<p>momento lineal de una partícula.</p>	<p>la cantidad de movimiento. En algunos casos se citan las relaciones de incerteza para la posición y la cantidad de movimiento ($\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar$). No se extienden estas relaciones al tiempo y la energía.</p> <p>1. Imposibilidad de conocer simultáneamente y en forma exacta el momento lineal y la posición de una partícula. La precisión en la determinación $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$</p> <p>parejas de magnitudes, como posición y cantidad de movimiento, con total certeza.</p> <p>2C2: reconocen las relaciones de incerteza para la energía y las atribuyen a Heisenberg.</p> <p>5. El ppio de incertidumbre de Heisenberg, para una partícula cuántica es imposible conocer con exactitud posición y momento lineal o posición temporal y energía.</p> <p>10. Mayor será la incertidumbre respecto del momento y de la energía cuanto mejor se conozca la posición espacial o temporal</p> <p>11. (para una partícula)... la información de su posición se obtiene a expensas de la información sobre su cantidad de movimiento. $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$, no se puede hacer que Δx y Δp sean nulos. Lo mismo sucede en las transiciones de niveles $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$ (ppio. de indeterminación de Heisenberg).</p>
--	---	--

Diagrama de evolución. Análisis por sujeto y por categoría:

Todos los encuestados que responden a esta pregunta entienden las relaciones de indeterminación o de incerteza como una característica propia de la MQ, aunque no siempre pueden explicitar las razones de esta pertenencia y simplemente las contraponen a las leyes causales que rigen los comportamientos de los fenómenos descriptos por la MC (mecánica clásica).



Las evoluciones más notables corresponden a quienes inicialmente no responden (evolución notable de la categoría 1.A a la 2.C2: 2, 5, 10, 11). Parece ser que este grupo, es quien logra construir una concepción más cercana a la concepción científica. Esto podría justificarse si consideramos que al no evidenciar un concepto previo organizado, tienen menos condicionamientos para construir concepciones más ajustadas que quienes tienen ya una concepción estructurada del tema. Tampoco puede decirse que estos profesores carecieran de ideas previas antes de realizar el curso, pero sí que no tenían claridad suficiente para volcar su pensamiento en una respuesta.

Los grupos 1B y 1C presentan mayor resistencia al cambio y la instrucción en este caso se tradujo en una evolución moderada hacia la categoría 2C1 [1, 3, 7, 8], que consiste, posiblemente, en una asimilación en el sentido de Piaget o una reestructuración débil en el sentido de Carey (1991) o un cambio normal en el sentido de Chi (1992): se incorporan unas pocas ideas nuevas en las estructuras conceptuales anteriores sin modificaciones substanciales, cuestión que se evidencia en una mejor argumentación. En otras palabras, se podría decir que quien “sabe más” resiste más el cambio; quien “sabe menos” resiste

menos y es más libre para generar estructuras conceptuales en sintonía con las discutidas en el curso.

Llama la atención, que los encuestados sólo asocian las relaciones de incerteza a las partículas, a pesar de haber trabajado en clase las relaciones ($\Delta x \cdot \Delta k \approx 1$) como una de las características del modelo ondulatorio clásico que sería extendida al modelo de partícula cuántico. Esta resistencia a sintetizar propiedades de las partículas con conceptos ondulatorios, constituye un obstáculo cognitivo difícil de superar en el proceso de construcción de un modelo propio para los objetos de la mecánica cuántica. La limitación de estas las relaciones de Heisenberg a las partículas, sumada a la concepción cotidiana de *incerteza* como algo incierto o desconocido, induce interpretaciones que asocian la MQ a tratamientos estadísticos necesarios para salvar la carencia de conocimiento en las mediciones. De allí, nuestra insistencia en la necesidad de reforzar la formación previa del profesorado en el tema de ondas, con un enfoque orientado a la construcción posterior del modelo dual de la mecánica cuántica.

Resumen de progresos en la pregunta 2c:

- La evolución experimentada en los *progresos notables* puede resumirse en la premisa:
Sin respuesta → las relaciones de incerteza para posición/momento y energía/tiempo [2, 5, 10, 11]
- La evolución experimentada en los *progresos moderados* (a partir de buen nivel inicial) puede sintetizarse en el enunciado:
Imposibilidad de conocer simultáneamente la posición y la cantidad de movimiento → mayor especificación [1, 3, 7, 8]

Pregunta 2.d: ¿Qué entiende por orbitales?

El concepto predominante es el de orbital como una zona del espacio donde es máxima la probabilidad de encontrar un electrón. Los orbitales tienen existencia en la estructura

atómica y se los sitúa alrededor de los núcleos como estanterías donde se ubican los electrones.

En el caso de la Pre encuesta las respuestas pueden agruparse en dos categorías que no difieren substancialmente: 1.A: los orbitales como regiones espaciales y 1.B: los orbitales como trayectorias. Estos resultados concuerdan con estudios similares realizados sobre las concepciones de estudiantes en los que se destaca que luego de la instrucción, los alumnos mantienen una visión de electrones moviéndose en órbitas tipo Bohr (Fischler, 1992, Greca, 1998) y de orbitales como zonas espaciales (Fischler, 1992 y Solbes, 1988).

En la categoría 1A, los orbitales son regiones espaciales alrededor del núcleo atómico en donde se encuentran los electrones, eventualmente en forma de nubes o, en donde la probabilidad de hallarlos es máxima. En algunos casos, se relaciona los orbitales con estados no excitados. En la categoría 1B, los orbitales son las trayectorias de los electrones en su movimiento alrededor del núcleo. Se asocia esta trayectoria a nivel de energía, lo cual ya es algo más complejo.

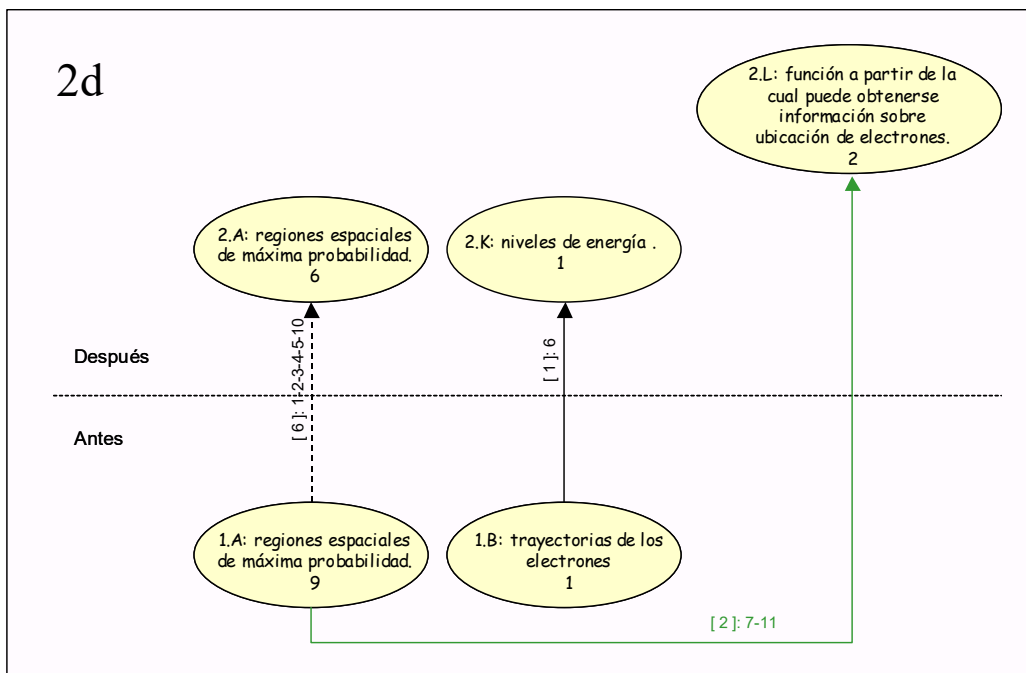
En la pos encuesta, se observa un número importante de sujetos que permanecen en la categoría A original, aunque dentro de ella se distinguen quienes no han modificado sus concepciones, de quienes, si bien siguen identificando los orbitales con zonas del espacio donde la probabilidad de hallar un electrón es máxima, entienden que estos orbitales surgen de la ecuación de Schrödinger (2.A). Aparecen además, dos nuevas categorías: 2.K: orbitales asociados a niveles de energía y 2.L: los orbitales como una función a partir de la cual puede obtenerse información sobre dónde puede hallarse al electrón, a veces relacionada con las funciones de onda. En la categoría 2K, ya no se asocia nivel de energía a una trayectoria tipo planetaria. Esta respuesta es de un grado de abstracción mayor que la 1.B, algo similar a lo que Fischler (1992) establece como avance desde posiciones iniciales de zona cáscara o núcleo.

Pregunta	Categorías Pre-encuesta	Categorías Pos-encuesta
2.d: ¿Qué entiende por orbitales?	1.A: son regiones alrededor del núcleo en donde se encuentran los electrones,	2.A: son regiones espaciales de máxima probabilidad de hallar

	<p>eventualmente en forma de nubes dónde la probabilidad de hallarlos es máxima. Pueden relacionarse también los orbitales con estados no excitados</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Región del átomo donde se encuentran los electrones. 2. Zona de mayor probabilidad de encontrar los electrones. 3. Zonas en las que podemos encontrar un electrón de un átomo con un estado no excitado. <p>1.B: se asocian al “giro” de los electrones alrededor del núcleo. Nivel de energía.</p> <ol style="list-style-type: none"> 6. Son trayectorias determinadas por partículas o niveles de energía. 8. Zona de mayor probabilidad donde puede hallarse un electrón en su giro alrededor del núcleo 	<p>electrones alrededor del núcleo.</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Zona de mayor probabilidad de encontrar el electrón dentro de un átomo. Surgen de resolver la ecuación de Schrödinger. 5. Zonas del espacio que rodean al núcleo del átomo donde probabilísticamente será posible encontrar un electrón. <p>2.K: Los orbitales asociados a niveles de energía y no a trayectorias planetarias.</p> <ol style="list-style-type: none"> 6. Son los niveles de energía que pueden asumir un subsistema de un sistema de partículas. <p>2.L: Los orbitales como una función a partir de la cual puede obtenerse información sobre dónde puede hallarse al electrón (espacial) y veces relacionados con las funciones de onda</p> <ol style="list-style-type: none"> 7. Función que describe la región del espacio que rodea al núcleo de un átomo donde existe la máxima probabilidad de encontrar un electrón. 11. Es una función de onda atómica, ψ, cuya amplitud al cuadrado nos da la probabilidad de encontrar los electrones en ciertas zonas (en átomos y moléculas).
--	---	--

Diagrama de evolución. Análisis por sujeto y por categoría:

Se observa un número importante de sujetos que permanecen en la categoría inicial (evolución 1A a 2A), en la que se identifica los orbitales con zonas del espacio donde la probabilidad de hallar un electrón es máxima. Dentro de ésta, hay algunos individuos que no modifican sus concepciones en forma importante, y otros, que si bien siguen identificando los orbitales con zonas espaciales, entienden que estos orbitales surgen de la ecuación de Schrödinger [1, 2, 3, 4, 5, 10].



Es muy fuerte la asociación de la idea de orbital a la posición de los electrones, o bien a funciones que dan información sobre ella, lo cual se refleja en las otras dos categorías detectadas en la pos encuesta.

En ningún caso se los asocia con una herramienta más general que no sólo permita conocer la probabilidad de encontrar un electrón en una dada región del espacio, sino que aporte también información respecto a otras magnitudes cuánticas. Este tema no fue discutido suficientemente en el curso.

Desde otro punto de vista, es interesante destacar la vinculación del concepto de orbital con el de estado no excitado. Parece entenderse que los orbitales son “órbitas” o simplemente “zonas” sin precisar, donde están los electrones estables. Posiblemente en esta afirmación subyace una idea de estado excitado como algo transitorio en el cual el electrón no permanece mucho tiempo, justamente porque salta y vuelve a su estado inicial. Esto sugiere que se asocia la función de onda estacionaria sólo al estado fundamental (preg.3 cat. 1.A).

Aparece también la idea del electrón nube tal como la describe Petri (1998) (cat.1.A) y la asociación de las trayectorias a niveles de energía (Fischler, 1992) (cat. 1.B).

Resumen de progresos en la pregunta 2d:

- La evolución experimentada en los *progresos notables* puede resumirse en la premisa:
Regiones espaciales de máxima probabilidad → *herramienta matemática a partir de la cual puede obtenerse información sobre la ubicación de los electrones alrededor del núcleo.* [7, 11]

Pregunta 2.e: ¿Qué entiende por interpretación probabilística?

La mayoría de las respuestas aluden al significado etimológico de la probabilidad o lo relacionan con interpretaciones estadísticas clásicas. Si se lo vincula a la Mecánica Cuántica es porque se piensa en la imposibilidad de establecer certezas en las mediciones, principalmente en el nivel microscópico, dado la pequeñez de los sistemas involucrados. Ninguna de las respuestas vincula la interpretación probabilística con la superposición de estados de la mecánica cuántica y sólo en unos pocos casos se alude a una interacción entre sistema y observador en la medición. No hay referencias al hecho de que una partícula puede existir en más de un estado simultáneamente, cada uno con cierta probabilidad de suceder o manifestarse luego de una medición.

En la pre encuesta se establecieron cuatro categorías que agrupan a: quienes no contestan (1.D); quienes lo hacen aludiendo al significado de diccionario o etimológico de la palabra probabilidad (1.A); quienes se refieren al cálculo probabilístico clásico como recurso ante la falta de información, ya que no se puede evitar perturbar el estado del sistema al medir en el nivel microscópico (1.B), o bien como un recurso necesario ante la imposibilidad de situar un electrón en determinada zona del espacio (1.C)

En la pos encuesta se establecieron cuatro categorías: 2A: Significado etimológico de la palabra probabilidad (en correspondencia con la 1A), 2.B: el cálculo probabilístico clásico

como método necesario a nivel microscópico (en correspondencia con la 1B); 2K: las probabilidades como comportamiento opuesto al determinismo clásico, a veces necesario para resolver el problema que plantean las relaciones de incerteza, y 2L: la *interpretación probabilística* como característica distintiva de la mecánica cuántica en un sentido epistemológico. En la categoría 2K, la interpretación probabilística se entiende como algo típico o característico de la mecánica cuántica pero con un significado físico ambiguo en donde siguen apareciendo rasgos puramente etimológicos. En la categoría 2L, además, se asocia la probabilidad al carácter no determinista de la mecánica cuántica, a la ecuación de Schrödinger o a sus soluciones, y al $|\psi|^2$.

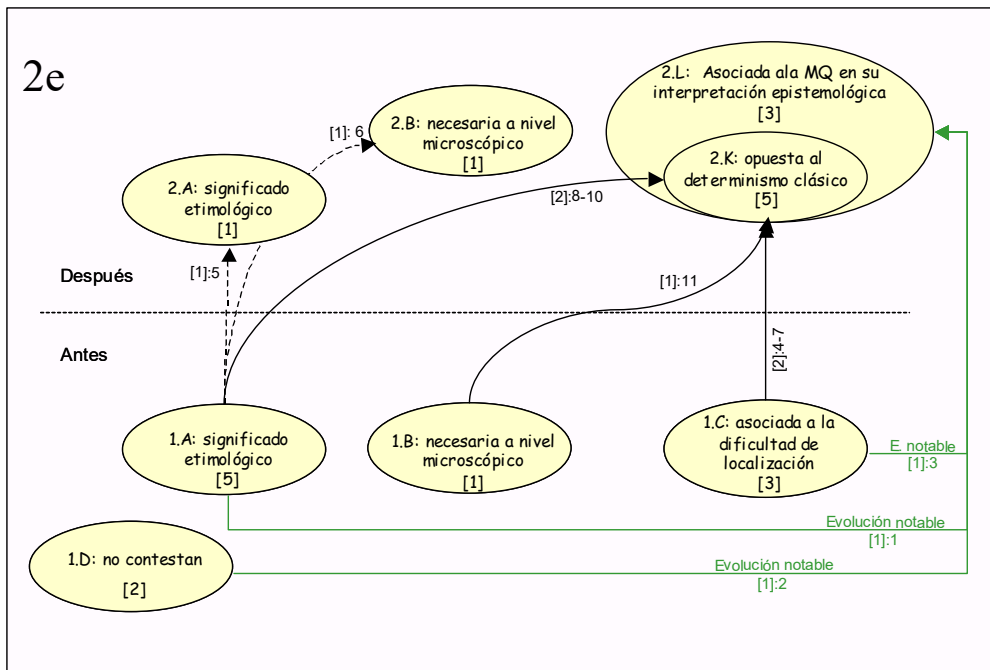
Pregunta	Categorías Pre-encuesta	Categorías Pos-encuesta
2.e: ¿Qué entiende por interpretación probabilística?	<p>1.A: Definición de diccionario de la probabilidad.</p> <p>1. Explicar fenómenos cuánticos en términos de probabilidades.</p> <p>5. Análisis de la probabilidad de que un evento ocurra o no.</p> <p>10. Cuando no se puede determinar un valor exacto, se aplica un cálculo probabilístico.</p> <p>1.B: La probabilidad como método estadístico clásico, al no poder evitarse perturbar el sistema en el nivel microscópico.</p> <p>11. Dada la imposibilidad de estudios microscópicos de la materia, sin perturbarla, su descripción se plantea interpretando probabilísticamente las observaciones experimentales y los modelos propuestos.</p> <p>1.C: La probabilidad asociada a la dificultad de localizar un electrón en determinada zona.</p> <p>3. Visión estadística de la posibilidad de localizar una partícula (un electrón) en una determinada zona.</p> <p>4. La probabilidad de encontrar un electrón en determinada zona.</p> <p>1.D: No contestan</p>	<p>2.A: Definición de diccionario de la probabilidad.</p> <p>5. Análisis acerca de la probabilidad de que ocurra un evento.</p> <p>2:B: La probabilidad como método estadístico clásico necesario en el nivel microscópico al tratar con sistemas de muchas partículas.</p> <p>6. Al trabajar un sistema de partículas se debe necesariamente determinar la probabilidad de que un sistema se encuentre en un estado medio, ya que es indistinguible desde lo microscópico asignar a cada partícula una velocidad o una cantidad de movimiento o posiciones de todas ellas. Aunque esto fuera posible, es laborioso y no viola la mecánica clásica.</p> <p>2.K: Algo opuesto al determinismo clásico. La interpretación probabilística es algo típico o característico de la mecánica cuántica pero con un significado físico ambiguo en donde siguen apareciendo definiciones descontextualizadas.</p> <p>4. Los resultados de los experimentos en FQ se interpretan probabilísticamente mientras que la FC es determinista (un único</p>

		<p>resultado).</p> <p>7. Interpretación que se opone a la de la MC donde la posición y momento lineal son precisamente conocidos.</p> <p>8. Interpretación en base a probabilidades y no certidumbre total, por ej. en el fenómeno de interferencia al pasar la luz por una doble rendija las zonas brillantes y oscuras sobre la pantalla corresponderían a la mayor y menor probabilidad, respectivamente, de que allí llegue un electrón.</p> <p>10. Los resultados de las experiencias en la Física Cuántica son interpretados mediante probabilidades. Se establece aquí una diferencia con la Física Clásica donde los resultados son predecibles.</p> <p>11. Cuando un evento puede tener formas alternativas de producirse la probabilidad de cada forma es $P = |\varphi_1 + \varphi_2|^2$ (φ_1 y φ_2 asociadas a cada forma alternativa), entonces significa que existe interferencia (experiencia de Young). Cuando en el evento es posible identificar las formas posibles de producirse la probabilidad es $P = |\varphi_1|^2 + |\varphi_2|^2$, y entonces no existe interferencia (si ilumino para detectar por dónde pasa el electrón destruyo el patrón de interferencia)</p> <p><i>2.L: Se asocia la probabilidad al carácter no determinista de la mecánica cuántica, a la ecuación de Schrödinger o a sus soluciones y al $|\psi|^2$.</i></p> <p>1. La MC es determinista, permite predecir el resultado de los experimentos. La FQ interpreta los resultados experimentales en término de probabilidades.</p> <p>2. La ecuación de Schrödinger como tal, no es tan importante,</p>
--	--	---

	sino la intensidad de las soluciones (de la función de onda) $|\psi|^2$, que da la probabilidad máxima de encontrar una partícula dentro de la estructura de la materia y su comportamiento microscópico.
--	--

Diagrama de evolución. Análisis por sujeto y por categoría:

Las respuestas recabadas en la pre encuesta, reflejaron una carencia de concepciones sobre el tema, que inducían a los encuestados a recurrir a lo que el sentido común les sugería respecto del significado de *interpretación probabilística*.



Luego del curso, todos los encuestados, salvo uno, entienden que la interpretación probabilística es una característica distintiva de la mecánica cuántica, en contraposición al determinismo clásico (evolución hacia la categoría 2K: 4, 6, 7, 10, 11) e incluso algunos argumentan que su alcance no se limita a la determinación de posiciones del electrón, que guarda alguna relación con $|\psi|^2$, o que es una manera de interpretar resultados

generales de la MQ (evolución hacia la categoría 2.L). Estos últimos aluden indirectamente a cuestiones epistemológicas que marcan la brecha entre la MC y la MQ [1, 2, 3]

En algunos casos se vincula la interpretación probabilística a las relaciones de incerteza y si se suman quienes las vinculan a las soluciones de la ecuación de Schrödinger: Así, se estaría estableciendo una tríada de conceptos problemáticos integrada por *superposición de estados-relaciones de incerteza-interpretación probabilística*, vinculados entre sí pero no del todo diferenciados. Pareciera que no puede diferenciarse uno de estos conceptos, sin involucrar a alguno de los otros en la discusión. Los elementos de esta tríada, constituyen una red de esquemas conceptuales primitivos, elementales e incompletos, que es necesario vincular entre sí para construir un esquema conceptual nuevo más complejo, que los sintetice. Esto sería posible a través de situaciones múltiples que destaquen diferentes aspectos de una misma cuestión (Vergnaud, 1990).

Resumen de resultados de la pregunta 2d:

- La evolución experimentada en los progresos notables puede resumirse en la premisa:
No contestan o aluden a la etimología de los términos o a una necesidad de localización→asociada a la MQ (epistemológica). [1, 2, 3]
- La evolución experimentada en los progresos moderados puede resumirse en el enunciado:
Del significado etimológico y algo necesario a nivel microscópico → propiedad de la MQ opuesta al determinismo clásico. [4, 6, 7, 10, 11]

Pregunta 2f: ¿Qué entiende por ecuación de Schrödinger?

En la pre encuesta se establecieron cuatro categorías que agrupan los individuos que no contestan o responden aludiendo a un significado etimológico muy ambiguo, lo cual indica no haber construido un concepto físico claro (1A); los que coinciden en valorar la

ecuación de ondas como una herramienta matemática que proporciona información útil en MQ, sin mayores precisiones (1B y 1C) y los que le atribuyen una función interpretativa (1D). En la categoría 1B, la ecuación de Schrödinger permite describir el comportamiento ondulatorio, ya sea de fotones o de partículas, pero no se diferencia mayormente entre la ecuación de ondas y sus soluciones (función de onda). Las respuestas agrupadas en la categoría 1D, también destacan la potencialidad de la ecuación de ondas como una herramienta en el *diseño de modelos* de estructura de la materia pero atribuyéndole, además, una *función interpretativa*. Se piensa en la ecuación de onda o en sus soluciones como herramienta útil

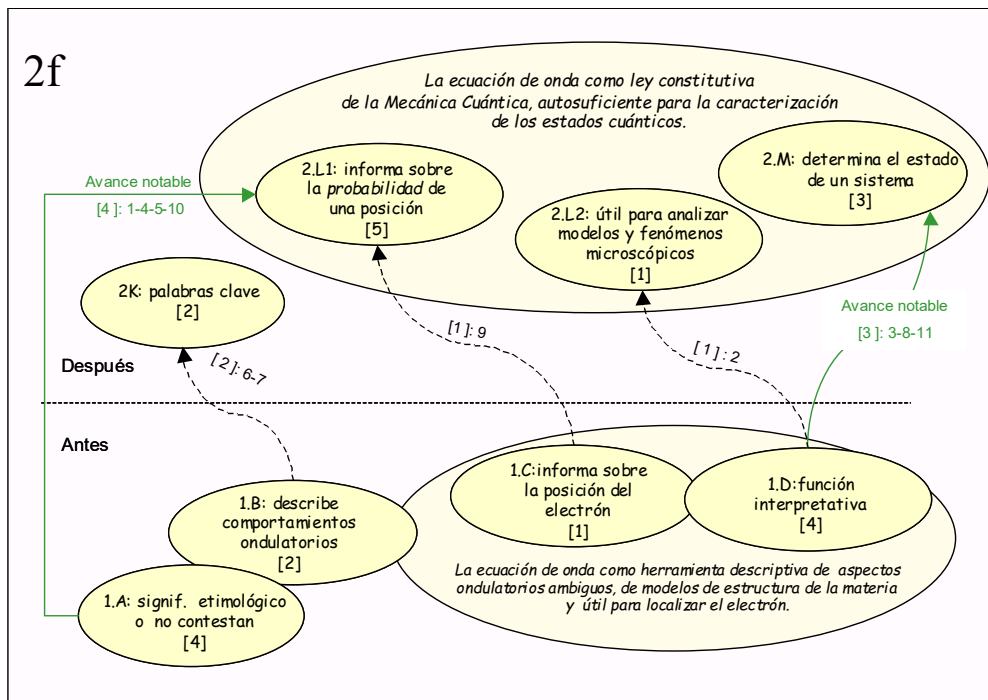
En la pos encuesta se establecieron cuatro nuevas categorías según el significado atribuido a la función de ondas. En la categoría 2.K se vincula la ecuación de onda a la mecánica cuántica, en forma ambigua e imprecisa, a través de palabras clave que aluden a cuestiones centrales, pero sin explicitar relaciones claras. No se hace referencia a las soluciones de la ecuación de Schrödinger, ni a una interpretación en términos de probabilidades. Los términos ecuación de ondas y función de onda aparecen indiferenciados. Es la categoría más alejada de la interpretación oficial. En la categoría 2.L se resalta el carácter matemático de la ecuación de ondas y los aportes de sus soluciones ψ a la descripción del comportamiento cuántico. Se asigna algún significado al cuadrado del módulo de ψ , relacionándolo con la probabilidad, pero en la mayoría de los casos esa probabilidad se limita al conocimiento de la posición de los electrones alrededor de los núcleos atómicos. Se establecieron dos subcategorías: 2.L1: la ecuación de ondas como herramienta para localizar el electrón y, 2.L2 como una ecuación diferencial útil para analizar modelos y fenómenos microscópicos. Finalmente, en la categoría 2M, se interpreta la ecuación de onda, o sus soluciones, como determinantes del estado de un sistema. Es la categoría que más se aproxima a la concepción científica.

Pregunta	Categorías Pre-encuesta	Categorías Pos-encuesta
2f: ¿Qué entiende por ecuación de Schrödinger?	1:A: Se reunieron en esta categoría, los casos que no respondían o bien aludían un significado ambiguo 1. Ecuación de la onda.	2.K: Vinculación ambigua a la MQ a través de palabras clave que aluden a cuestiones centrales, sin explicitar relaciones claramente. No hay

	<p>1.B: <i>La ec. de Schrödinger como herramienta matemática para la descripción del comportamiento ondulatorio de fotones o partículas, sin diferenciar mayormente entre la ecuación de ondas y sus soluciones (funciones de onda).</i></p> <p>6. La forma en que se comporta un fotón desde el punto de vista ondulatorio.</p> <p>7. Es la ecuación de ondas para describir propiedades ondulatorias de partículas.</p> <p>1.C: <i>La ecuación de ondas como herramienta que informa sobre la posición del electrón.</i></p> <p>9. Permite ubicar la posición del electrón alrededor del núcleo, dada por sus cuatro números cuánticos n (nivel), l (subnivel), m (orbital), s (spin).</p> <p>1.D: <i>Se destaca la potencialidad de la ecuación de ondas como herramienta matemática y se le atribuye, además una función interpretativa.</i></p> <p>2. La solución permite conocer cómo es la estructura de la materia (átomos y moléculas)</p> <p>3. Formalidad matemática que sirve para determinar estados cuánticos</p> <p>11. Función matemática dada en término de probabilidades que modificó, junto con otros principios (Heisenberg, por ejemplo) el modelo clásico del átomo.</p>	<p>interpretaciones en términos de probabilidades. Ecuación de ondas y función de onda aparecen indiferenciados. Es la categoría más alejada de la interpretación oficial.</p> <p>6. Establece las tasas de cambio con respecto al tiempo y la energía, asociadas a la función de onda.</p> <p>7. Función o ecuación de onda, también llamada campo de materia, que a diferencia de las funciones de onda clásicas, acepta soluciones complejas.</p> <p>2. L: <i>La ecuación de Schrödinger como herramienta matemática. Se asigna algún significado al módulo al cuadrado de ψ, como relacionado con la probabilidad, pero en la mayoría de los casos esa probabilidad se limita al conocimiento de la posición de los electrones alrededor de los núcleos atómicos. Se establecieron dos subcategorías.</i></p> <p>2:L1: <i>la ecuación de ondas como herramienta para localizar el electrón</i></p> <p>4. Es una ecuación diferencial cuya solución corresponde a funciones de onda, cuyo cuadrado representa la probabilidad de encontrar a la partícula cuántica.</p> <p>5. Ecuación en derivadas parciales que resulta de introducir la función de onda ψ en la ecuación de la energía de una partícula. La función de onda ψ es tal que su cuadrado $|\psi|^2$ nos da la probabilidad de encontrar un electrón en una zona determinada.</p> <p>2.L2: <i>La ecuación de onda como una herramienta para analizar modelos y fenómenos microscópicos.</i></p> <p>2. Ecuación diferencial cuyas soluciones permiten describir y analizar la estructura de la materia y los fenómenos microscópicos.</p> <p>2.M: <i>La ecuación de onda, o sus soluciones, como determinantes del estado de un sistema. Es la catego-</i></p>
--	---	---

		<p>ría que más se aproxima a la concepción científica.</p> <p>8. Ecuación que describe el estado de un sistema físico a través de una función de onda, cuyo cuadrado da la probabilidad de que tal sistema se encuentre en determinado estado.</p> <p>11. Es una ecuación diferencial cuyas soluciones son las φ que nos permiten describir el estado dinámico de una partícula. Las φ dependen de la energía potencial y la energía y total de la partícula, su amplitud al cuadrado da las probabilidades de encontrar una partícula en distintas regiones.</p>
--	--	---

Diagrama de evolución. Análisis por sujeto y por categoría:



En este caso, si bien los encuestados parten de diferentes niveles conceptuales iniciales, la mayoría arriba a la categoría 2L, en la que la ecuación de ecuación de Schrödinger es

valorada como la expresión de una ley de la mecánica cuántica de suficiente potencialidad para caracterizar los estados de los sistemas cuánticos. (evoluciones de las categorías 1A, 1C y 1D hacia la 2L: 1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11). Dentro de este grupo, consideramos que el mayor progreso se dio en el caso de los sujetos que evolucionaron desde las categorías 1A a 2L.1 y 1D a 2M. En estos casos, partiendo de un bajo nivel conceptual (respuestas ambiguas o nulas), luego del curso los encuestados entienden que la ecuación de Schrödinger informa sobre la probabilidad de una posición o permiten describir el estado de un sistema cuántico [1, 3, 4, 5, 8, 10, 11].

Luego de finalizado el curso, la ecuación de Schrödinger llega a adquirir para algunos una dimensión diferente, en la que no sólo representa una herramienta matemática útil para la descripción de diferentes aspectos tales como la posición de las partículas cuánticas o manifestaciones ondulatorias, sino que es en sí misma una ley constitutiva de la MQ, que contiene los elementos necesarios para caracterizar completamente un sistema cuántico en cuanto a su energía, distribuciones espaciales, etc.

Tanto en la pre como en la pos encuesta aparece una indiferenciación en el uso de los términos función de onda y ecuación de onda. Sin embargo, en la pos encuesta, es claro que los encuestados entienden que puede atribuirse un significado físico a $|\psi|^2$ y no a las soluciones de la ecuación.

En general, hay un reduccionismo matemático del formalismo, que limita la utilidad de la función de ondas y no incluye la determinación de valores medios de otras magnitudes físicas diferentes a la posición tales como las distribuciones de cargas entre otras posibles. Esto se debe, en parte, a que los problemas trabajados en el curso calculaban probabilidades de hallar una partícula en una dada región (pozo, barrera, etc.), por lo que debería reverse este aspecto de la práctica.

Uno de los individuos se refiere a la ecuación de ondas como “ecuación de energía”. Esto puede estar relacionado con una visión ingenua o simplificada de su deducción.

Resumen de resultados de la pregunta 2f:

- La evolución experimentada en los progresos notables puede resumirse en la premisa:
No contestan o contestan en forma ambigua → informa sobre la probabilidad de una posición o permiten describir el estado de un sistema cuántico. [1, 3, 4, 5, 8, 10, 11]

Pregunta 3: ¿Cómo caracterizaría un fotón?

Se establecieron tres categorías iniciales: 1.A: el fotón se interpreta como paquete de energía, sin masa, eventualmente asociado a una frecuencia o a un campo electromagnético; 1.B: el fotón asociado a los espectros atómicos; y 1.C: el fotón como partícula indiferenciada, ya sea de energía o sometida a leyes del movimiento ondulatorio. En las dos primeras categorías hay una referencia muy fuerte a la cuantificación de la energía y se detectan concepciones con origen, posiblemente, en el tratamiento que presentan los libros de textos tradicionales de Física General en los que se describe al fotón como cuantos o paquetes de energía asociados a la ecuación de Planck $E=h \cdot \nu$, y se retoma el tema en el átomo de Bohr para describir la emisión de radiación de un átomo excitado que vuelve a su estado fundamental.

En la pos encuesta se distinguen dos categorías. En la categoría 2K el fotón aparece como una cantidad discreta, o cuanto de energía, sin masa, que viaja a la velocidad de la luz, ligada fuertemente a una concepción ondulatoria. A diferencia de la categoría 1.A el uso de términos específicos es más ajustado y ya no se utilizan términos como “*paquetito de energía*”, o “*partícula indivisible de energía*”. En la categoría 2L se asigna al fotón un comportamiento dual. Se diferencian quienes no hacen mayores aclaraciones respecto de ese comportamiento (Cat.2.L1) de quienes asocian el comportamiento dual específicamente a ondas y partículas (Cat.2 L2)

Pregunta	Categorías Pre-encuesta	Categorías Pos-encuesta
3. ¿Cómo caracterizaría un fotón?	1.A Paquete de energía, sin masa, idea de dualidad asociada a la radiación. Referencia muy fuerte a la cuantifica-	2.K Cantidad discreta de energía, sin masa, viaja a la velocidad de la luz, ligada fuertemente a una concepción

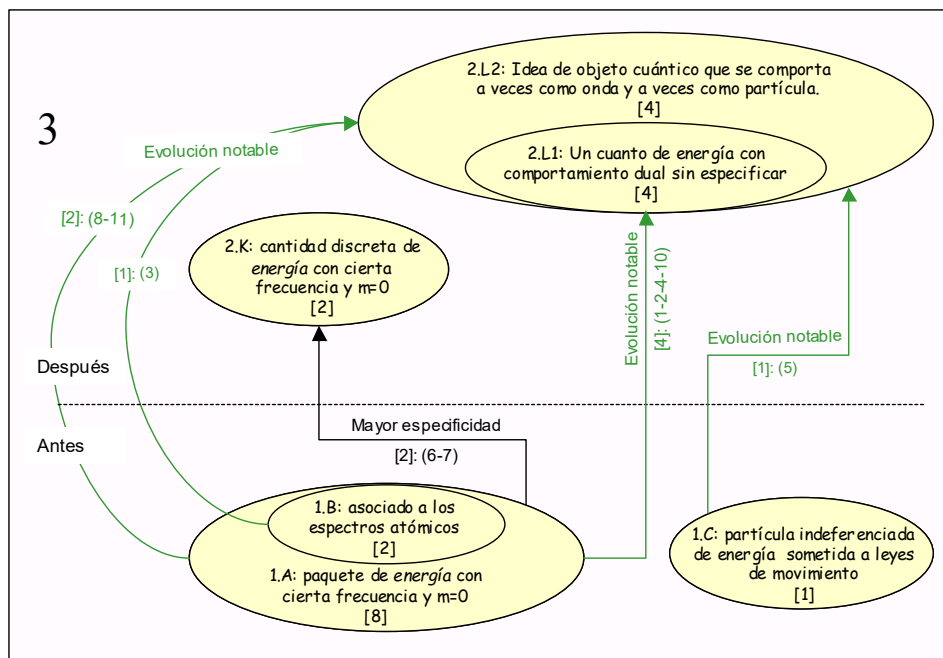
	<p><i>ción de la energía.</i></p> <p>1. Paquetito de energía. Lo caracterizaría por la frecuencia.</p> <p>2. Partícula indivisible, sin masa, portadora de una cantidad cuantificada de energía.</p> <p>4. Como un paquete de energía que viaja a la velocidad de la luz y no tienen masa.</p> <p>11. Una partícula de energía que contiene asociada una frecuencia que determina su comportamiento.</p> <p><i>1.B Se agrega a la categoría anterior una asociación a los espectros atómicos.</i></p> <p>3. Una cantidad bien determinada de energía (cuanto) emitida por un electrón al retornar a su estado estable (luego de estar excitado), diferente en cada salto cuántico y en cada sustancia.</p> <p>9. Paquete de energía que puede absorber o ceder un electrón excitado.</p> <p><i>1.C Como partícula de energía, o sometida al movimiento ondulatorio. Aparecen juntas concepciones de partículas y ondas.</i></p> <p>5. Una partícula que se desplaza de acuerdo a las leyes del movimiento ondulatorio</p>	<p><i>ondulatoria. A diferencia de la categoría 1.A el uso de términos específicos es más ajustado (ya no se utilizan los términos “paquetito de energía”, o “partícula indivisible de energía”).</i></p> <p>6. Lo caracterizaría con una longitud de onda y una frecuencia que si bien son características de una onda, están asociadas a un cuanto de energía.</p> <p>7. Como una cantidad elemental de energía (por lo tanto sin masa y que se desplaza con velocidad c), proporcional a una frecuencia de radiación (Planck).</p> <p><i>2.L Un cuanto de energía sin masa, que viaja a la velocidad de la luz y con comportamiento dual. Se establecieron dos subcategorías</i></p> <p><i>2.L1 comportamiento dual indefinido.</i></p> <p>1. Cantidad discreta de energía, que no tiene masa en reposo, que viaja a la velocidad de la luz, con comportamiento dual.</p> <p>10. Es una cantidad discreta de energía que se mueve a la velocidad c, que no tiene masa y que a veces se comporta como onda y a veces como partícula (comportamiento dual)</p> <p><i>2.L2 comportamiento dual asociado a la MQ</i></p> <p>3. Es un objeto cuántico que podría definirlo como un paquete de energía que viaja a la velocidad de la luz y carece de masa, pero al ser objeto cuántico puede comportarse como onda o como partícula.</p> <p>5. Como un objeto cuántico que a veces se comporta como partícula ($E=h \cdot \nu$; $p=h/\lambda$) y a veces como onda ($\lambda=h/p$; $\nu=E/p$)</p> <p>11. Una partícula con masa en reposo nula (significa que siempre se mueve), con velocidad c rectilínea. Tiene una energía igual a $h\nu$ y una cantidad de movimiento. Es el cuanto de energía que se intercam-</p>
--	---	--

		bia por ejemplo en la interacción radiación-materia (efecto fotoeléctrico) y en las transiciones de niveles de energía (absorción y emisión de fotones). Es una partícula asociada al campo electromagnético.
--	--	---

Diagrama de evolución. Análisis por sujeto y por categoría:

La imagen del fotón como paquete de energía, originada raíz en la presentación tradicional de los libros de texto, persiste luego de la instrucción como una visión de paquete o cuanto de energía a la que se adicionan aspectos propios de la física cuántica, sin llegar a llegar a construirse un objeto cuántico definido, en el que partículas y ondas comparten comportamientos similares.

Lo mayores progresos corresponden a la evolución hacia la categoría 2L.2 (3, 5, 8, 11) en la que el fotón se asume como un objeto con comportamientos propios de la mecánica cuántica, en algunos casos en forma totalmente indiferenciado de la visión de cuántica de partículas.



Resumen de resultados de la pregunta 3:

La evolución experimentada como progresos notables puede resumirse en las premisas:

- Paquete de energía con energía de cierta frecuencia y con masa nula → objeto cuántico, comportamiento dual [8, 11].
- Cantidad de energía asociada a los espectros atómicos → idea de objeto cuántico [3].
- Partícula con movimiento ondulatorio → idea de objeto cuántico [5].
- Paquete de energía con energía de cierta frecuencia y con masa nula → cuanto de energía con comportamiento dual [1, 2, 4, 10]

Pregunta 4: ¿Puede un fotón experimentar interferencias constructivas y destructivas?

Inicialmente se establecieron dos categorías. En la categoría 1A se asigna al fotón preferentemente un carácter de partícula clásica y por ello no efectúa interferencias, y en la 1B se le asigna un carácter ondulatorio ligado fuertemente al comportamiento macroscópico de la radiación. En la categoría 1A, si bien la radiación no se limita a un modelo del continuo, se fuerza una idea de partícula para el fotón que impide construir un concepto que aúne las características de ambas descripciones (ondas y partículas). Podría decirse que el concepto de fotón muy inclinado hacia el lado de las partículas, se acomoda en la estructura conceptual clásica en que las cosas son, o bien ondas o bien partículas

Para la pos encuesta, se establecieron nuevamente dos categorías. La categoría 2K no difiere demasiado de la 1B en la que el fotón obedece a un comportamiento clásicamente ondulatorio asociado a la experiencia de la doble rendija; mientras en que en la categoría 2L se alude al comportamiento dual del fotón, se lo vincula en algunos casos al comportamiento de las partículas y se afirma que *según las circunstancias se manifiesta*

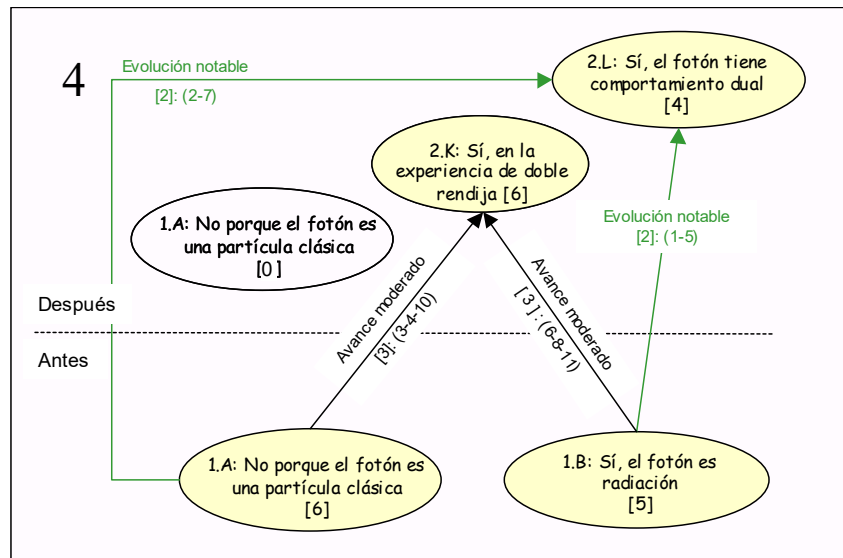
como onda o como partícula. Se evidencia, en esta categoría, un importante avance conceptual hacia la construcción del objeto cuántico.

Pregunta	Categorías Pre-encuesta	Categorías Pos-encuesta
<p>4: ¿ Puede un fotón experimentar interferencias constructivas y destructivas?</p>	<p>1.A El fotón como una partícula clásica: no puede experimentar interferencias o pero tiene onda asociada que puede hacerlo. 2. Su onda asociada, sí. 3. No creo que sea el fotón el que la experimenta. 7. No. Está actuando como corpúsculo y no como onda. 1.B Prevalece el carácter ondulatorio del fotón, ligado fuertemente a un concepto macroscópico de la radiación. 5. Sí. Por ejemplo: la luz puede ocurrir que: Luz + Luz = más luz (interferencia constructiva); Luz + Luz = oscuridad (interferencia destructiva) 6. Sí, desde el punto de vista ondulatorio. Las ondas electromagnéticas son transversales por lo tanto se manifiestan fenómenos de difracción e interferencia.</p>	<p>2.K Similar a la 1.B. El fotón obedece a un comportamiento clásicamente ondulatorio, asociado a la experiencia de la doble rendija. 3. Sí, como en la experiencia de la doble rendija. 6. Sí, un fotón puede experimentar interferencias constructivas y destructivas. El experimento de la doble rendija lo manifiesta. 8. Sí, cuestión que manifiesta su función de onda asociada. 2.L Se alude al comportamiento dual del fotón y se lo compara en algunos casos al de las partículas (esbozo de objeto cuántico) 1. Sí, cuando en determinadas experiencias se manifiesta como onda. 5. Sí, un fotón puede experimentar interferencias constructivas y destructivas (caso en que su comportamiento tiene características ondulatorias). Ej.: lo mismo pasa cuando los electrones se los hace atravesar dos rendijas cuyos tamaños sean del mismo orden de magnitud que la longitud de onda asociada al mismo y siempre que no se intente pretender “observarlo” para saber por cuál pasó.</p>

Diagrama de evolución. Análisis por sujeto y por categoría:

La asociación de la radiación a las ondas, se torna en un obstáculo difícil de sortear. Se define al fotón como cuantos o como partículas de energía, pero no siempre se lo vincula con comportamientos similares típicos de las partículas. Algo similar sucedió en la pregunta 3 ya discutida (¿cómo caracterizaría un fotón?)

La categoría 2L, en la que se atribuye un carácter dual al fotón, no existía previamente al cursado. Esta es una categoría construida durante el desarrollo de la alternativa y constituye un logro alcanzado de gran interés (progresos notables que corresponden a las evoluciones desde las categorías 1.A y 1B a la 2L: 1, 2, 5, 7).



Los individuos que han evolucionado a la categoría 2L, vinculan indistintamente comportamientos ondulatorios como los evidenciados en las interferencias, tanto al fotón como a las partículas y entienden que la manifestación ondulatoria del fotón depende de la experiencia que se observe, ya que en otros casos también podría manifestarse como partícula.

Es interesante destacar que luego del cursado desaparece la categoría 1.A en la que se afirmaba que un fotón no puede experimentar interferencias dado su carácter discontinuo.

Resumen de resultados de la pregunta 4:

- La evolución experimentada en los progresos notables puede resumirse en las premisas:

No, el fotón se comporta como una partícula clásica → Sí, el fotón tiene comportamiento dual [2,7]

Sí, el fotón es radiación → Sí, el fotón tiene comportamiento dual [1,5]

- La evolución experimentada en los progresos moderados puede resumirse en las premisas:

No, el fotón se comporta como una partícula clásica → Sí, en la experiencia de la doble rendija [3, 4, 10]

Sí, el fotón es radiación → Sí, en la experiencia de la doble rendija [8, 11]

Pregunta 5: ¿Qué entiende por comportamiento dual de una partícula? ¿Podría dar un ejemplo?

Se establecieron tres categorías iniciales, según el ente al que se le atribuye el comportamiento dual. La mayoría de las respuestas coincidieron en asociar el comportamiento dual a la radiación y sólo algunos esbozan la existencia de un objeto cuántico más general (radiación o materia). En la categoría 1A las respuestas son ambiguas y no aparecen ejemplos. En la categoría 1B se presenta una fuerte asociación del comportamiento dual a la luz o a la radiación (si bien se habla a veces de comportamiento dual de partículas, todos los ejemplos se refieren a la radiación). La categoría 1C, se refiere a la dualidad como comportamiento característico de la mecánica cuántica (ver respuestas a pregunta 6). Se aceptan dos comportamientos posibles (discreto y ondulatorio), con ejemplos de partículas y/o radiación, pero no parece haber un intento de unificarlos en una única representación de objeto cuántico.

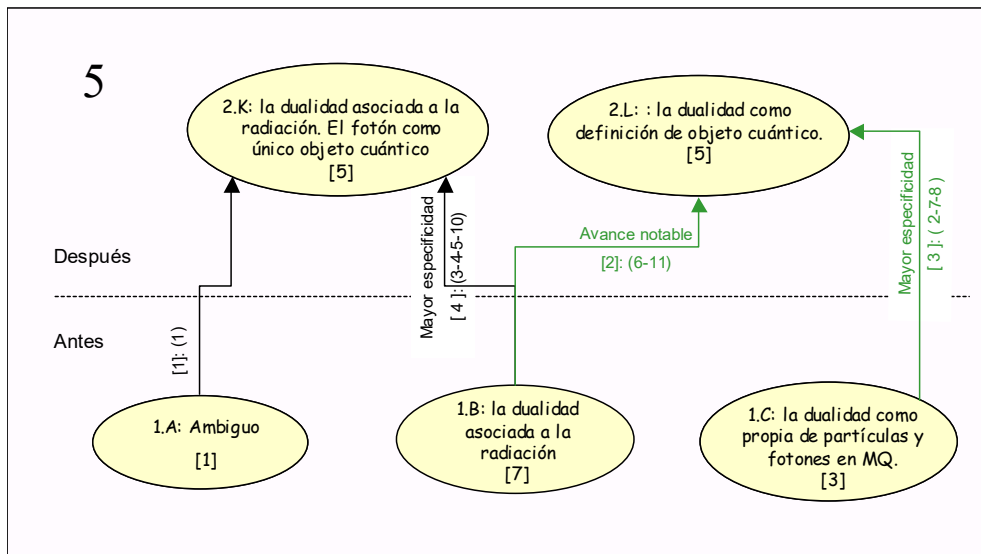
En la pos encuesta las respuestas se agruparon en dos categorías. La categoría 2K agrupa las respuestas de quienes asignan el comportamiento ondulatorio sólo a la radiación. La categoría 2L agrupa las respuestas de quienes reconocen un objeto cuántico de comportamiento dual en mecánica cuántica, y parecen transitar una etapa de generalización en la que del concepto de objeto clásico caracterizado por dos representaciones disjuntas (radiación y materia) se van aproximando lentamente a una idea de objeto cuántico que asume propiedades de ambas representaciones. En la categoría 2K si bien se circunscriben a la radiación, hay mayor precisión en las respuestas y una definición más

ajustada del fotón como objeto cuántico, al que se asigna comportamientos propios de las partículas.

Pregunta	Categorías Pre-encuesta	Categorías Pos-encuesta
<p>5: ¿Qué entiende por comportamiento dual de una partícula? ¿Podría dar un ejemplo?</p> <p>la mayoría de las respuestas coincidieron en asociar el comportamiento dual a la radiación</p>	<p>1.A Ambiguo sin ejemplos.</p> <p>1. Partícula cuyo comportamiento se explica con el modelo clásico y como onda.</p> <p>1.B Se presenta una fuerte asociación del comportamiento dual a la luz o a la radiación. Una partícula con comportamiento dual sólo se asocia al fotón. Todos los ejemplos se refieren a la radiación.</p> <p>3. La luz es un ejemplo. A veces se usa el modelo de onda para explicar algunos fenómenos y otras el de partícula.</p> <p>5. La partícula desplazándose de acuerdo a las leyes del movimiento ondulatorio (Ej.: un fotón).</p> <p>6. Comportamiento dual de una partícula es considerar a la misma, como partícula o como onda, según el modelo. Ej.: la luz como fotones que impactan sobre una pantalla o como frente de onda incidiendo sobre una superficie.</p> <p>9. El efecto fotoeléctrico se puede explicar asignándole a la luz un comportamiento corpuscular y el fenómeno de difracción e interferencia se puede explicar mediante un modelo ondulatorio de la luz.</p> <p>1C La piensa la dualidad como una característica de la mecánica cuántica. Se aceptan dos comportamientos posibles (discreto y ondulatorio) tanto para la radiación como para partículas atómicas, que mantienen independencia ontológica.</p> <p>2. El electrón, por ej., puede tomarse como partícula y también comportarse, “no uno, sino muchos”, como una onda, ej. Difracción. Un conjunto de electrones</p>	<p>2.K Se asigna el comportamiento ondulatorio sólo a la radiación, no se hacen comentarios sobre las manifestaciones ondulatorias de la materia. Hay mayor precisión en las respuestas y una definición más ajustada del fotón como objeto cuántico, al que se asigna comportamientos propios de las partículas.</p> <p>4. Las partículas cuánticas tienen un comportamiento dual, a veces se comportan como ondas y otras como partículas. Ej.:el fotón se comporta como partícula en el efecto fotoeléctrico y como onda en la experiencia de doble rendija.</p> <p>5. Entiendo por comportamiento dual el caso en que una partícula a veces se comporta como partícula y a veces como onda. Ej.: fotones al atravesar dos rendijas experimentan difracción e interferencia (comportamiento ondulatorio), y al incidir sobre metales arrancan electrones con cierta energía (Efecto fotoeléctrico: comportamiento corpuscular).</p> <p>2.L Aparece la dualidad asociada a las partículas y los ejemplos elegidos se refieren a objetos clásicamente definidos como partículas</p> <p>2. El comportamiento dual de una partícula significa que según qué fenómeno estemos estudiando, se comporta como partícula y onda. Por ej., el electrón en el experimento de la doble rendija se comporta como onda siempre y cuando no sea “observado”. Si fuera así, colapsa y su comportamiento es de partícula.</p> <p>6. Es considerar por ejemplo un electrón como onda o como partícula. Desde la cuántica podemos decir que un electrón interfiere consigo mismo o</p>

	<p>pasando por una ranura “se difractan”.</p> <p>7. Comportamiento observable a escala atómica, según el cual un sistema no es definitivamente onda o partícula sino que se acepta una u otra representación. Ejemplo: el electrón clásicamente es una partícula pero produce imágenes de difracción entonces es una onda.</p> <p>8. Manifestar/producir fenómenos propios o típicos tanto de onda como de partícula. Ej.: los fotones, los electrones (difracción, efecto fotoeléctrico).</p>	<p>bien asignarle una posición y velocidad como partícula.</p> <p>7. Según la relación de incertidumbre es posible que tanto la materia como la energía tengan comportamiento de onda o de partículas. Por ejemplo: la luz se propaga como onda pero interactúa como corriente de partículas (por ej. En el efecto fotoeléctrico.)</p> <p>11. Una partícula elemental (electrón, protón) a veces se comporta como onda (experiencia de Young con electrones) y se obtiene un patrón de interferencias, y a veces como partícula (efecto Compton, dispersión de radiación por electrones libre, se puede pensar como una colisión (el electrón adquiere un momento p y una energía E. de Broglie le asocia a la partícula un campo de materia.</p>
--	--	---

Diagrama de evolución. Análisis por sujeto y por categoría:



En el caso de la pre encuesta muchas de las respuestas evidencian una fuerte asociación del concepto de dualidad, al comportamiento de la radiación a pesar de que en la pregun-

ta se especificaba *comportamiento dual de una partícula*. Una posible explicación, podría estar en la forma en que los libros más usuales tratan el tema de la dualidad. Una recorrida rápida por la bibliografía de física básica o de enseñanza media que incluya temas de física cuántica, muestra que la dualidad está fuertemente identificada con el efecto fotoeléctrico, y la cuantización con fotones a los que se define como *partículas de energía* o *cuantos de energía*, pocas veces se presentan ejemplos en donde también la materia experimenta comportamiento dual. Sucede en este caso algo parecido al efecto que causa el desarrollo temprano del modelo de Bohr siguiendo la secuencia histórica en la que se la posterga de la presentación modelos cuánticos más actuales. En ese caso, el modelo remanente y el que resulta más plausible y de mayor potencialidad es el primero que se estudia. A esto se agrega que en la mayoría de los casos no se ofrece un modelo alternativo, o si se lo hace, se posterga su introducción hasta después de la presentación de contenidos complejos (ecuación de Schrödinger, números cuánticos, etc.) con lo que raras veces se llega a discutir o reinterpretar el formalismo desarrollado. En el caso de los fenómenos a los que nos referimos en la pregunta 5, y que muestran comportamientos duales (de radiación o de partículas) sucede algo similar. Los libros presentan primero el novedoso comportamiento discreto de la radiación y no se llega a discutir la dualidad de la materia. Los profesores tienen algún conocimiento subyacente de que esto existe pero no se han planteado la idea de una partícula comportándose como onda. Esto se comprueba en las entrevistas, en donde si bien los profesores afirman conocer la dualidad como algo propio de la mecánica cuántica (tanto de la radiación como del *electrón* y no de la materia en general), al presentárseles una imagen de una difracción de neutrones o de electrones, se desconciertan y son incapaces de elaborar una explicación.

En el caso de la pos encuesta, en los casos que se asignan comportamientos ondulatorios a las partículas cuánticas, los ejemplos sólo se refieren a fenómenos experimentados por la radiación (efecto fotoeléctrico y Compton). Sin embargo se evidencia un leve avance en lo que respecta a la profundidad de la descripción de estos fenómenos. La categoría 2L, que agrupa a quienes parecen tener una ida más acabada de *objeto cuántico*, representa el mayor nivel conceptual alcanzado, por el detalle con que se describe el

comportamiento dual tanto de partículas como de fotones. Esta categoría es alcanzada desde las categorías 1B (*progresos notables*: 6,11) y desde la categoría 1C partiendo (*progresos moderados* pues parte de un buen nivel conceptual inicial: 2, 7, 8)

Resumen de resultados de la pregunta 5:

- La evolución experimentada en los progresos notables puede resumirse en la premisa:
La dualidad asociada a la radiación → la dualidad como definición de objeto cuántico [6, 11]
- La evolución experimentada en los moderados o progresos notables pero con un buen nivel de conceptual inicial puede resumirse en la premisa:
La dualidad como comportamiento característico de las partículas y de la radiación (separadamente) → la dualidad como definición de objeto [2, 7, 11]

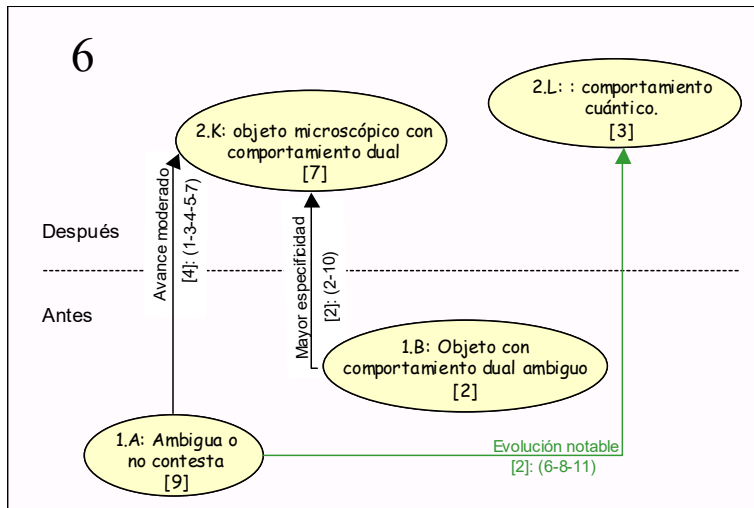
Pregunta 6: ¿Cómo describiría un objeto cuántico?

En la pre encuesta se establecieron dos categorías: los que contestan (1.B) y los que no lo hacen, o bien dan respuestas ambiguas(1.A). Entre los primeros, la única característica relevante que se asigna al objeto cuántico es su comportamiento dual, sin especificar y sin ejemplificar.

En la pos encuesta se establecieron dos categorías. En ambas se le confiere un comportamiento dual al objeto cuántico. Pero mientras en la categoría 2K ese comportamiento es ambiguo, por lo general referido a las partículas, y se circunscribe a las dimensiones microscópicas, en la 2L se asigna al objeto cuántico, otras propiedades además de la naturaleza dual sin hacer referencia explícitas a ondas o a partículas. Así se dice que un objeto cuántico admite superposición de estados, tiene una longitud de onda asociada, y no puede conocerse con certeza su posición y momento.

Pregunta	Categorías Pre-encuesta	Categorías Pos-encuesta
<p>6: ¿Cómo describiría un objeto cuántico?</p>	<p>1A: no contesta o dan repuestas ambiguas</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. No contesta. 4. No contesta. 5. No contesta. 7. No contesta. 8. No contesta. 9. No contesta. 11. No contesta. <p>3. Cualquier objeto, dado que todos radian, aunque para describirlo mejor requeriría una descripción más extensa y ordenada.</p> <p>6. Un objeto cuántico lo describiría como un objeto que transite energía, por ej . Un protón, un electrón, un haz de luz.</p> <p>1B: Caracterizan el objeto cuántico por un comportamiento dual, sin especificar ni ejemplificar</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Aquél que se comporta tanto como onda como partícula. 10. Una partícula que tiene comportamiento ondulatorio. 	<p>2K: comportamiento ambiguo y circunscripto a las dimensiones microscópicas</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Partículas del mundo microscópico, con comportamiento dual. 2. Es un objeto microscópico con comportamiento dual y propiedades cuantizadas. 3. Objeto microscópico: fotón, electrón, protón, que presenta comportamiento dual. 4. Un objeto microscópico (ej.:el electrón, fotón, neutrón, con comportamiento dual) 5. Como aquél que se comporta como partícula y a la vez como onda. 7. Lo caracterizaría con las mismas propiedades del fotón agregando su naturaleza dual. 10. Un objeto con comportamiento dual. <p>2L: objeto cuántico con comportamiento dual y otras propiedades propias de la MQ</p> <ol style="list-style-type: none"> 6. Un objeto cuántico está caracterizado por su longitud de onda y su frecuencia. Son objetos cuánticos aquellos que se pueden describir desde el enfoque microscópico (electrones, protones, etc.) 8. Objeto no macroscópico, es decir, subatómico o microscópico (como fotones o electrones) que presenta comportamiento cuántico: superposición de estados, dualidad onda-partícula. 11. Un objeto cuántico es (fotones y partículas elementales) un objeto que no presenta comportamiento predecible, tiene un comportamiento dual (onda-partícula). Puede estar en varios estados a la vez (superposición cuántica). Se los estudia a través de cálculos probabilísticos, no hay certeza en su posición, momento, etc.

Diagrama de evolución. Análisis por sujeto y por categoría:



La ausencia de respuestas iniciales, es una muestra de la falta de formación de los profesores y de sus limitaciones para construir un modelo que aúne las propiedades descritas en los ítems anteriores. (Notar que muchos de estos encuestados no tuvieron mayores problemas en responder respecto qué entendía por dualidad de la luz o la materia, entienden al fotón como un concepto que surge a partir de la física cuántica, aceptan que las partículas presentan comportamiento dual, han hablado de las relaciones de incerteza y los orbitales pero, sin embargo, no tienen una representación de un objeto propio de la cuántica que aúne todas las propiedades que ellos mismos han reconocido). En la pos encuesta, es evidente la evolución en cuanto a reconocer un objeto cuántico en las partículas y en los fotones. Sólo en la categoría 2L se le asocian otras propiedades cuánticas como superposición de estados, incertezas, longitudes de onda, etc., además de su comportamiento dual.

Resumen de resultados de la pregunta 6:

- La evolución experimentada en los progresos notables puede resumirse en la premisa:
No contestan → caracterizan un objeto cuántico por su comportamiento dual y otras propiedades. [6, 8, 11]

- La evolución experimentada en los progresos moderados puede resumirse en la premisa:

No contestan → caracterizan un objeto cuántico sólo por su comportamiento dual. [1, 3, 4, 5, 7]

Pregunta 7: ¿Es la superposición de estados en la MQ una situación que describe el verdadero estado de los objetos cuánticos o sólo una herramienta matemática ya que el objeto cuántico debe estar en algún estado determinado?

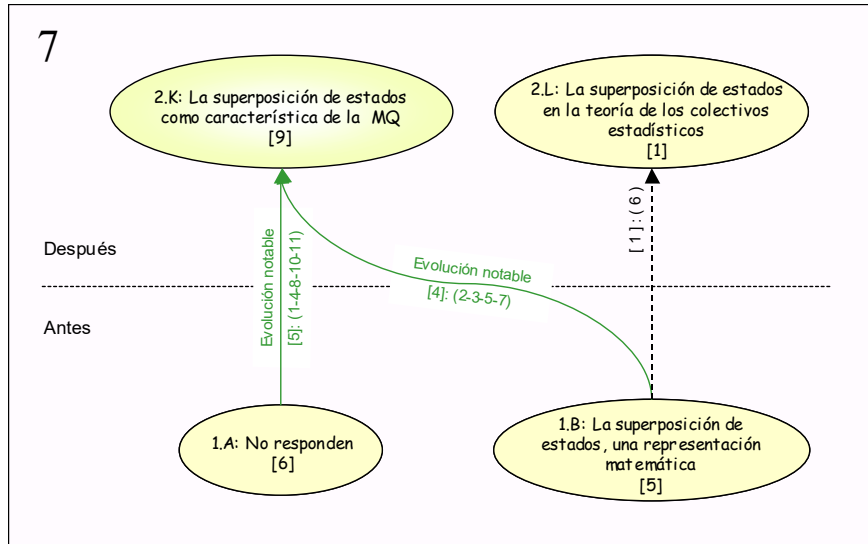
Las respuestas de la pre encuesta se agrupan claramente en dos únicas categorías: quienes no responden (1.A) y quienes consideran la superposición de estados una mera herramienta matemática necesaria para salvar una falta de conocimiento (1.B). Consideran, entonces, que el objeto cuántico “está” en alguno de los posibles estados que constituye esa superposición, pero que la teoría proporciona un conocimiento limitado por lo que es imposible identificarlo.

En la pos encuesta las respuestas se agrupan prácticamente en una única categoría (2.K) en que consideran la superposición de estados una característica propia de la MQ. Se acepta que un objeto cuántico pueda estar en varios estados simultáneamente y que esto es algo que caracteriza a la MQ. Una segunda categoría (2L) está constituida por sólo una respuesta que alude a Bohm y a la posibilidad de evitar la idea de colapso de la función de ondas según algunas teorías alternativas que no detalla.

Pregunta	Categorías Pre-encuesta	Categorías Pos-encuesta
7: La superposición de estados, ¿es una característica de la MQ o una representación matemática (el objeto cuántico está en un estado que no puede conocerse)?	1A: No responden 1. No contesta 4. No contesta 8. No contesta 9. No contesta. 10.No contesta 11. No contesta 1B: la superposición de estados una herramienta matemática necesaria	2K: la superposición de estados una característica propia de la MQ 1. Situación que describe el verdadero estado de los objetos cuánticos. 2. Es una situación que describe el verdadero estado de los objetos cuánticos 3. Entiendo que la situación real es

	<p><i>para salvar una falta de conocimiento</i></p> <p>2. Es una representación matemática, el objeto está en algún estado que se necesita la representación matemática para describirlo.</p> <p>3. Creo que lo último es lo correcto: es una descripción matemática.</p> <p>5. Creo que el objeto cuántico debe estar en algún estado determinado, por lo tanto es una representación matemática.</p> <p>6. Creo que es una representación matemática ya que un objeto cuántico debe estar en algún lugar determinado por su nivel de energía.</p> <p>7. Es una representación matemática.</p>	<p>la primera: la superposición de estados planteada por la MQ como situación que describe el verdadero estado de los objetos cuánticos.</p> <p>4. La superposición de estados planteados por la MQ es una situación que describe el verdadero comportamiento de los objetos cuánticos. Cuando se detecta un objeto, colapsa la función de onda y toma un estado determinado.</p> <p>5. Es una situación que describe el verdadero estado de los objetos cuánticos.</p> <p>7. Describe el verdadero estado de los objetos pero estos se tornan inobservables.</p> <p>8. Si un objeto cuántico existe, existe e algún estado, pero ese estado se altera cuando queremos determinarlo o medirlo. Ese estado que existe, pero que no se puede determinar sin alterarlo o “destruirlo” es lo que describe la mecánica cuántica como superposición de estados.</p> <p>10. La superposición de estados planteada por la mecánica cuántica describe el verdadero estado de los objetos cuánticos.</p> <p>11. La superposición de estados en la MQ describe el verdadero estado de los objetos. El proceso de medición destruye la superposición cuántica. Ejl.: experimento de un campo de fotones muestra cómo se produce la decoherencia. Nos muestra por qué esta superposición escapa a nuestra percepción</p> <p><i>2L: otras respuestas</i></p> <p>6. Hay teorías alternativas al respecto ya que Bohm dice que el objeto cuántico debe estar en algún estado y no estará en el lugar donde colapsa la función de onda.</p>
--	---	--

Diagrama de evolución. Análisis por sujeto y por categoría:



La superposición de estados es un tema raramente desarrollado o discutido en los cursos tradicionales de MQ. No se tiene una representación definida del concepto y se recurre a la idea de superposición matemática para dar una explicación, esto se refleja en las respuestas de la categoría 1B. Las explicaciones vertidas en la pre encuesta parecen originarse en conceptos extrapolados desde visiones anteriores de la física (en ondas, por ejemplo, la superposición de soluciones sigue siendo solución) o simplemente como una propiedad matemática de las ecuaciones lineales.

Las evoluciones hacia la categoría 2 K [1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 11], muestran un avance importante y una superación de representaciones clásicas previas. Los conceptos discutidos en el curso, fueron asimilados de manera fructífera y las discusiones y puestas en común de creencias y opiniones, permitieron construir nuevos esquemas conceptuales, más ligados al campo de la Física Cuántica. En general, se evidencia un progreso importante en la comprensión de la superposición de estados cuánticos, tema que fue uno de los puntos clave tratados en el curso. La ausencia del un tratamiento del tema en la instrucción previa, facilitó, en este caso, el camino para la construcción de este nuevo concepto.

Resumen de resultados de la pregunta 7:

- La evolución experimentada en los progresos notables puede resumirse en las premisas:

No contestan → *la superposición de estados como característica de la mecánica cuántica.*[1, 4, 8 10, 11]

Una representación matemática → *la superposición de estados como característica de la mecánica cuántica.*[2, 3, 5, 7]

Pregunta 8: ¿Cómo describiría el modelo actual del átomo?

Se establecieron tres categorías iniciales: 1.A: no contestan o sus repuestas son muy ambiguas, tampoco describen una estructura para el átomo; 1.B: se describe el modelo de Bohr y se hacen referencias claras a magnitudes mecánicas clásicas tales como la traslación alrededor del núcleo y giro sobre sí mismos de los electrones y semiclásicas (niveles de energía); y 1.C: se describe un modelo atómico más cercano al modelo científico, aunque en algunos casos, persisten cuestiones como considerar a los orbitales como zonas espaciales. En este caso, ya no se habla de órbitas de los electrones y se acepta que su ubicación está regida por ciertas funciones de probabilidad, los orbitales, aunque a veces persiste una interpretación espacial de los mismos. Está presente la idea de incerteza en la determinación de algunas magnitudes físicas, como posición y momento, y se destaca la aparición de los números cuánticos a partir de la resolución de la ecuación de Schrödinger. Se cita al spin, sin relacionarlo con la rotación del electrón sobre sí mismo. Parecen ser las respuestas más cercanas al modelo científico.

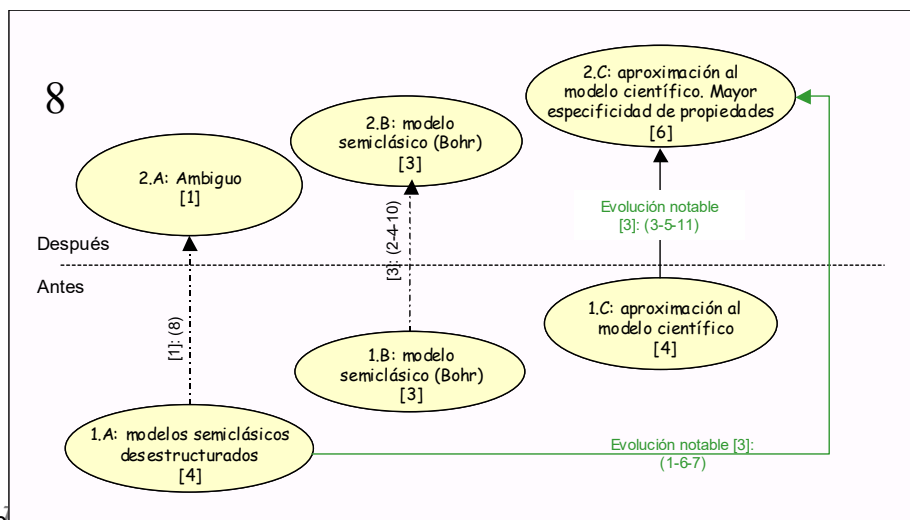
En la pos encuesta se establecieron tres categorías en concordancia directa con las de la pre encuesta: 2.A, respuestas ambiguas 2.B, descripción de modelos semiclásicos con gran influencia del modelo de Bohr, y 2.C, descripción de modelos cuánticos aproximados (con mejor descripción de las propiedades específicas). En esta última, se agrega a la descripción dada en la 1C, el aporte del cuadrado de la función de onda $|\psi|^2$, y las relaciones de incerteza. Se cita, además de la cuantificación de los niveles de energía, la

cuantificación del momento angular. En un caso se habla de densidad de electrones con una forma determinada en el espacio, lo que es muy cercano a la descripción relatada por Petri.

Pregunta	Categorías Pre-encuesta	Categorías Pos-encuesta
8: ¿Cómo describiría el modelo actual del átomo?	<p>1A: modelo o respuestas ambiguos</p> <p>1. No contesta</p> <p>6. El átomo es la unidad elemental de materia, compuesto por el núcleo (neutrones y protones) y los electrones.</p> <p>7. Como una nube de probabilidad en la que la posición de un electrón se define con la posibilidad de encontrarlo o no a cierta distancia del núcleo.</p> <p>8. Como asociados a criterios de probabilidad, de incertidumbre, y al concepto de cuantificación de la energía y a la relación masa-energía.</p> <p>1B: modelos mecánicos clásicos semiclásicos: Bohr, electrones que giran, etc.</p> <p>2. Compuesto por un núcleo (protones y neutrones) y electrones cuya cantidad y distribución dependen de ciertos números cuánticos. El núcleo formado por neutrones y protones, y electrones en zonas de probabilidad.</p> <p>4. Como un núcleo con protones y neutrones, alrededor del cual se mueven los electrones en distintas órbitas (zonas de distinta energía). El movimiento de los electrones de traslación y giran sobre un eje llamado spin. Cuando se excita un electrón puede pasar a otro nivel de energía.</p> <p>10.El átomo está formado por un núcleo central, formado por protones y neutrones y una zona periférica donde giran los electrones en niveles de energía.</p> <p>1C: modelo más actual vinculado, incluye comentarios sobre incertezas, cuantificaciones espaciales y de energía, números cuánticos.</p>	<p>2A: modelo o respuestas ambiguos</p> <p>8. Idem pre encuesta: Asociado a criterios de probabilidad, de incertidumbre, y al concepto de cuantificación de la energía y a la relación masa-energía.</p> <p>2B: Modelo semiclásico: Bohr, electrones en orbitales, etc.</p> <p>2. Constituido por un núcleo (protones y neutrones) y electrones ubicados en orbitales, donde esta ubicación está determinada por números cuánticos.</p> <p>4. Un núcleo formado por protones y neutrones, y alrededor se mueven los electrones en distintas zonas.</p> <p>10.Lo describiría como un núcleo formado por neutrones y protones rodeado por zonas de distinto nivel energético donde es mayor la probabilidad de encontrar un electrón.</p> <p>2C: similar a la 1C, se agregan comentarios sobre aportes de la ecuación de Schrödinger y cuantificación del momento angular, entre otras cosas.</p> <p>1. Un núcleo compuesto por neutrones y protones, rodeado por electrones, descritos por sus funciones de onda cuyas intensidades, $|\psi|^2$, dan información acerca de las zonas de mayor probabilidad de encontrarlos.</p> <p>3. Acuerdo con lo que escribí anteriormente y agregaría las relaciones de indeterminación para completar la descripción-</p> <p>5. Como un núcleo formado por protones y neutrones y zonas</p>

	<p>3. Lo pienso como una asociación de partículas: neutrones y protones en el núcleo y electrones en zonas probables; con un máximo en cada zona, con un spin y una disposición espacial a distancias grandes comparadas con el núcleo.</p> <p>5. En su forma más elemental, como un núcleo con cargas positivas (protones) y neutrones y zonas espaciales debidamente cuantificadas (orbitales) donde probabilísticamente se desplazan los electrones (cargas negativas)</p> <p>9. El átomo se compone de una zona llamada núcleo con protones positivos y neutrones y demás partículas subatómicas y una zona extranuclear donde se encuentran los electrones, éstos poseen diferentes niveles de energía y es imposible determinar con precisión el lugar y la cantidad de movimiento de cada uno de ellos. La ubicación del electrón se puede encontrar resolviendo la ecuación de onda con la determinación de los cuatro números cuánticos.</p> <p>11. El átomo constituido por un núcleo (en el que se hallan los nucleones) y una corteza en la que en diferentes niveles de energía se hallan los electrones, niveles de energía cuantificados.</p>	<p>espaciales a su alrededor donde probabilísticamente electrón puede encontrarse (de acuerdo a lo que determina la cuantificación de su energía y momento angular)</p> <p>6. El modelo actual del átomo se describe como una región central que corresponde al núcleo y la nube electrónica determinada por los niveles de energía permitidos en los cuales puede estar.</p> <p>7. Modelo en el cual el electrón no está limitado a una órbita sino que puede moverse en tres dimensiones, es decir, se habla de una nube de probabilidad o densidad de electrones que tiene una forma determinada en el espacio.</p> <p>11.El modelo actual el átomo consiste en un núcleo rodeado de una nube de electrones (en realidad de una nube de densidad de probabilidad de encontrar un electrón). No sabemos cómo se mueven los electrones. No existe el concepto de órbita. Los electrones tienen zonas permitidas (niveles de energía).</p>
--	--	--

Diagrama de evolución. Análisis por sujeto y por categoría:



La evolución más notable se produce entre quienes en la pre encuesta no podían expresar una idea definida de modelo atómico (evolución 1A a 2C: 1, 6, 7). Estos sujetos tenían alguna idea de que los modelos atómicos actuales han superado el de Bohr, pero carecían de toda precisión al respecto. Las entrevistas confirmaron que no es que desconozcan los modelos atómicos, pero entienden que otras variables, para ellos desconocidas; definen modelos más actuales. Desechan el modelo de Bohr, pero carecen de elementos para construir un nuevo modelo de mayor potencialidad.

Por otro lado, quienes defienden el modelo de Bohr en la pre encuesta, persisten en esa descripción en la pos encuesta aunque agregan algunas propiedades cuánticas específicas, como la idea de probabilidad, números cuánticos o niveles de energía (evolución 1B a 2B: 2, 4, 10). Esto confirma una vez más la hipótesis que el modelo de Bohr es una representación de la estructura atómica que resulta muy difícil de remover, posiblemente por sus características asimilables a modelos típicamente icónicos, o modelos simples muy trabajados en mecánica clásica tales como el movimiento de los planetas, las rotaciones, el movimiento circular, las leyes de movimiento clásicas, etc.

Finalmente, quienes aportan las respuestas agrupadas en la categoría 2.C, se esfuerzan por incluir entre las propiedades que describen el modelo actual del átomo, elementos de la teoría cuántica tales como el aporte de las funciones de onda a partir del $|\psi|^2$, las relaciones de incerteza y la cuantización de magnitudes, lo cual demuestra la incorporación de los temas tratados en el curso.

Resumen de resultados de la pregunta 8:

- La evolución experimentada en los progresos notables puede resumirse en las premisas:

Modelo atómico semiclásico desestructurado → *aproximación al modelo científico.* [1, 6, 7]
Aproximación al modelo científico → *modelo científico más preciso.* [3, 5, 11]

Pregunta 9: ¿Qué diferencias y similitudes encuentra con respecto a los objetos clásicos?

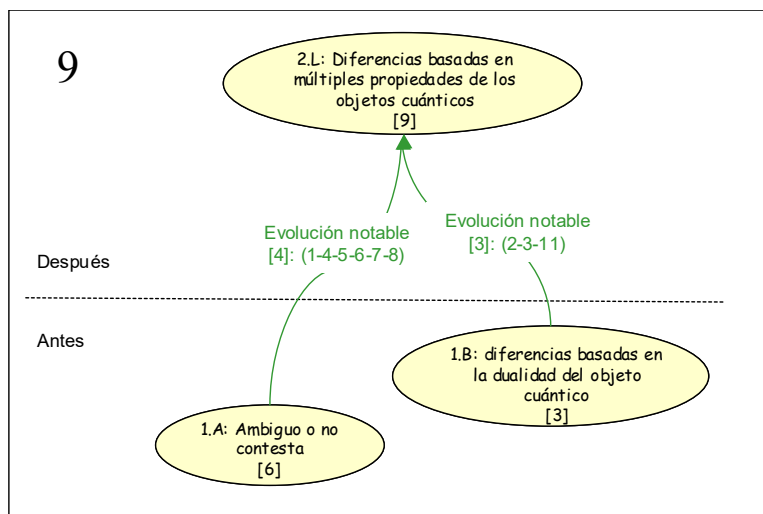
En la pre encuesta se caracterizaron dos categorías: la 1.A: no responden o bien dan respuestas ambiguas sin significados preciso, y 1.B: se basan en el concepto de dualidad como principal diferenciador entre objeto cuántico y clásico. En la categoría 1A, además de cierta incoherencia en las respuestas, en algunos casos se manifiestan referencias ambiguas a aspectos de la dualidad planteada por de Broglie. En la categoría 1B, los sujetos se apoyan fundamentalmente en el concepto de dualidad para caracterizar las principales diferencias entre objeto cuántico y clásico. Consideran que el modelo clásico aporta elementos incompletos para la descripción de los objetos cuánticos, pero admiten a la mecánica clásica como punto de partida para el diseño de un nuevo modelo que toma elementos tanto del modelo de partícula y del modelo ondulatorio, unificándolos en un solo objeto: el objeto cuántico. En sólo uno de los casos, aparece una referencia al objeto cuántico únicamente como fotón y no se cita el comportamiento dual de la materia.

En la pos encuesta se estableció en este caso una única categoría 2.L: las respuestas muestran claras diferencias entre objetos cuánticos y clásicos, aunque también aparecen, en algunos casos, lagunas de conceptos erróneos que se incluyen forzosamente dentro de la estructura conceptual que se describe. Esta categoría es similar a la 1.B, pero se agregan mayores elementos descriptivos. Así se cita como elementos diferenciadores entre los objetos cuánticos y clásicos el comportamiento probabilístico, la indeterminación de magnitudes como posición y momento de las partículas cuánticas, la cuantización de magnitudes y la superposición de estados, según el caso. En algunos casos se vincula lo clásico a lo macroscópico y por ende (aunque no se dice) lo cuántico a lo micro, cuestión que ya había aparecido anteriormente. En los casos de las respuestas 5 se supone la conservación de energía como reservado a la mecánica clásica.

Pregunta	Categorías Pre-encuesta	Categorías Pos-encuesta
<p>9: ¿Qué diferencias y similitudes encuentra con respecto a los objetos clásicos?</p>	<p>1A: respuestas ambiguas o nulas</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. No contesta 4. No contesta 5. No contesta 8. No contesta. 9. No contesta. <p>6. Similitudes: es un modelo que sirve para explicar un fenómeno, como un plano inclinado sobre el que se mueve un cuerpo sin roce, pero permite explicar los fenómenos a nivel micromolecular.</p> <p>7. Objeto cuántico: $f=E/h$ $\lambda=h/p$</p> <p>1B: la dualidad como principal diferencia</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Toman una parte de los objetos clásicos: modelo ondulatorio y el corpuscular para plantear que un objeto cuántico se comporta como ambos a la vez. 3. Que el objeto clásico se puede explicar con el modelo de partícula de la mecánica clásica y el objeto cuántico no le alcanza esto. Pero la similitud para mí, es que para explicar el modelo cuántico también hacemos uso clásico. <p>E: energía; p: cantidad de movimiento (magnitudes mecánicas) f: frecuencia; λ: longitud de onda (magnitudes ondulatorias) Objeto clásico: magnitudes mecánicas: posición, cantidad de movimiento.</p> <ol style="list-style-type: none"> 10. Un objeto cuántico es estudiado desde la dualidad onda-partícula relacionadas entre sí, y el clásico, por separados. 11. En la física clásica, históricamente la naturaleza de la luz se presenta como constituida por partículas (Newton) u ondas (Huygens y otros) y en la física moderna como constituida por fotones: onda-partícula. 	<p>2L: diferencias claras relacionadas con la dualidad, comportamiento probabilístico, localización, entre otras.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Los objetos clásicos no tienen comportamiento dual, los cuánticos, sí. Los objetos clásicos son macroscópicos y tienen comportamiento predecible. Los cuánticos son microscópicos y sus comportamientos se interpretan como probabilidades. 2. Los objetos clásicos son macroscópicos, localizables, se puede conocer su energía y posición a la vez, no poseen un comportamiento dual, sus propiedades no están cuantizadas. 3. Diferencias: En el modelo clásico o es onda o es partícula. En el modelo cuántico puede ocurrir ambas cosas al mismo objeto. 4. Objetos cuánticos: comportamiento dual, no determinista. Objetos clásicos: causas y efectos, determinista. 5. Los objetos cuánticos a veces se comportan como partículas y a veces como ondas. Los estudia la FQ desde un punto de vista probabilístico. Los objetos clásicos son analizados mediante las leyes de conservación del momento lineal, energía, momento angular. 6. Objeto clásico: tiene posición y velocidad determinadas (cantidad de movimiento), energía. Objeto cuántico: tiene asociada una función de onda, caracterizada por su longitud de onda y su frecuencia. Las diferencias están en que para poder explicar por ejemplos los fenómenos térmicos se hacen indispensables térmicos de probabilidad y los niveles de energía determinados por los estados cuánticos asociados. Desde lo macroscópico nos e aprecian variaciones a nivel molecular. 7. La principal diferencia hace referencia a la localización de un objeto cuántico, sólo conocida a través de

		<p>interpretaciones probabilísticas, en contraposición a la localización definida en los objetos clásicos.</p> <p>8. Como similitud creo que se podría mencionar la onda asociada a toda partícula u objeto.</p> <p>Las diferencias consisten, entre otras, en los fenómenos comentados de superposición de estados, interferencia, etc., que muestran los objetos cuánticos y no los clásicos.</p> <p>11. Diferencias: No son localizables, presentan superposición de estados, comportamiento dual, la medición perturba su comportamiento, probabilidades y no certezas.</p> <p>Similitudes: La conservación de la energía, el momento y el momento angular</p>
--	--	--

Diagrama de evolución. Análisis por sujeto y por categoría:



Se evidencia un notable progreso conceptual en todas las respuestas vertidas en la encuesta. Luego del cursado, todos los individuos, salvo el encuestado número 10 que optó por no responder, coinciden en dar una caracterización de las diferencias entre objetos cuánticos y clásicos aceptable dentro de las pretensiones de los objetivos del

curso (categoría 2L). Sin embargo, en algunos casos persisten concepciones erróneas iniciales, como la idea de asociar los objetos clásicos a lo macroscópico y los cuánticos a lo micro, o en el caso 5, la asociación de la conservación de magnitudes únicamente a la mecánica clásica.

La evolución de los individuos incluidos en la categoría 1A a la 2L, sugiere, como en casos anteriores, que las respuestas iniciales no se deben a una ausencia de representaciones sobre el tema, sino a concepciones incompletas o confusas, que los profesores no son capaces de expresar en forma organizada.

Resumen de resultados de la pregunta 8:

- La evolución experimentada en los progresos notables puede resumirse en las premisas:

Ambiguo o no contestan → descripción de un objeto con propiedades cuánticas definidas. [1, 4, 5, 8, 6, 7]

La dualidad como base de la definición de objeto cuántico → descripción de un objeto con propiedades cuánticas definidas [2, 3, 11]

8.3 Análisis Global de resultados.

Para completar el análisis de la evolución de las concepciones de los profesores se detectaron las cuestiones que ofrecieron mayor resistencia al cambio y se definió el perfil de los asistentes que alcanzaron las concepciones más avanzadas y de los que no avanzaron substancialmente.

En esta sección se presenta:

- un análisis por tema en el que se detectan las cuestiones de menor y mayor evolución, se discuten posibles causas y obstáculos conceptuales y se proponen alternativas de mejora.

- algunos comentarios sobre el perfil de los encuestados que experimentan el mayor avance y los encuestados que experimentan avances escasos.

Para realizar el análisis global por tema, se volcaron los datos en una tabla de doble entrada, en la que las columnas corresponden a los individuos y las filas a las cuestiones. Se adoptó una convención de símbolos y colores para una más rápida interpretación de los resultados (figura 8.1).

●	Avance notable
○	Avance moderado
□	Buen nivel de comprensión inicial
◻	Avance moderado a partir de un buen nivel inicial
□	Poco avance

Figura 8.1: convención de símbolos para la interpretación de la evolución de las concepciones de los profesores

Las celdas sombreadas, indican los casos en que se observa algún tipo de avance o evolución positiva. Dentro de este grupo de celdas sombreadas, un círculo en el interior indica la magnitud del avance detectado: un círculo lleno corresponde a un avance notable (●), y un círculo vacío a un avance moderado (○). Los casos en que un individuo presenta un buen nivel de conocimientos iniciales se identifican con un rectángulo vacío en el interior de la casilla (□). Así, la combinación de un rectángulo y un círculo vacío (◻) representa un avance moderado pero a partir de un buen nivel de comprensión inicial.

Se establecieron tres categorías según el nivel comprensión alcanzada y el grado de evolución (figura 8.2):

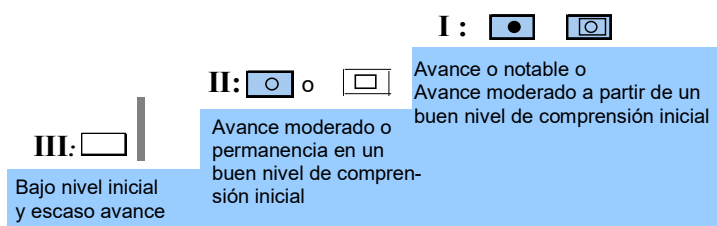


Figura 8.2: categorías de avance según el nivel de conocimiento alcanzado

Nivel I : constituido por quienes alcanzaron el nivel de comprensión más alto: se consideró dentro de esta categoría tanto a quienes experimentaron evoluciones notables, como a quienes mostraron evoluciones moderadas pero a partir de un buen nivel de comprensión inicial. (● y ◻)..

Nivel II : constituido por quienes no alcanzan el nivel más alto de comprensión: esta categoría está constituida por quienes mostraron un buen nivel de comprensión inicial y permanecieron en él, o quienes experimentaron un progreso moderado a partir de un nivel inicial de comprensión insuficiente (◻ y ○).

Nivel III: constituido por los casos en que la evolución es escasa y los individuos mantienen concepciones poco diferenciadas de las originales (celdas en blanco)

La simbología adoptada, permite identificar rápidamente los niveles de comprensión alcanzados en cada caso: por cada individuo (columnas) y en cada cuestión (filas)

Tabla de análisis global

	1	2	3	4	5	6	7	8	10	11	I	II	III
1. Ruptura		●					◻	◻		●	●	○	◻
2a. Dualidad	◻	◻	●	◻	○	○	○	●	◻	●	4	3	6
2b. Cuantificación			●		●		●			●	4		6
2c. Relaciones de incerteza	◻	●	◻		●		◻	◻	●	●	4	4	2
2d. Orbitales						○	●			●	2	1	7
2e. Interpretación Probabilística	●	●	●	○		○		○	○	○	3	5	2
2f. Ecuación de Schroedinger	●	◻	◻	●	●			◻	●	◻	7	1	2
3. Caracterización del fotón	●	●	●	●	●			●	●	●	8		2
4. Interfiere el fotón	◻	●	○	○	◻	◻	●	◻	○	◻	4	6	0
5. Dualidad de una partícula		◻					◻	◻		●	5		5
6. Objeto cuántico	○	◻	○	○	○	●	○	●	◻	●	3	7	
7. Superposición de estados	●	●	●	●	●		●	●	●	●	9		1
8. Modelo actual del átomo	●		◻		◻	●	●			◻	6		4
9. Objeto clásico vs. objeto cuántico	●	◻	◻	●	●	●	●	●		●	9		1
N° veces que se alcanza el Nivel I	8	9	8	5	8	4	8	8	5	12			

Podemos observar que el 70% de los asistentes alcanzaron el Nivel I de comprensión en más del 60% de las cuestiones.

Las cuestiones que ofrecieron mayor resistencia al cambio fueron:

- 1. Ruptura: en este caso, o se alcanza el nivel I (40%), o se permanece en el nivel III (60%)
- 2b. Cuantificación (Idem anterior)
- 2d. Orbitales: fuerte permanencia en el nivel inicial III, 70%.

Los mayores avances

Las cuestiones en que mayor cantidad de individuos alcanzaron el nivel I fueron:

- 2a. Dualidad: todos muestran algún tipo de avance, el 70% alcanza el nivel I.
- 2f. Ecuación de Schrödinger: el 70% alcanza el nivel I.
- 3. Caracterización del fotón: el 80% alcanza el nivel I, sólo un caso presentaba una formación aceptable al inicio, aunque incompleta.
- 7. Superposición de estados: el 90% alcanza el nivel I, ninguno tenía una aceptable formación inicial.
- 9. Diferenciación entre objeto cuántico y objeto clásico: el 90% alcanza el nivel I, sólo en dos casos se observó una aceptable formación inicial, aunque incompleta.

Resulta curioso que el 72% de quienes alcanzaron nivel I, lo hizo a partir una formación inicial insuficiente o nula. Es decir, las cuestiones en las que los individuos más avanzan parecen ser aquellas en las que no hay evidencia de una formación aceptable al inicio. Son los casos de la *caracterización del fotón*, la *superposición de estados* y la *diferenciación entre objeto cuántico y objeto clásico*, en las que más del 80% alcanza el nivel I.

- La evolución experimentada en estos temas puede resumirse en las premisas:

Caracterización del fotón:



Superposición de estados:



Diferenciación objeto clásico y objeto cuántico:



También merece un comentario especial el tema *relaciones de incerteza* en que todos los encuestados que no evidenciaron una formación inicial aceptable alcanzan el nivel I, mientras que el resto simplemente muestra mayor especificidad en su idea primitiva. Como dijimos en una sección anterior, este hecho no debe entenderse esto como una afirmación de que el profesor que más aprende es el que menos sabe, por el contrario, estamos convencidos de que la construcción del conocimiento sólo es posible sobre la base de sólidos contenidos previos. Lo que posiblemente deba discutirse, es cuáles son esos conocimientos previos necesarios para la construcción conceptual de la mecánica cuántica en el nivel del profesorado o universitario básicos. Los profesores que habían construido una imagen de algunos conceptos de la mecánica cuántica, posiblemente hayan forzado la incorporación de los nuevos conceptos en sus esquemas previos. Esto les permite generar explicaciones parcialmente correctas que consolidan antiguos esquemas más vinculados a los conceptos clásicos aumentando su rigidez de su estructura conceptual inicial y la resistencia a una ruptura epistemológica.

Por el contrario, quienes no poseían una formación sólida, dudaban de sus propias concepciones y estaban dispuestos a ponerlas a prueba y desecharlas si fuera necesario. En estos casos, la intervención didáctica realizada, permitió la construcción de nuevas representaciones de objetos cuánticos que superan visiones de partículas u ondas en forma dicotómica y que intentan sintetizar ambos enfoques en un ente único. A la vez, el modelo de superposición de estados discutido, y los ejemplos presentados de resolución de la ecuación de Schrödinger colaboraron en dar sentido a las soluciones encontradas, y a superar visiones exageradas de las dificultades de la mecánica cuántica, venciendo los reduccionismos citados en la sección 6.3:

- *reduccionismo objeto cuántico a ondas “o” partículas*

- *reduccionismo descripción probabilística a descripciones exactas*
- *reduccionismo formalismo a resolución mecánica o ejercitación*

Las mayores resistencias

Respecto de las cuestiones que ofrecieron mayor resistencia al cambio, *ruptura entre la Física Clásica y la Cúantica, orbitales y cuantificación*, no deja de ser sorprendente que algunas de estas cuestiones, aparentemente más sencillas, introduzcan tales dificultades de comprensión.

En el caso de la ruptura entre la física clásica y la cuántica, sólo dos profesores tenían alguna idea inicial del salto epistemológico que supone el cambio del pensamiento cuántico, aunque sus manifestaciones en las encuestas fueron más bien anecdóticas. A lo largo del curso, el 40% alcanza el nivel I logrando superar el reduccionismo del surgimiento de la física cuántica a visiones históricas lineales de la ciencia. Sin embargo, el 60% permanece en sus convicciones iniciales. Las dificultades encontradas, ponen de manifiesto la visión que profesores y estudiantes tienen de la ciencia, en particular, una visión anecdótica, lineal y acumulativa del desarrollo de la misma, en la que no están presentes rupturas ni crisis. Esto es consecuencia de una enseñanza dogmática de la ciencia como un conjunto de verdades donde están ausentes su proceso de construcción, las controversias históricas por las que transitó y los cambios en las relaciones CTS a lo largo de la historia (Solbes y Traver, 1996, 2003 y 2011), y donde se ignoran aspectos cruciales como la formulación de problemas como punto de partida de una investigación científica, o la investigación de hipótesis y la creación de conceptos para resolver los problemas. La superación de este obstáculo, implica una reformulación de la enseñanza de la ciencia que incluya los aspectos antes mencionados y que debe implementarse no sólo a nivel de profesorado, sino desde las primeras presentaciones de la ciencia a edad temprana del alumnado.

En cuanto a la pregunta 2b ¿qué entiende por cuantificación, se notó una permanencia en la idea de cuantificación limitada a la energía y a algunos números cuánticos. Podría decirse que en general la evolución se limita al pasaje de ideas:



Como el en caso anterior, no hay evoluciones a niveles intermedios, o se alcanza el nivel I o se permanece en el nivel de partida. Los porcentajes de alcance del nivel I también son idénticos, al menos un 40% logra superar la reducción de la cuantización únicamente a la energía extendiendo el concepto a otras magnitudes, y un 60% mantiene la concepción energética inicial. La noción de cuantificación planteada en la enseñanza tradicional a través del efecto fotoeléctrico y la radiación de cuerpo negro, ensombrece la cuantificación de otras magnitudes limitando la misma a la energía. La definición del fotón cuestiona la visión continua de la energía y presenta una idea de *fotón partícula* que resulta plausible y eficaz para interpretar ciertos fenómenos. Por el contrario, la cuantificación de otras magnitudes no es tan evidente y quedan enmascaradas dentro del formalismo cuántico. Durante el curso, se discutió la aparición de los números cuánticos n , l , m , sin embargo, las cuantificaciones que representan no alcanzaron a ser suficientemente significativas para la mayoría.

En el caso de la pregunta 2d ¿Qué entiende por orbitales?, un número importante de sujetos permanecen en la categoría original. La asociación de la idea de orbital con la posición de los electrones, o bien con funciones que dan información sobre dicha posición es muy fuerte y difícil de erradicar. Esto ha sido estudiado ampliamente por muchos autores. Parece entenderse que los orbitales son “órbitas” o simplemente “zonas” o regiones del espacio donde puede estar o no el electrón, ideas que aparecen en textos de secundaria, pero también en textos universitarios escritos por prestigiosos autores de estos niveles que dicen que los orbitales se ocupan o llenan y que los electrones se colocan en ellos, sin aclarar que estas palabras no deben tomarse literalmente (Navarro y Solbes, 1989).

Notamos, además, que en esta afirmación subyace una idea de estado excitado como algo transitorio en el cual el electrón no permanece por mucho tiempo y vuelve rápidamente a su estado fundamental de la misma manera que una persona salta, alcanza una altura máxima y vuelve inmediatamente al nivel del piso, sólo que en el caso del electrón, se acepta que éste pueda permanecer más que un instante en el estado excitado. En otros casos, aparece también la idea del *electrón nube* tal como la describe Petri (1998) y la asociación de las trayectorias a niveles de energía (Fischler, 1992).

La discusión de la *ruptura entre la Física Clásica y la Cuántica* a través de las experiencias conflictivas del inicio de la física cuántica, la idea de *orbitales* y la *cuantificación* de la energía, son tres cuestiones presentes en todos los libros de texto de física cuántica básica que tradicionalmente utilizan los profesores en un curso de *física moderna*. En estos casos, entendemos que un tratamiento excesivamente tradicional, que reduce los conceptos cuánticos a analogías clásicas sin el necesario acompañamiento de una discusión epistemológica en profundidad, ha colaborado en generar un anclaje fuerte de representaciones simplistas de sentido común, que obstaculizan la construcción de conceptos cuánticos diferenciados.

8.4 Avances y permanencias en dos estudios de caso.

Cómo se dijo anteriormente, el 70% de los asistentes alcanzaron el Nivel I de comprensión en más del 60% de las cuestiones. Quienes mostraron los mayores avances fueron los encuestados 2 y 11. Estos encuestados 2 y 11 (una profesora de Matemática, Física y Astronomía con 21 años de antigüedad en la docencia y una Ingeniera Electricista con 23 años de antigüedad en la docencia, sin práctica profesional), habían hecho un curso de Mecánica Cuántica tradicional unos años antes (curso circuito E dictado por Físicos en base a Alonso Finn, duración 9 meses). Si bien podría decirse que tenían una relativa ventaja sobre la mayoría de sus compañeros que no habían vuelto a discutir temas de Física cuántica luego de su tratamiento en el profesorado, o durante la carrera universitaria en el caso de los ingenieros electricistas y químicos, en general sus representacio-

nes al comienzo del curso no reflejaban un nivel conceptual mejor que las del resto. Su formación inicial colaboró en el anclaje de nuevos conceptos, aportando fundamentalmente una familiaridad con los términos del lenguaje y las experiencias que iban presentándose durante el curso y facilitó una evolución más notable o mejor plasmada en las respuestas finales. Por otro lado, las entrevistas a estos profesores pusieron en evidencia su especial interés en los temas desarrollados, y el registro de clases, mostró una activa participación en las discusiones suscitadas.

Las *columns* donde abundan casillas en blanco corresponden a encuestados que no han avanzado sustancialmente. Estos son los casos de los encuestados 4, 6 y 10, que presentan más del 50% de casillas en blanco.

En las entrevistas personales se detectó una formación inicial aceptable en los encuestados 4 y 6 como así también continuidad en su interés de actualización.

El encuestado (4) es una profesora de Matemática y Física (nivel medio) con 14 años de antigüedad. En repetidas oportunidades ha mostrado interés en la mejora del aprendizaje de sus alumnos a través de su participación en diversas alternativas didácticas algunas de las cuales dieron origen a trabajos presentados en reuniones de educación en ciencias.

El encuestado (6) es ingeniero electricista y se desempeña en la docencia en nivel medio y universitario desde hace 26 años (no ejerce profesionalmente). El encuestado 6, no tiene términos medios, o experimenta avances notables o no experimenta avance. Una observación más en detalle de sus respuestas, muestra que los estancamientos se dan en temas tradicionales asociados a la física precuántica (ruptura, orbitales, relaciones de incerteza, etc.), en los que además evidencia un relativo buen nivel de comprensión inicial, mientras que muestra buenos progresos en temas menos discutidos en la enseñanza tradicional. Esto acuerda con lo discutido en relación a las cuestiones en que se evidenciaron mayor cantidad de avances notables y alcances del nivel I.

En ambos casos, podría decirse que durante su formación y trayecto docente, estos encuestados construyeron teorías más elaboradas que sus compañeros, desde las cuales interpretan los problemas que se les presentan. Una sólida formación en Física Clásica y el reconocimiento de su potencialidad, se convierten en un obstáculo al momento de encarar nuevas situaciones que no encajan dentro la estructura tradicional. Pudimos ver que si bien inicialmente se aceptan las premisas de la Física Cuántica (en el curso se mostraban como alumnos avanzados), luego de un tiempo, las concepciones clásicas tradicionales se imponen sobre las nuevas impidiendo afianzar nuevos conceptos. En este sentido, Vosniadou (1994) sostiene que los alumnos poseen teorías marco caracterizadas por principios epistemológicos que permiten restringir la información procesada de manera tal que todo lo que no puede interpretarse desde esos principios, no se procesa.

En el caso del encuestado 10, es una profesora joven con sólo 4 años de antigüedad transitando sus primeros años de docencia. La necesidad de acumular horas de trabajo la ha llevado a tener cargos en diferentes colegios y su rutina es dar su clase de matemática o física clásica (mecánica o cinemática) según el caso, trasladándose permanente entre distintas instituciones, con poco tiempo de profundizar en su formación. Su especialización en esta etapa de su carrera son los trabajos prácticos de laboratorio y, a pesar de su buena predisposición, la falta de tiempo y formación colabora en una implementación didáctica más orientada hacia el *hacer* que hacia a la construcción del conocimiento.

A continuación presentamos en detalle los casos de los asistentes s2 y 6 a quienes llamaremos Sandra y Daniel. Estos nombres son ficticios de manera de preservar la identidad de los mismos.

El caso de Sandra

Sandra es ingeniera electricista pero nunca ejerció profesionalmente, su labor siempre estuvo vinculada a la docencia y ha realizado cursos de complementación pedagógica. Desde hace veinticinco años se desempeña en diferentes colegios secundarios siendo el IPS Gran San Martín, la institución que organiza el curso, donde tiene la mayor cantidad

de horas. Sandra, además, es muy cercana a la encuestada 11, son compañeras desde hace muchos años en el IPS y han participado juntas en algunos cursos de formación. A su vez, Sandra ha mostrado interés en participar en actividades didácticas innovadoras en el IPS y su compañera lo ha hecho en otro colegio de buen nivel educativo en el ámbito privado, donde se desempeña.

La formación de Sandra en FQ se remite al tercer año de su carrera de ingeniería, cuando en la asignatura Física V desarrolló temas vinculados al efecto fotoeléctrico, la radiación de cuerpo negro, el modelo de Bohr, átomos hidrogenoides, números cuánticos y modelo de capas. La bibliografía utilizada fueron apuntes de la cátedra, Física TII de Alonso Finn y Conceptos de Física Moderna de Beiser. Nunca volvió a estudiar sobre el tema hasta hace 12 años en que participó en un curso anual de Física Moderna (Circuito E), en este caso, los profesores, físicos de la Licenciatura en Física, se ajustaban a la secuencia de temas de Alonso Finn. Cada capítulo lo desarrollaba un profesor diferente y recuerda con admiración a algunos de ellos que relataban anécdotas vinculadas a la historia del desarrollo de la física moderna y se esforzaban en bajar los conocimientos al nivel de los profesores, en contraposición con otros cuyas clases eran las típicas exposiciones magistrales. En cuanto a la resolución de problemas, se manejaban con una práctica impresa de la que se ejemplificaban algunos ejercicios y otros debían traer resueltos como parte de la evaluación. No había discusiones didácticas ni epistemológicas porque, según expresó

“... no era ése el objetivo del curso...”

A pesar del interés de Sandra en mejorar su formación, las alternativas por las que había optado habían sido las tradicionales, recordaba los temas tratados en forma memorística y sus comentarios ponían en evidencia cierto temor por las posibles dificultades que implica profundizar en la FQ.

“... fueron 8 horas diarias durante 5 días corridos, y en esos 5 días uno tiene que ver un libro entero!...Entonces imagínate que uno..., todo lo que sea formalismos, uno no se acuerda; tengo que ponerme a estudiar”

“... empecé con radiación de cuerpo negro, me fui al Blackwood... empecé leyendo la parte dura y después, cuando vi que no entendía me fui a algo un poco más...charlado...Me está resultando realmente pesado...”

Respecto a las cuestiones que motivaron el inicio de la FQ y la ruptura con la FC, comentó:

“... (en el curso que hice) empezamos con cuál fue la chispa que encendió el cambio, digamos de la física clásica a la cuántica. Cuál fue el fenómeno en sí, el surgimiento de los modelos de los átomos, Bohr, Rutherford,... no éste estaría antes?...[]... no podía explicarse la estabilidad de los átomos, por eso la FQ planteo otros modelos...”

Las expresiones vertidas en el cuestionario fueron aún menos comprometidas:

“... La física moderna supone una ruptura con la clásica porque se trata de modelos diferentes, donde ciertas leyes dejan de tener validez...”

Las afirmaciones de Sandra muestran una visión simplista de la evolución de la ciencia en la que los primeros conflictos que marcaron una diferenciación entre la FC y la FQ se reducen a relatos históricos lineales casi sin discusión de los modelos involucrados. Este reduccionismo ya fue detectado en la caracterización específica y los asistentes no son ajenos. Asimismo. Las repuestas fueron ambiguas y si bien nombró el efecto fotoeléctrico y el problema del cuerpo negro, no pudo describir ninguno de estos fenómenos ni justificar por qué suponen una ruptura con la FC, acepta que la Física Clásica tiene limitaciones pero no especifica cuáles son esas limitaciones (categoría 1 A, pregunta 1)

A lo largo del cursado, Sandra mostró especial interés en los temas que se iban desarrollando, su participación fue activa. Durante el desarrollo de las actividades 2 y 3 se sintió identificada con las afirmaciones publicadas por diferentes autores. La transcripción de la opinión de físicos de relevancia que reconocían que comprender la mecánica cuántica no es trivial (actividad 5) fue de gran impacto para ella. Las notas del observador describen que en esa oportunidad manifestó que le reconfortaba saber que sus dificultades no eran tan personales como creía. Sandra fue quien se ofreció a realizar la lectura de la actividad 5.

Más adelante, en oportunidad de una discusión suscitada luego de la exposición del tema 7: “los experimentos que históricamente llevaron a la ruptura entre la FC y la MQ” (tema de evaluación), las intervenciones de Sandra aportaron elementos para completar los conceptos vertidos. Aclaró que a su entender, los experimentos históricos como el efecto fotoeléctrico, el problema del cuerpo negro y el átomo de Bohr en las presentaciones tradicionales de los libros, no planteaban todos los aspectos que diferencian la FQ de la FC, particularmente el carácter determinista de la FC en contraposición del carácter probabilístico de la FQ y el comportamiento dual de la materia. A su vez, en el cuestionario final Sandra escribió:

“... La física moderna supone una ruptura con la clásica porque en FC no puede explicar fenómenos microscópicos y esto ha sido la causa por la cual los científicos han tenido que buscar nuevas teorías. La FC es determinista, mientras que en la FQ el azar y la incertidumbre juegan un papel muy importante...”

Sus afirmaciones, la posicionan en la categoría 2.L en la que la ruptura se explica a partir de conceptos o experiencias propios de la FQ como incertidumbre vs. determinismo clásico, dualidad del objeto, efecto túnel, difracción de partículas, etc.

Partiendo de una concepción inicial ambigua, luego del curso Sandra cita elementos distintivos claros como el determinismo clásico y la incertidumbre cuántica, mostrando un avance notable en este tema. Sin embargo, persiste la idea de asociar la FC a lo macroscópico y la MQ a lo microscópico, como frecuentemente se hace en la presentación de textos tradicionales.

Sandra era quien mejor recordaba características del modelo ondulatorio, en el nivel medio desarrolla movimiento oscilatorio y ondas en cuerdas, ondas estacionarias, sonido e incluye en sus clases experiencias demostrativas con la cubeta de ondas diapasones para mostrar fenómenos de interferencia, difracción y batido. La formación de Sandra limita la superposición de ondas a la descripción de las ondas estacionarias y la interferencia. Si bien “escuchaban” en las clases de laboratorio el acople de diapasones, esto sólo era un tema disparador, no recordaba una descripción formal del tema y tampoco podía dar una explicación al menos cualitativa del “ulular” del sonido. Atribuye a las partículas la masa, la cantidad de movimiento, el movimiento rectilíneo, la localización,

las leyes de movimiento y las leyes de Newton, mientras que las ondas “no tienen” cantidad de movimiento, difractan, “se esparcen por todo el espacio”, siguen la ecuación de las ondas. Su conocimiento inicial de las ondas, si bien acotado, le permitió diferenciar algunas las características de las ondas y las de las partículas, con énfasis en la masa. Sin embargo, son evidente las limitaciones presentes en su formación:

“... las partículas tienen masa y cantidad de movimiento y viajan,..., la masa se traslada... []... las ondas pueden tener masa, es decir, se puede mover una masa (como en una cuerda) pero no se traslada, se propaga la energía... [] una onda no tiene cantidad de movimiento...”

“... las partículas chocan, las ondas interfieren...”

“... no puede determinarse dónde está la onda, porque viaja, una partícula sí...”

La idea de que materia y ondas son incompatibles, la falta de conocimiento sobre las características de pulsos y ondas estacionarias (casos de “localización”), y del momento lineal de ondas, fue un obstáculo inicial para extender la dualidad como una característica común a un nuevo objeto cuántico. Podía pensarse en “paquetes de energía”, pero no en una partícula de posición incierta. Así, el efecto fotoeléctrico era conocido y reconocía que a partir del mismo podía definirse el fotón como una partícula de energía. Sin embargo, el término “partícula” era utilizado casi por tradición, y no se le atribuía realmente las propiedades de las mismas, tal como se puso en evidencia en oportunidad de discutir el efecto Compton. En este caso, las notas del observador ponen en evidencia que, si bien recordaba que el efecto Compton estaba vinculado a una colisión fotón-electrón, se sorprendió al ver cómo en la descripción formal se le atribuye cantidad de movimiento a un ente que no tiene masa.

“... ¿Los fotones? Eh... Según... cómo los definió Einstein...: pequeños paquetes de energía, este... sin masa (o por lo menos con masa en reposo) ...y que conllevan una cierta cantidad cuantizada de energía y que depende de esa energía tenés toda la variación del espectro de la radiación...” (entrevista)

“... Un fotón es una partícula indivisible, sin masa, portadora de una cantidad cuantificada de energía...” (cuestionario)

“ (¿el fotón se comporta como onda o como partícula?)... si trabajamos con difracciones estamos pensando en ondas...es un fenómeno bien ondulatorio, la difracción, ... el fotón se comporta así en el efecto fotoeléctrico...”(entrevista)

“...un fotón no puede experimentar interferencias constructivas y destructivas) Su onda asociada, sí...”

Estas opiniones muestran, además, cómo la dualidad y cuantificación están vinculada preferentemente a la radiación. No una construcción inicial de un objeto dual que pueda ser asimilado a partículas y ondas a la vez. Asimismo, su respuesta en el cuestionario es ambigua y general, aludiendo más a una descripción literal del término que a una significación en profundidad:

“...un objeto cuántico es aquél que se comporta como onda o como partícula...”(cuestionario)

“...La cuantificación se refiere a la mínima parte de algo que no puede seguir subdividiéndose; por ej. la carga del electrón. (cuestionario)...”

“... los objetos cuánticos toman una parte de los objetos clásicos: modelo ondulatorio y el corpuscular para plantear que un objeto cuántico se comporta como ambos a la vez...”

Los comentarios de Sandra, también mostraron sorpresa al observar que las imágenes de los diagramas de difracción de neutrones proporcionados por el profesor del curso, eran similares a los que ella mostraba a sus alumnos haciendo incidir “luz” de un láser en un objeto circular; a pesar de haber expresado verbalmente que los electrones se comportaban como ondas no era consciente de las consecuencias de esta afirmación. En otras oportunidades, las notas de clase también muestran ausencia de características ondulatorias en la materia, una rápida asociación del comportamiento dual al fotón y total carencia de representaciones de entes duales (reduccionismo objeto cuántico → ondas “o” partículas). Resumiendo podemos decir que Sandra, al inicio, no muestra una representación óptima de los objetos cuánticos y no puede extender las características de las ondas a las partículas ni las características de las partículas a la radiación. Si bien la dualidad parece ser la principal diferencia entre los objetos cuánticos y clásicos (categoría 1B, pregunta 9) y verbaliza cuestiones relacionadas, cuando se le pide que ponga su pensamiento por escrito en el cuestionario, acude a definiciones de diccionario, descon-

textualizadas, y que explican términos propios de la disciplina específica en forma literal. (categorías 1 A, pregunta 2b; categoría 1C, pregunta 5 y categoría 1B pregunta 6). La dualidad es más fácilmente entendida referida a la radiación y el fotón es paquete de energía, sin masa, fuertemente relacionado con la cuantificación de la energía y que no puede interferir pero su onda asociada sí puede hacerlo, sin establecer qué representa esa “onda asociada” (categoría 1 A, pregunta 3 y categoría 1 A pregunta 4).

A medida que fue desarrollándose el curso, fueron detectándose indicios de nociones más precisas. Un avance parcial en el pensamiento de Sandra respecto a la idea de dualidad, antes de terminar el curso se traduce en la afirmación:

“... Por comportamiento dual de una partícula entiendo, por ejemplo, el electrón, que puede tomarse como partícula y también comportarse, “no uno, sino muchos”, como una onda, ej. Difracción. Un conjunto de electrones pasando por una ranura “se difractan”.

Sin embargo, en este caso, se atribuye el comportamiento ondulatorio a un colectivo de partículas, como si las cuestiones probabilísticas no pudiera atribuirse al estado de una única partícula. Esta situación muestra la presencia de modelos sintéticos en los que se incorporan elementos de la instrucción y se aproxima a un modelo más cercano al científico (Vosniadou, 2008, Clement 2010).

Al finalizar el curso, los docentes debían presentar una exposición de uno de los temas que se muestran al final del capítulo 7 como un requisito de aprobación y fueron registradas en video, algunos profesores presentaron además un escrito. Los temas fueron preparados en forma individual o de a pares y expuestos a resto de los participantes, a quienes se le pidió hicieran comentarios, sugirieran aportes para completar los temas, discutieran la factibilidad de implementación en el aula.

Sandra eligió el tema 3: **dualidad onda partícula** para su evaluación. Durante la exposición mostró los avances en la definición de algunos conceptos. Insistió, por ejemplo, en la necesidad de dejar de hablar de ondas y partículas y de plantear la existencia de un nuevo objeto cuántico con propiedades de ambos modelos. La observación de la filmación muestra su preocupación por transmitir a sus compañeros lo que a ella le había impresionado más:

“... entendí que no tiene sentido preguntarme si esto es una onda o una partícula, es lo que es, no puedo definirlo porque es algo totalmente nuevo... [...]... se comporta como onda y a la vez como partícula,... pero no deja de ser ni lo uno ni lo otro, es un objeto cuántico...”

A la vez, citó frases de Bunge llamando *cuantones* a los objetos cuánticos. Entre algunas afirmaciones de interés podemos citar:

Respecto al fotón afirmó:

“Un fotón se caracteriza es un cuanto de energía, y como tal, sin masa, que viaja a la velocidad de la luz y cuyo comportamiento es de partícula y de onda... [...]... Un fotón puede experimentar interferencias constructivas y destructivas, debido a su comportamiento dual”. (categoría 2L1 pregunta 3 y 2L pregunta 4)

Respecto de las partículas:

“... Comportamiento dual de una partícula significa que según qué fenómeno estemos estudiando, se comporta como partícula y onda. Por ej., el electrón en el experimento de la doble rendija se comporta como onda siempre y cuando no sea “observado”. Si fuera así, colapsa y su comportamiento es de partícula”.

y agregó:

“Un objeto cuántico es un objeto microscópico con comportamiento dual y propiedades cuantizadas, en FQ se desdibuja los límites entre ondas y partículas, como en relatividad pasa con la masa y la energía...”

“... el modelo actual el átomo consiste en un núcleo (protones y neutrones) y electrones ubicados en orbitales, donde esta ubicación está determinada por números cuánticos...”

Por otro lado, la cuantificación si bien sigue estando fuertemente relacionada a la energía se extiende como una cualidad propia de la naturaleza de los objetos cuánticos (categoría 2K, pregunta 2b).

“... las propiedades de los objetos cuánticos están cuantizadas, sobre todo la energía, pero no es lo único, la cantidad de movimiento, y otras. ... esto es porque la ecuación de Schrödinger permite calcular probabilidades. Y la ecuación de Schrödinger tiene soluciones cuantizadas... []...” (entrevista)

“... La cuantificación se refiere a la mínima parte de “algo” (el cuanto). La cuantificación de ese “algo” significa que se da en la naturaleza en valores discretos, múltiplos de una cantidad mínima, por ej. La energía de un fotón, la carga del electrón, etc...” (cuestionario)

Estas afirmaciones muestran una noción de objeto cuántico más cercano al consensuado por la comunidad científica que las expresiones vertidas al inicio, al que se le atribuyen propiedades ondulatorias, indeterminación en la posición, y fundamentalmente no se circunscribe la radiación (las categorías 2M pregunta 2 a, categoría 2L pregunta 5, 2B pregunta 8 expresan diferentes aspectos de estos conceptos). Sin embargo, si bien sus expresiones verbales son más cercanas al modelo buscado, en el cuestionario persisten en nociones ambiguas que vinculan los objetos cuánticos a lo microscópico:

“...Un objeto cuántico es un objeto microscópico con comportamiento dual y propiedades cuantizadas...”

Como dijimos antes, este tipo de respuesta podría estar siendo generada por el compromiso que supone dejar por escrito una definición de un concepto nuevo que está siendo elaborado y del que no se tiene aún una sólida representación alternativa a la primitiva.

Sandra, había preferido no contestar en el cuestionario “qué entiende por interpretación probabilística en MQ” y “ qué son las relaciones de incerteza” (categorías 1 A preguntas 2c y 2e) , pero en una de las entrevistas afirmaba:

“... el problema de la medición..., tiene que ver con resultados, con aportes de resultados estadísticos... aún no se conocen bien todas las variables que hay en...”(entrevista)

El problema de las mediciones y las interpretaciones probabilísticas se vinculan a las relaciones de indeterminación. Como se dijo, las mismas son vistas como unas ecuaciones que expresan la imposibilidad de medir con exactitud en MQ la cantidad de movimiento o la posición. Para Sandra y otros profesores, al comienzo del curso el comportamiento probabilístico y la falta de localización en MQ no representan el comportamiento de los objetos cuánticos, sino que dan cuenta del un problema que se presenta debido a la interacción con el observador en el proceso de medición y que se magnifica a nivel microscópico.

“Tiene que ver con el principio de incertidumbre ¿ no?... , pero habla de la matemática, y en el principio de incertidumbre el problema es que cuando querés medir a ese nivel, de alguna manera vos estás influyendo sobre el movimiento de esa partícula; pero no creo que sea por el

formalismo matemático sino por la influencia del observador que de alguna manera modifica, y eso no lo podés evaluar... []... tiene que ver con ...resultados estadísticos de la teoría cuántica” (entrevista)

“...posiblemente con el avance de la tecnología se desarrolle alguna forma de medir a nivel atómico,..., por ahora nos conformamos con sacar resultados estadísticos...” (nota del observador)

“... es imposible no influir en la medición, para ver tenés que iluminar, es una forma de decir, y eso a nivel cuántico afecta...” (nota del observador)

Esta afirmación nos recuerda el tercer reduccionismo descrito en el capítulo 6: reduccionismo descripción probabilística → descripciones exactas

La interpretación probabilística, las relaciones de incerteza y la superposición de estados, son tres temas íntimamente relacionados. Así, la superposición de estados es una herramienta matemática que representa todas las situaciones en que puede encontrarse una partícula cuántica y que se introduce (junto con los estudios de probabilidad) para salvar la falta de conocimiento (categoría 1B pregunta 7):

“...superposición de estados en la MQ es una representación matemática ya que el objeto cuántico debe estar en algún estado determinado...” (entrevista)

“... El objeto está en algún estado que se necesita la representación matemática para describirlo...” (cuestionario)

La ecuación de Schrödinger no se relaciona con estos conceptos y es vista como una herramienta matemática que da la posición del electrón de forma similar a una ley de movimiento en mecánica clásica. Su aplicación se restringe a los electrones y sus soluciones no se vinculan con la probabilidad (categoría 1D, pregunta 2f):

“... es lo que en clásica son las leyes de Newton, los electrones se comportan según la ecuación de onda, la ecuación de Schrödinger...”(entrevista)

“...La ecuación de Schrödinger es una ecuación cuya solución permite conocer cómo es la estructura de la materia (átomos y moléculas)...” (cuestionario)

“... la ecuación de Schrödinger permite conocer la posición de los electrones...” (notas del observador)

Se observa en estos casos, cómo la ecuación de Schrödinger, sus soluciones, los posibles estados en los que puede estar una partícula, carecen de significación más allá de ser un instrumento matemático para la resolución de problemas típicos, fundamentalmente asociados a la determinación de la posición del electrón alrededor del núcleo, tal como fue descrito en el capítulo 6 (reduccionismo formalismo → resolución mecánica o ejercitación). Asimismo, los orbitales son regiones del espacio y no guardan relación con las soluciones de la ecuación de ondas.

“... Los orbitales son una zona de mayor probabilidad de encontrar los electrones...”

La resolución de la ecuación de Schrödinger en casos sencillos permitió introducir el concepto de orbital y discutir alternativas a la idea de órbita o lugar del espacio donde es más probable encontrar un electrón. No obstante, si bien el orbital, al menos en el caso de Sandra, pudo vincularse a la función de onda, no logró establecerse cómo este orbital informa sobre la probabilidad de localización y mucho menos, vincularse a otras magnitudes. Las limitaciones en el manejo del formalismo obstaculizan avances en este tema, provocando la permanencia de representaciones de los orbitales como zonas del espacio. Al finalizar el curso, Sandra afirmaba:

“Los orbitales son zonas de mayor probabilidad de encontrar el electrón dentro de un átomo. Estas zonas de probabilidad surgen de resolver la ecuación de Schrödinger”.(cuestionario)

En la evaluación final del curso, el tema 5: “orbitales y funciones de onda” no fue tomado por ninguno de los profesores, lo cual es una muestra de la dificultad que ofrecieron estos conceptos, que permaneció a pesar de su tratamiento.

Como dijimos antes, las relaciones de indeterminación, la causalidad probabilística y la superposición de estados son conceptos muy relacionados y que describen la naturaleza misma de los objetos cuánticos. Al finalizar el curso, Sandra asocia la probabilidad al carácter no determinista de la mecánica cuántica, a la ecuación de Schrödinger o a sus soluciones y al $|\psi|^2$ (categoría 2L, pregunta 2e) y en cuanto a las relaciones de indeterminación, las respuestas evidencian mayor conocimiento, se refieren a la imposibilidad de conocer simultáneamente la posición y la cantidad de movimiento, explicitan su expresión formal $\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar$) y reconocen las relaciones de incerteza para la energía, mostrando

un gran avance en la superación de los reduccionismos citados (categoría 2C2 pregunta 2c).

“... Las relaciones de indeterminación se refieren al hecho de que a nivel microscópico existen variables que no pueden conocerse simultáneamente, o a la vez, como ocurre con la posición y la energía de un electrón. Esto da lugar al principio de incerteza, propio de la MQ”. (cuestionario)

“... La ecuación de Schrödinger, sus soluciones (de la función de onda), el cuadrado, $|\psi|^2$, dan la probabilidad de encontrar una partícula dentro de la estructura de la materia y su comportamiento microscópico” (entrevista)

“... La superposición de estados en la MQ es una situación que describe el verdadero estado de los objetos cuánticos “(cuestionario)

“... La superposición de estados es como la superposición de dos ondas, al medir nos quedamos con una de las componentes, así funciona la MQ” (notas de clase)

“... La ecuación de Schrödinger como tal, no es tan importante, sino la intensidad de las soluciones (de la función de onda) $|\psi|^2$, que da la probabilidad máxima de encontrar una partícula dentro de la estructura de la materia y su comportamiento microscópico...” (cuestionario)

“... La ecuación de Schrödinger como tal, no es tan importante, sino la intensidad de las soluciones (de la función de onda) $|\psi|^2$, que da la probabilidad máxima de encontrar una partícula dentro de la estructura de la materia y su comportamiento microscópico.(DE INTERPRETACION PROBABILISTICA)...”

“... La ecuación de Schrödinger es una ecuación diferencial cuyas soluciones permiten describir y analizar la estructura de la materia y los fenómenos microscópicos...”

“... La superposición de estados en la MQ es una situación que describe el verdadero estado de los objetos cuánticos ...”

“... Los orbitales son zonas de mayor probabilidad de encontrar el electrón dentro de un átomo. Estas zonas de probabilidad surgen de resolver la ecuación de Schrödinger...”

Se resalta el carácter matemático de la ecuación de ondas y los aportes de sus soluciones a la descripción del comportamiento cuántico (categoría 2L2 pregunta 2f). Se asigna algún significado al cuadrado del módulo de ψ , relacionándolo con la probabilidad, pero en la mayoría de los casos esa probabilidad se limita al conocimiento de la posición de los electrones alrededor de los núcleos atómicos. El formalismo adquiere poder predictivo y las relaciones de incerteza se asocian a variables que no es posible conocer simultáneamente.

En cuanto a los orbitales, si bien se siguen identificando con zonas del espacio donde la probabilidad de hallar un electrón es máxima, se entiende que estos orbitales surgen de la ecuación de Schrödinger.(categoría 2 A pregunta 2d)

“... Los orbitales son zonas de mayor probabilidad de encontrar el electrón dentro de un átomo. Estas zonas de probabilidad surgen de resolver la ecuación de Schrödinger...”

Resumiendo, la evolución de Sandra los comentarios de Sandra recogidos a través de los diferentes instrumentos, muestran concepciones ambiguas y memorísticas al comienzo del curso, que fueron madurando hasta logran avances importantes al finalizar el curso. Sandra mostró tener algunos conocimientos iniciales sobre dualidad y ecuación de Schrödinger y que podía plantear algunas diferencias entre el comportamiento cuántico y el clásico. Su relato de los comienzos de la FQ fue anecdótico y ambiguo, nombrando experiencias conflictivas tradicionales en los libros de textos sin poder especificar con claridad los aspectos que cuestionaban los principios de la FC. A pesar de sus conocimientos iniciales, la profundización en entrevistas y notas de clase mostraron un conocimiento fragmentado y memorístico que reflejó la presencia de los reduccionismos mencionados en el capítulo 6.

Estas concepciones de Sandra no son concepciones ingenuas pues hay muchos elementos adquiridos a través de la instrucción previa que colaboraron en el anclaje de los nuevos conocimientos. A lo largo de su formación Sandra ha elaborado lo que Vosniadou (2008) ha dado en llamar modelos sintéticos y Clement (2010) modelos intermedios sucesivos, que si bien la acercan a las concepciones científicas, presentan aún muchos aspectos fragmentados e inconexos en los que se incorporan elementos formales en una estructura conceptual incompleta (proceso de asimilación y acomodaciones parciales en sentido piagetiano, y de enriquecimiento aditivo de Vosniadou). Por otro lado, sus conocimientos iniciales, si bien básicos e incompletos, dan cuenta de concepciones semielaboradas pero productivas en el sentido que funcionaron como base para una evolución hacia la comprensión de los modelos científicos en acuerdo al planteado por Smiths, diSessa y Rochele (1993).

Luego del curso, sus expresiones son más específicas. En relación a la definición de los objetos cuánticos, la atribución de propiedades duales a los mismos, el manejo e interpretación del formalismo relacionándolo con las relaciones de incerteza, la interpretación probabilística, las soluciones de la ecuación de Schrödinger, se detectan importantes cambios que muestran una reconceptualización o reestructuración fuerte en el sentido de Carey (1991) y una reasignación ontológica o corrimiento categorial en el sentido de Chi (2008). Los progresos son en su mayoría clasificados como *notables* en relación a la superación de los reduccionismos 1, 2 y 3 y moderado en el caso del reduccionismo 4. Este último es más difícil de sortear, dado el escaso nivel de manejo matemático del curso en general. Tampoco hubo un avance notorio en cuanto a la noción de orbital en la que se “suman” a las nociones originales, algunos aspectos vinculados al formalismo que no perturban demasiado la representación del mismo como zona del espacio ahora con cierta probabilidad asignada.

El caso de Daniel

El encuestado (6) a quien llamaremos Daniel (nombre ficticio) es profesor de Matemática, Física y Astronomía y se desempeña en la docencia en nivel medio y universitario desde hace 26 años. Ha realizado algunos cursos de actualización en temas de Física Clásica y ha leído textos diversos sobre física moderna por iniciativa personal. Su principal tema en la docencia es cinemática y mecánica y sus clases, según él mismo describió, son exposiciones teóricas tradicionales seguidas de resolución de problemas y visitas al laboratorio cuando la programación así lo establece. Sus compañeros destacan lo ordenado y prolijo que es Daniel en el pizarrón y el cuidado de sus gráficos y dibujos. Daniel es sumamente estructurado y en general no tiene términos medios, o experimenta avances notables o no experimenta avance.

La observación en detalle de sus respuestas, muestra que los estancamientos se dan en temas habituales asociados a la física precuántica (ruptura, orbitales, relaciones de incerteza, etc.), en los que además evidencia un buen nivel de comprensión inicial, mientras que muestra buenos progresos en temas menos discutidos en la enseñanza tradi-

cional. En este caso, podríamos decir que los modelos sintéticos o intermedios (Vosniadou, 2008; Clement, 2010), no siempre contribuyen eficazmente a la construcción de modelos más cercanos al modelo científico. Por el contrario, en el caso de Daniel, una sólida formación en Física Clásica y el reconocimiento de su potencialidad, se convierten en un obstáculo al momento de encarar nuevas situaciones que no encajan dentro la estructura tradicional. Pudimos ver que si bien inicialmente parece aceptar las premisas de la Física Cuántica (en el curso era un alumno destacado), luego de un tiempo, las concepciones clásicas tradicionales se imponen sobre las nuevas impidiendo afianzar nuevos conceptos. En este sentido, Vosniadou (1994 y 2008) sostiene que los alumnos poseen teorías marco caracterizadas por principios epistemológicos que permiten restringir la información procesada de manera tal que todo lo que no puede interpretarse desde esos principios, no se procesa. Así, la nueva información “se suma” temporalmente pero no existe una real reasignación de significados o recategorización (Chi, 2008).

Estos modelos intermedios de alta resistencia al cambio, están relacionados con los algunos de los avances escasos y moderados de Daniel. Así, Daniel tenía conocimiento de que la FC no puede explicar ciertas experiencias surgidas a fines del siglo XIX o principios del siglo XX (nombró el efecto fotoeléctrico y el problema del cuerpo negro y la constante de Planck), pero sus afirmaciones mostraron conocimiento secuencial (similar al planteo que aparece en los libros de física básica) y relatos históricos sin argumentaciones epistemológicas (categoría 1 A, pregunta 1).

“...La Física Moderna supone una ruptura con la clásica en el sentido de no haberse encontrado una teoría general de la física que abarque los descubrimientos nuevos...” (1)

“...la FC explica todo lo macroscópico y algunas cosas de lo microscópico, ..., pero al llegar a cierto tamaño, la FC ya no se cumple, ..., no podemos medir porque se perturba el sistema, no hay ley de movimiento...”

“...la FC no puede explicar el “desastre” (se refiere a catástrofe) del ultravioleta ni el efecto fotoeléctrico...[] ...Planck plantea su constante para sacar una ley que explique el cuerpo negro y Einstein la usa para el efecto fotoeléctrico...[] ...a Einstein le dieron el premio Nóbel por eso, ... a Planck no...”

Al finalizar el curso, manifestó que la FQ era mucho más una extensión de la FC o que el “descubrimiento” de nuevas leyes o de la constante de Planck, pero mantuvo como causa principal de la ruptura entre la FQ y la FC la “necesidad” de explicar fenómenos

que escapan a los modelos clásicos y que se sitúan específicamente en el plano de lo “microscópico” (cat. 2k, pregunta 1).

“...La Física Moderna supone una ruptura con la Clásica debido a que cambia el modo de pensar el mundo viéndolo desde lo microscópico. La Física Clásica, en cambio, analiza los fenómenos macroscópicamente...”

Esto también se puso en evidencia en oportunidad de la exposición final del tema 7 “los experimentos que históricamente llevaron a la ruptura entre la FC y la MQ”, Daniel fue quien eligió este tema y su aporte fue un relato histórico secuencial en el que se plantearon limitaciones de la FC, con pocos planteos epistemológicos que debieron ser completadas por los demás asistentes en la discusión final.

Otra área en la que se presentan moderados o escasos es en relación al formalismo. Daniel manifiesta conocer cuestiones aisladas de algunos conceptos básicos. No escapa a la tendencia general de considerar los orbitales como “trayectorias” asociadas a ciertos valores de la energía, afirma que los objetos microscópicos están en algún estado pero que la teoría es limitada y no lo puede determinar, llama superposición de estados a la colección de estados posibles, e interpreta en la ecuación de Schrödinger una herramienta que proporciona información útil, sin precisar (categorías 1B preguntas 2d, 7 y 2f). La superposición de estados es un tema raramente desarrollado o discutido en los cursos tradicionales de MQ. No se tiene una representación definida del concepto y se recurre a la idea de superposición matemática para dar una explicación. Este tipo de explicaciones parece originarse en conceptos extrapolados en una formación anterior como por podría ser en ondas, donde la superposición de soluciones sigue siendo solución o en matemática en analogía con las soluciones de ecuaciones diferenciales de orden superior.

“...Los orbitales son trayectorias determinadas por partículas o niveles de energía...”

“...la superposición de estados en mecánica cuántica creo que es una representación matemática ya que un objeto cuántico “debe estar en algún lugar determinado” por su nivel de energía...” (nuevamente asocia lugares específicos a los valores de energía)

“...son los posibles estados en que puede estar un electrón, habrá que calcular la probabilidad para saber en cuál está...” (no asocia el estado observado al proceso de medición)

“...La ecuación de Schrödinger es la forma en que se comporta un fotón desde el punto de vista ondulatorio...” (limitada al fotón)

“...la ecuación de Schrödinger es la ecuación de la onda asociada a la partícula, pero es en derivada primera...”

“...un estado mezcla se puede pensar como una suma de soluciones de la ecuación de onda...”

En estas afirmaciones aparecen, además, indicios del cuarto reduccionismo descripto (formalismo → resolución mecánica o ejercitación).

Al finalizar el curso los orbitales si bien siguen vinculados fuertemente a la energía, ya no se asocian a una trayectoria tipo planetaria y no se limitan a los electrones (categoría 2K, pregunta 2d). Esta respuesta es de un grado de abstracción mayor que la 1.B, algo similar a lo que Fischler (1992) establece como avance desde posiciones iniciales de zona cáscara o núcleo. A la vez, algunas de las afirmaciones de Daniel muestran la incorporación de nociones fragmentadas en su estructura cognitiva inicial. El formalismo cuántico es valorado en su potencialidad aunque no se lo conozca, y se incorpora la idea de “colapso” de la función de onda (el término surgió en una de las clases). No hay referencias a las soluciones de la ecuación de Schrödinger, ni a alguna interpretación en términos de probabilidades. Es la categoría más alejada de la interpretación oficial (categoría 2K, pregunta 2f).

“...Los orbitales son los niveles de energía que pueden asumir un subsistema de un sistema de partículas...”

“...La ecuación de Schrödinger establece las tasas de cambio con respecto al tiempo y la energía, asociadas a la función de onda...”

(Superposición de estados) *“... Hay teorías alternativas al respecto que dicen que el objeto cuántico debe estar en algún estado y estará en el lugar donde colapsa la función de onda.*

Como podemos ver, los avances en estos temas vinculados al formalismo no han sido importantes. Esto era de esperar, ya que dada las condiciones del curso, el compromiso académico y temporal, no pudo profundizarse este aspecto.

En cuanto a las relaciones de indeterminación, se entienden como una característica propia de la MQ sin precisar. Las respuestas son totalmente ambiguas y se remiten al significado etimológico de la palabra incertidumbre como algo contrapuesto al determinismo causal propio de la mecánica clásica. Asimismo, la interpretación probabilística, está dentro de quienes se refieren al cálculo probabilístico clásico como recurso ante la

falta de información, ya que no se puede evitarse perturbar el estado del sistema al medir en el nivel microscópico. (categorías 1B y 1 A preguntas 2c y 2e)

“...Las relaciones de indeterminación tienen que ver con la ecuación de Schrödinger: establece una relación en la que se describe al fotón desde el punto de vista ondulatorio o de partícula...”

“... (Las relaciones de indeterminación) dicen que no se puede determinar dónde está el electrón o la velocidad que tiene,..., esto no es así en MC, ...en MC está todo determinado de antemano, por las leyes de movimiento...”

“...¿indeterminación? Como la palabra lo dice, que no puede determinarse, en MQ la posición de una partícula cuántica, ..., a nivel atómico aparecen problemas con la medición, en cambio en Clásica no se afecta, la posición depende de las leyes de movimiento...”

“...La interpretación probabilística es interpretar un fenómeno en términos de probabilidades, es decir, el mayor o menor grado de que ocurra un suceso...”

“...en Cuántica no se puede conocer la posición de una partícula, ... aparecen problemas en las mediciones que afectan la posición y sólo se conoce la probabilidad...”

“...la teoría de la probabilidad es un recurso para conocer la posición en que está un electrón en el átomo... es la forma de afirmar algo a nivel microscópico, ...no puedo medir de otra forma...”

Las concepciones iniciales son elementales y algo más ajustadas en el caso de las relaciones de indeterminación, pero siguen siendo ingenuas en el sentido de que se basan fuertemente en el significado etimológico de los términos e incluyen unos pocos elementos teóricos.

Luego del curso no hubo en este caso cambios importantes. Si bien se observa una mejora en cuanto a las relaciones de indeterminación, no puede establecerse un grado de avance suficiente.

“...(relaciones de indeterminación). La probabilidad determina el estado de un sistema. Es la incertidumbre (ppio de Heisenberg) de encontrar, por ejemplo un electrón, en alguna parte que rodea al núcleo...”

“...(interpretación probabilística) Al trabajar un sistema de partículas se debe necesariamente determinar la probabilidad de que un sistema se encuentre en un estado medio, ya que es indistinguible desde lo microscópico asignar a cada partícula una velocidad o una cantidad de movimiento o posiciones de todas ellas. Aunque esto fuera posible, es laborioso y no viola la mecánica clásica...”

Se sigue pensando que la partícula “está” en algún estado, en este caso un “estado medio”. Las relaciones de indeterminación y la interpretación probabilística, están estrechamente relacionadas y se muestra en el caso de este asistente, la dificultad para superar una visión de la descripción probabilística cuántica limitada a cuestiones estadísti-

cas ante la falta de información sobre el estado de una partícula que sigue siendo alguno aunque no se pueda conocer con exactitud. La limitación en la instrucción de las relaciones de Heisenberg a las partículas, sumada a la concepción cotidiana de incerteza como algo incierto o desconocido, genera la permanencia de interpretaciones que asocian la MQ a tratamientos estadísticos necesarios para salvar la carencia de conocimiento en las mediciones. No aparece en este caso un cambio de ontología en el sentido de Chi(2008) y la teoría marco inicial se ha arraigado fuertemente permitiendo la incorporación sumativa de algunas pocas nociones aisladas e inconexas. (Vosniadou, 2008). Fischler (1992) llama a esta evolución en el caso de los orbitales , como avance desde posiciones iniciales de zona cáscara o núcleo.

Algo similar ocurre en cuanto a cuestiones vinculadas al formalismo sobre las que al comienzo del curso se afirmaba:

“...Los orbitales son trayectorias determinadas por partículas o niveles de energía. (Asociación directa niveles de energía a lugar espacial.)...”

“...La superposición de estados en mecánica cuántica creo que es una representación matemática ya que un objeto cuántico debe estar en algún lugar determinado por su nivel de energía. (nuevamente asocia lugares específicos a los valores de energía)...”

“...La ecuación de Schrödinger es la forma en que se comporta un fotón desde el punto de vista ondulatorio...”

Y al finalizar no había cambios substanciales:

“...Los orbitales son los niveles de energía que pueden asumir un subsistema de un sistema de partículas...”

“...(Superposición de estados) Hay teorías alternativas al respecto ya que Bohm dice que le objeto cuántico debe estar en algún estado y no estará en el lugar donde colapsa la función de onda...”

“... La ecuación de Schrödinger establece las tasas de cambio con respecto al tiempo y la energía, asociadas a la función de onda...”

Si bien en el caso de los orbitales ya no se asocia nivel de energía a una trayectoria, no se establecen relaciones con las soluciones de la ecuación de ondas y tampoco es correcto que los orbitales sean niveles de energía. En cuanto a superposición de estados, aparecen elementos incorporados a partir de las lecturas que Daniel hizo en forma personal y no tratados en el curso, que aluden a Bohm y a la posibilidad de evitar la idea de colapso de la función de ondas según algunas teorías alternativas que no detalla. En este caso, la teoría de colectivos estadísticos se ajusta más a su concepción clásica causal de la evolu-

ción de las partículas y Daniel recurre a esta información a pesar de ser un tema no tratado en el curso. Esto es otra evidencia de la presencia de elementos que se suman a una estructura conceptual previa acomodándose parcialmente que permiten a Daniel entender la causalidad probabilística en términos de sus concepciones clásicas. La ecuación de Schrödinger tampoco adquiere una significación precisa ni se entiende su potencialidad, sólo hay referencias ambiguas, no se hace referencia a las soluciones de la ecuación de Schrödinger, ni a una interpretación en términos de probabilidades y los términos ecuación de ondas y función de onda aparecen indiferenciados.

Los mayores avances de Daniel estuvieron en los temas relacionados con la construcción de un modelo cuántico dual. Inicialmente Daniel afirmaba:

“...Un fotón puede caracterizarse como un cuanto de energía...”

“...Un fotón no tiene masa, es un campo electromagnético confinado...”

“...Un fotón es energía y no tiene masa...”

“...Un fotón SI puede experimentar interferencias constructivas y destructivas. Desde el punto de vista ondulatorio. Las ondas electromagnéticas son transversales por lo tanto se manifiestan fenómenos de difracción e interferencia...”

“...Por cuantificación entiendo que podemos modelizar a la luz, por ejemplo como un cuanto de energía o sea como un paquete (fotón)...”

“...la cuantificación de la energía la estableció Einstein y Planck...” (no hay referencias a la cuantificación de otras magnitudes)

“...las órbitas están cuantificadas, la energía de las órbitas, cuando un electrón cambia de nivel emite un fotón de cierta frecuencia determinada según lo estableció Bohr en sus postulados...”

“...Por dualidad onda-partícula entiendo el comportamiento por ejemplo de un electrón, a veces como partícula y a veces como onda según el modelo utilizado....” (en el cuestionario se pedía que definieran dualidad de la “partícula”)

“...Por comportamiento dual de una partícula entiendo el comportamiento dual de una partícula es considerar a la misma, como partícula o como onda, según el modelo. Ej.: la luz como fotones que impactan sobre una pantalla o como frente de onda incidiendo sobre una superficie...”

“...Un objeto cuántico lo describiría como un objeto que transmite energía, por ej. Un protón, un electrón, un haz de luz...”

“... El átomo es la unidad elemental de materia, compuesto por el núcleo (neutrones y protones) y los electrones...”

“...Diferencias y similitudes con los objetos clásicos Similitudes: es un modelo que sirve para explicar un fenómeno, como un plano inclinado sobre el que se mueve un cuerpo sin roce, pero permite explicar los fenómenos a nivel micromolecular...”

En esta etapa inicial el fotón se interpreta como paquete de energía, sin masa, asociado a un campo electromagnético. Hay una referencia muy fuerte a la cuantificación de la energía y se detectan concepciones con origen, posiblemente, en el tratamiento que presentan los libros de textos tradicionales de Física General en los que se describe al fotón como cuantos o paquetes de energía asociados a la ecuación de Planck $E=h \cdot \nu$, y se retoma el tema con el átomo de Bohr para describir la emisión de radiación de un átomo excitado que vuelve a su estado fundamental. En carácter ondulatorio aparece ligado fuertemente al comportamiento macroscópico de la radiación, y en particular al fotón, salvo en el caso en que se le preguntó explícitamente por la dualidad de las partículas, en ese caso recurrió a extrapolaciones ambiguas basadas en el significado de la palabra dualidad. Otra evidencia de la restricción de la dualidad a la radiación, es la imposibilidad de definir un objeto cuántico con propiedades ondulatorias y la restricción de dicho objeto a lo microscópico como principal diferencia con los objetos clásicos que para Daniel son todos macroscópicos.

El tema del comportamiento dual de los objetos cuánticos fue uno de los más tratados a lo largo del curso y en el que se puso mayor énfasis. Diversas actividades como la presentación de diagramas de interferencia de partículas, la experiencia de Feynman, la profundización de la teoría de ondas y las discusiones programadas sobre las limitaciones de los modelos clásicos, enfocaron en forma transversal el tema de la dualidad poniendo especial énfasis en mostrar que la dualidad es una característica propia de la MQ no restringida a la radiación y a la materia en forma independiente, que define un nuevo objeto que aúna las propiedades de ambas.

Luego del curso algunas de las afirmaciones de Daniel en fueron:

“...Un fotón lo caracterizaría con una longitud de onda y una frecuencia que si bien son características de una onda, están asociadas a un cuanto de energía...”

“...Sí, un fotón puede experimentar interferencias constructivas y destructivas. El experimento de la doble rendija lo manifiesta...”

“...La cuantificación se refiere a que se puede establecer desde el modelo microscópico una cuantificación. Es pensar por ejemplo un sistema en cuantos de energía...”

“...Las diferencias están en que para poder explicar por ejemplos los fenómenos térmicos se hacen indispensables térmicos de probabilidad y los niveles de energía determinados por los estados cuánticos asociados. Desde lo macroscópico nos e aprecian variaciones a nivel molecular...”

Si bien los progresos no son importantes en relación al fotón y la cuantificación que sigue estando vinculada fuertemente a la energía (avances moderados basados en una mayor especificidad de las afirmaciones), se evidencian notables progresos en cuanto a extrapolar a la materia el concepto de dualidad inicialmente restringido a la radiación:

“...Por dualidad onda-partícula entiendo que podemos interpretar los fenómenos cuánticos pensando en términos de ondas (funciones) aunque desde lo clásico las partículas estén asociadas a cantidad de movimiento y tienen masa...”

“...Comportamiento dual de una partícula entiendo es considerar por ejemplo un electrón como onda o como partícula. Desde la cuántica podemos decir que un electrón interfiere consigo mismo o bien asignarle una posición y velocidad como partícula...”

“...Un objeto cuántico es un objeto cuántico está caracterizado por su longitud de onda y su frecuencia. Son objetos cuánticos aquellos que se pueden describir desde el enfoque microscópico (electrones, protones, etc.) ...”

“...El modelo actual del átomo se describe como una región central que corresponde al núcleo y la nube electrónica determinada por los niveles de energía permitidos en los cuales puede estar...”

“...Diferencias y similitudes con los objetos clásicos: Objeto clásico: tiene posición y velocidad determinadas (cantidad de movimiento), energía...[]...Objeto cuántico: tiene asociada una función de onda, caracterizada por su longitud de onda y su frecuencia...”

La dualidad es ahora una propiedad, un comportamiento, una interpretación, un modelo, un fenómeno. Se reconoce un objeto cuántico de comportamiento dual en mecánica cuántica, y parece transitar una etapa de generalización en la que del concepto de objeto clásico caracterizado por dos representaciones disjuntas (radiación y materia) se va aproximando lentamente a una unidad que asume propiedades de ambas representaciones. Se asigna a este objeto cuántico, otras propiedades además de la naturaleza dual sin hacer referencia explícita a ondas o a partículas. Así se dice que tiene una longitud de onda asociada, y no puede conocerse con certeza su posición y momento.

Resumiendo podemos decir que Daniel no ha avanzado substancialmente en relación a la superación de los reduccionismos vinculados a la permanencia de visiones históricas lineales del surgimiento de la FQ, a interpretaciones probabilísticas necesarias para superar una falta de información y problemas de medición y al formalismo como mera herramienta matemática en el que sólo reasigna una interpretación a los orbitales como zonas de mayor probabilidad de encontrar un electrón. Por otro lado, sus mayores avances los logró en los temas vinculados a la construcción del concepto de un objeto cuántico dual. De una idea de la dualidad restringida a la radiación y un modelo de partí-

cula cuya energía podía estar cuantizada pero que no guardaba relación alguna con el modelo ondulatorio, Daniel manifiesta ahora la incorporación de nuevos elementos conceptuales y un nivel de abstracción mayor en sus representaciones que evidencia un salto ontológico de nivel importante (Chi, 2008), o una restructuración fuerte o radical (Carey, 2008). Partiendo de una estructura conceptual semielaborada pero relativamente coherente Daniel ha elaborado en este caso un modelo científico más ajustado (Vosnaidou, 2008; Clement, 2010). Sin embargo, en los otros casos mencionados, aspectos de la misma teoría elaborada con anterioridad, impidieron el anclaje de nuevos conocimientos o la construcción de estructuras diferentes, a pesar de los esfuerzos en la instrucción.

8.5 Comentarios de final del capítulo

En este capítulo hemos presentado los resultados de la evaluación de una propuesta didáctica para la enseñanza de Física cuántica para el nivel del profesorado, hemos analizado las dificultades que enfrentan los profesores asistentes, hemos caracterizado su evolución en la comprensión de temas específicos en función de la dificultad del tema y del perfil personal y presentamos en detalle los casos de dos profesores

Los resultados obtenidos confirman nuestras hipótesis respecto a la presencia de ciertas reducciones conceptuales, a visiones simplistas de la ciencia, a conceptos clásicos de ondas o de partículas y a un formalismo matemático aséptico de interpretación. Muestran, además, los temas que ofrecen fuerte resistencia al cambio conceptual y se vinculan los resultados con los aportes de la investigación educativa.

En el próximo capítulo, cerramos este informe de tesis, con una recapitulación de la investigación, una síntesis de conclusiones y un planteo de perspectivas a futuro.

Capítulo 9

Recapitulación y perspectivas a futuro

Recapitulación y perspectivas

En esta investigación, nos propusimos caracterizar el pensamiento de profesores de ciencia en relación a la Física Cuántica. Nuestro interés parte del reconocimiento de la necesidad de mejorar la formación en estos temas con el propósito de generar actitudes positivas para su implementación en el aula, en particular los que cuestionan los modelos clásicos tradicionales de onda y de partícula.

Diseñamos para ello, una serie de instrumentos que permitieron alcanzar, en aproximaciones sucesivas, una descripción interesante de dichas concepciones.

En una primera instancia se realizó una caracterización inicial del pensamiento de los profesores sobre la ciencia en general, su posicionamiento didáctico frente a la enseñanza, sus opiniones respecto a la propia formación y sobre aspectos generales de la formación en mecánica cuántica. Esta primera caracterización permitió definir aspectos particulares de la formación en MQ que fueron investigados en la siguiente instancia o caracterización específica posterior. Así, cada instrumento asumió un doble rol: por un lado recabar resultados que respondieran los interrogantes planteados, y por otro, poner al descubierto conflictos con las ideas aceptadas por la comunidad científica que sirvieran de base para el diseño de los instrumentos subsiguientes.

La caracterización realizada muestra que la formación de los profesores se limita principalmente a la física clásica y dentro de ella, a los temas que acostumbran a desarrollar en su práctica docente. Los temas de la física clásica no se distinguen suficientemente de los de la física cuántica, los fenómenos ondulatorios se confunden con algunos de la física moderna y, particular en relación a la física cuántica, las respuestas reflejaron un buen conocimiento “informativo” de los tópicos desarrollados en la etapa anterior a Bohr, pero en adelante se introducen nombres y cuestiones fragmentadas e inconexas.

Los profesores reconocen su falta de formación pero son optimistas en cuanto a la posibilidad de incluir temas de física cuántica en la currícula de nivel medio. Reclaman alternativas de presentación que superen las presentaciones que conocen, basadas en el en la discusión de los modelos atómicos o en desarrollo del formalismo y consideran que la enseñanza de los temas de la física actual es una deuda pendiente.

En cuanto a las ideas presentes en el pensamiento de los profesores, en relación a la física cuántica, en nuestra investigación identificamos varios reduccionismos presentes en las interpretaciones de los profesores:

- *reduccionismo primeros conflictos* → *visiones históricas lineales*: los profesores reconocen los hitos históricos que marcaron los inicios de esta nueva física, pero no los interpretan como la evidencia de una verdadera revolución conceptual que impone límites a la física clásica.

- *reduccionismo objeto cuántico* → *ondas “o” partículas*: coexisten dos modelos independientes, uno para la luz (que puede comportarse como partícula, el fotón) y otro para la materia (limitado al electrón, al que puede asociársele una onda cuando gira alrededor del núcleo). En esta visión, estos entes no pueden dejar de ser, o bien ondas o bien partículas en un sentido estrictamente clásico.

- *reduccionismo descripción probabilística* → *descripciones exactas*: las relaciones de incerteza de Heisenberg son consideradas como un postulado que da cuenta de un desconocimiento de la posición, o las interpretaciones probabilísticas se asocian a problemas de medición, ambas superables con el avance tecnológico.

- *reduccionismo formalismo* → *resolución mecánica o ejercitación*: la utilidad del formalismo se limita a la resolución de ejercicios con escasa.

Para abordar los problemas de formación detectados, se diseñó una alternativa didáctica cuyo hilo conductor fue la discusión de los modelos dual de la materia y la radiación y cuya metodología consistió, esencialmente, en la participación activa de los asistentes a través de actividades especialmente elaboradas. La interacción entre pares y con el

docente a cargo del curso jugó un rol fundamental en el diseño. A través de las diferentes actividades nos propusimos, no sólo favorecer un avance en contenidos, sino también la explicitación conjunta de las ideas de los profesores y cuestionar las mismas a través de un análisis de sus alcances de validez, construir modelos alternativos si fuera necesario, consensuar los nuevos modelos con la comunidad de asistentes (como lo hace la comunidad científica) y analizar las dificultades personales de comprensión de cada tema (en un proceso metacognitivo) y finalmente, discutir la factibilidad de implementación en el aula.

Los instrumentos utilizados permitieron establecer categorías de pensamiento iniciales de los profesores y estudiar cómo evolucionaron algunas de dichas concepciones a lo largo del cursado, cuáles eran, en el caso de que las hubiera, las concepciones intermedias en el camino de aprendizaje y en qué medida hubo una aproximación a los modelos consensuados por la comunidad científica.

En esta investigación, se diseñó, además, una metodología gráfica para analizar las categorías iniciales y finales, que permitió poner en evidencia la evolución de los individuos (diagramas de evolución) el tipo de avance experimentado (tablas de análisis global).

Luego de aplicado el trayecto didáctico, las categorías de pensamiento alcanzadas muestran que se lograron *avances notables* en la comprensión de temas vinculados a:

- i) la interpretación del concepto de dualidad,
- ii) la caracterización de fotón,
- iii) la diferenciación entre objetos cuánticos y clásicos,
- iv) la superposición de estados, y
- v) la ecuación de Schrödinger.

En el caso del concepto de dualidad, inicialmente limitado a la energía en forma mayoritaria, se supera la definición del fotón como mera partícula de energía y las concepciones evolucionan hacia una idea de objeto cuántico más general, para el que ya no es tan importante decidir si es una partícula o una onda pues posee las propiedades definitorias

de ambas, que es, justamente, una de las principales características del comportamiento cuántico. La superposición de estados ya no es un artilugio matemático para evadir la falta de definición a nivel microscópico, y por el contrario, se admite que es una característica propia de los objetos cuánticos. Estos resultados muestran cambios ontológicos importantes, en el sentido que plantea Chi (2008).

Las cuestiones que ofrecieron *mayor resistencia al cambio* fueron las vinculadas a:

- vi) reconocer la ruptura epistemológica entre la Física Clásica y la Cuántica;
- vii) superar la idea los orbital como zonas o estanterías donde se ubican los electrones alrededor del núcleo orbitales y,
- viii) entender la cuantificación como algo que se extiende a otras magnitudes además de la energía.

Estas cuestiones, si bien parecen ser más sencillas que las enumeradas en el párrafo anterior, se manifiestan como más arraigadas y sólidas. En el caso de la ruptura entre la física clásica y la cuántica, es posible que, en la formación habitual, se subestime la importancia del cambio de estructuras conceptuales que supuso el inicio de la FQ y se reduzca el tema a relatos anecdóticos, que por otro lado, corresponden a las presentaciones más usuales en los libros de texto. Una imagen de ciencia como conjunto de verdades descubiertas por los investigadores, incluso a veces al azar, producto de una enseñanza dogmática durante su formación, colabora en la inercia al cambio que evidencia estos temas. A la vez, concepciones fuertemente arraigadas en la estructura conceptual construida con anterioridad, ya sea en forma espontáneamente o a través de la instrucción, generalmente asociadas a representaciones de la física clásica, resultan incompatibles y dificultan la incorporación de nuevos modelos (teorías marco de Vosniadou, 2008)

En cuanto a otros temas, los resultados mostraron avances parciales a partir de una concepción simplista, sin llegar a lograr una conceptualización satisfactoria. Es el caso de la relaciones de incerteza de Heisenberg en que, si bien la mayoría de los encuestados alcanzan el nivel más alto de comprensión, otros, luego del curso, dan respuestas con mayor grado de especificidad respecto de las iniciales sin que se evidencien cambios

sustanciales. En ésta, como en ocasiones de otros temas, los avances parciales se producen en individuos que mantienen fuertes convicciones en modelos *aprendidos* con anterioridad dentro de la física clásica, con poca o escasa explicitación de su campo de validez. En estos casos, hay evidencia de la construcción de modelos que sintetizan antiguos y nuevos elementos en modelos intermedios más cercanos a los científicos. (Clement, 2008 y 2010)

Creemos que el hilo conductor planteado para la propuesta favorece la discusión de los conflictos conceptuales que plantea la FQ. La enseñanza a través de modelos en que nos basamos, ofrece una oportunidad para generar las discusiones epistemológicas que dan cuenta, no sólo de los conceptos involucrados, también, de modo en que opera la ciencia.

Sin embargo, debemos llamar la atención respecto a que la intervención de los profesores en estas discusiones supera una simple actividad planteada por el docente del curso, es una actitud que debiera ser construida a lo largo de su formación, tanto la inicial como la permanente. Es el caso de la enseñanza a través de modelos, que es una práctica que requiere cierta familiarización con la metodología y que debiera ejercitarse tempranamente.

A su vez, la reflexión sobre el propio conocimiento y la explicitación de las limitaciones de los modelos personales y también los de la ciencia, la discusión de aportes de la investigación educativa, son herramientas eficaces para el logro de avances tanto en relación a los contenidos, como para generar cambios en las actitudes de los profesores en cuanto a favorecer la enseñanza de la física cuántica en el nivel medio.

En este informe de tesis discutimos en profundidad del proceso de cambio conceptual transitado por un grupo de profesores a lo largo del cursado de una alternativa didáctica diseñada a partir de las dificultades detectadas en un comienzo. La evaluación de la propuesta no es parte de este informe de tesis pero su éxito se deduce de los avances de los asistentes en el tema y del cambio de actitud en relación a la presentación de la

FQ en el nivel medio. No es grato destacar el hecho de que la reticencia inicial respecto de la enseñanza de la FQ, probablemente enraizada en las propias dificultades de comprensión, fue reemplazada paulatinamente por el deseo de intentar trasladar la experiencia didáctica transitada a sus alumnos. Esto se plasmó en las presentaciones finales a cargo de los asistentes y en los comentarios explicitados en esas ocasiones y ya anticipados en diferentes instancias a lo largo del curso. Si bien no tenemos un registro sistematizado de esas opiniones, un indicador importante de este resultado es el hecho de la introducción de una unidad de FQ en la currícula del último año de Física del IPS del siguiente año, que se mantiene hasta el día de hoy. Esta unidad retoma la discusión en relación a la construcción de un modelo de estructura de la materia de carácter dual, tal como se hizo en nuestra propuesta.

Como perspectivas a futuro, proponemos continuar esta investigación en dos sentidos mutuamente complementarios.

Por un lado, es necesario seguir profundizando los diseños de propuestas de implementación de temas de FQ en el nivel medio y en la formación. Para ello debe insistirse, en paralelo, en incluir estos temas en la currícula, no en desmedro de los contenidos de la física clásica, pero sí dándoles un estatus más cercano. Hemos visto que para construir los modelos de la FQ no es necesario conocer en profundidad toda la FC, sino, más bien, asegurarnos que las ideas clásicas incompletas o con errores conceptuales, se extrapolen sin discusión a la FQ y transformándose en obstaculizadoras del aprendizaje. Es decir, un avance en la comprensión de la FQ exige una revisión de los conceptos clásicos, y el reconocimiento de los límites de validez de los mismos, permiten comprender a la FQ como una nueva física. Ambas se realimentan en un proceso continuo que garantiza el logro del aprendizaje deseado.

Por otro lado, como se desarrolló en el marco teórico y vimos en esta investigación, los cambios de concepciones no suelen ser abruptos, existen concepciones o modelos intermedios en el trayecto que va desde las ideas iniciales a las deseadas en la enseñan-

za. La física cuántica ofrece un área muy poco explorada en este sentido y que será objeto de futuras investigaciones. Por otro lado, el conocimiento de los estadios intermedios transitados en el camino hacia la adquisición y comprensión de los modelos de la ciencia, no es exclusivo de la FQ y puede aportar líneas de acción y sugerencias de aspectos a tener en cuenta.

"... La mecánica cuántica describe la naturaleza como algo absurdo al sentido común. Pero concuerda plenamente con las pruebas experimentales. Por lo tanto espero que ustedes puedan aceptar a la naturaleza tal y como es : absurda..."

Richard Feynman

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd-El-Khalick, F. y Lederman, N. G. (2000). The influence of history of science courses on students' views of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 37, 1057-1095.
- Abell, S. K. (2007). Research on science teacher knowledge (Chapter 36). In S.K. Abell and N.G. Lederman (Eds.), *Research on Science Teacher Education*, 1105-1149. Routledge: New York.
- Abimbola, I.O. (1988). The problem of terminology, in the study of student conception in science. *Science Education*. 72(2), pp. 175-134.
- Agassi, E. (1978). *Temas y problemas de la filosofía de la física*, cap. VIII, Barcelona: Herder. (en Aikenhead, G. S. (1985). Collective decision making in the social context of science. *Science Education*, 69(4), 453-475.
- Angulo Delgado, F. (2003). La investigación sobre la formación del profesorado de ciencias. *Tecne, Episteme y Didaxis*, Número Extra, Congreso sobre Formación de Profesores de Ciencia.
- Aragon, M. M.; Bonat, M.; Oliva y Mateo, J. M. (1999). Las analogías como recurso didáctico en la enseñanza de las ciencias. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 6 (22), 109-116.
- Asimov, I. (1986). *Introducción a la ciencia. Ciencias Físicas*. Vol 1, Hyspamerica: Buenos Aires.
- Ausubel, D. P. (1978). *Educational Psychology. A cognitive view*. Nueva York : Holt, Rineheart and Winston, Inc.
- Bachelard, G. (1968). *La formación del espíritu científico*. Morata: Madrid. Siglo XXI: México.
- Blanco., R. y Níaz, M. (1998). Baroque tower on a gothic base: A lakatosian reconstruction of students' and teachers' understanding of structure of the atom, *Science Education*, 7, 327-360.
- Bradbury, L. U. (2010). Educative Mentoring: Promoting reform-based science teaching through mentoring relationships. *Science Education* 94, 1049-1071.
- Brandsen, B. H. y Joachain, C. J. (2000). *Physics of Atoms and Molecules*. Pearson Education: London.
- Briscoe, C. (1991) The dynamic interactions among beliefs, role methaphores and teaching practices. A case study of teacher change. *Science Education*, 75(2), 185-189.

- Brookes, D. T. y Etkina, E. (2007). *Using conceptual metaphor and functional grammar to explore how language used in physics affects student learning*. *Physical Review, Special Topics, Physics Education Research*, 3, 010105.
- Brousseau, G. (1990). ¿Qué pueden aportar a los enseñantes los diferentes enfoques de la didáctica de las matemáticas? *Enseñanza de las Ciencias*, 8 (3), 259-267.
- Bryan, L. y Abell, S. (1999). Development of professional knowledge in learning to teach elementary science. *Journal of Research in Science Teaching*, 121-139.
- Buckley, B. (2000) Interactive multimedia and model-based learning in Biology, *Int. J. Sci. Educ.*, Vol. 22, No. 9.
- Bybee, R. (1997). Towards an Understanding of Scientific Literacy. En Graeber, W. y Bolte, C. (Eds.), *Scientific Literacy*. Kiel: IPN.
- Bybee, R. y De Boer, G. E. (1994). Research on goals for the science curriculum. En Gabel, D. L. *Handbook of Research en Science Teaching and Learning*. McMillan P.C.: New York.
- Campanario J. M. (2004). Científicos que cuestionan los paradigmas dominantes: Algunas implicaciones para la enseñanza de las ciencias. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 3(3), 257-286.
- Campbell, N. (1920). *Physics: The elements*. Cambridge University Press: Cambridge. Republished in 1957 as *The foundation of Science*. Dover: New York.
- Cañal, P. (2001). El análisis didáctico de la dinámica del aula: tareas, actividades y estrategias de enseñanza. Capítulo 9, en *Didáctica de las ciencias experimentales*. Perales F. J y. Cañal P, (Eds.). Marfil: Alcoy.
- Carey, S. (1991). Knowledge acquisition: Enrichment or conceptual change? En Carey, S. y Gelman, R. (Eds.), *The epigenist o mind: Essays on Biology and cognition*. Erlbaum: Hillsdale. N. J.
- Carey, S. y Spelke, E. (1994). Domain specific knoweledge and conceptual change. In Hirschfeld, L. A. y Gelman, S. A. (Eds.), *Mapping the mind: Domain specific in cognition and culture*, 169-200. Cambridge University Press Cambridge.
- Carraher, D.; Schliemann, A. y Brizuela, B. (2001). ¿Can young students operate on unknowns? In van den Heuvel-Panhuizen, M. (Ed.), *Proceedings of the 25th. Conference of the international group for the Psichology of Mathematics Education*, vol 1, 130-140. Utrech University: Utrech.
- Carrascosa, J. (2005). El problema de las concepciones alternativas en la actualidad (Parte II). El cambio de concepciones alternativas. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 2(3), 388-402.
- change for learning science concepts. *Learning and Instruction*, 4, 27-43.
- Chi, M. T. H. (1992). Conceptual change within and across ontological categories: Examples from learning and discovery in science. En Giere, R. (ed.), *Cognitive models of*

- Science: *Minnesota studies in the philosophy of science*, 129-186. University of Minnesota Press: Minneapolis, M. N.
- Chi, M. T. H. (2008). Three types of conceptual change: Belief revision, mental model transformation and categorial shift. En Vosniadou, S. (Ed.), *International handbook of research on conceptual change*, Capítulo 3, 61-82. Routledge: Londres.
- Chi, M. T. H.; Slotta, J. D., y de Leeuw, N. (1994). From things to processes: a theory of conceptual
- Ciércoles, M. A. (2005). Peligroso Analfabetismo en Ciencias. *La Vanguardia Digital*, 04/10/05.
- Caramonte, J. (1995). *Introducción a la física moderna en la enseñanza secundaria*. Síntesis: Madrid.
- Clement, J. (2008). The role of explanatory models in teaching for conceptual change. En Vosniadou, S. (Ed.), *International handbook of research on conceptual change*. Capítulo 16, 417-452. Routledge: Londres.
- Clement, J. (2000) Model based learning as a key research area for science education, *Int. J. Sci. Educ*, Vol. 22, No. 9, 1041- 1053
- Cohen, L.; Marion, L.; y Morrison, K. (2007) *Research Methods in Education*. Sexta Ed., Taylor & Francis: NY
- Coll, C. (1991). *Psicología y Currículum*. Paidós: Bs. Aires.
- Concari, S.; Giacosa, N.; Giuliano, M.; Giorgis, S.; Meza, S.; Lucer, I.; Marchisio, S. y Catalán, L. (2012). ¿Dónde se puede estudiar para ser Profesor/a en Física en la República Argentina. *Revista de Enseñanza de la Física*. 24(2), 65-68.
- Contenidos Básicos Orientados para la Educación Polimodal. Ciencias Naturales. Ministerio de Cultura y Educación de la Nación (<http://www.me.gov.ar/consejo/documentos/cbc/polimodal/1996/cbonat.pdf>).
- Cronin-Jones, L.L. (1991) Science teaching beliefs and their influence on curriculum implementation: two cases studies. *Journal of Research in Science Teaching*, 38 (3), 235-250.
- De Longhi, A. L. (2000). La enseñanza de la biología: una visión en el marco de la transformación educativa en Argentina. VII Encuentro "Perspectivas do ensino de biología". I Simposio Latinoamericano da IOSTE, 2-4 de febrero, Universidad de San Pablo.
- De Longhi, A. L. (2007). Análisis prospectivo de la formación de profesores de Biología en Argentina, *Tecné, Epistemey, Didaxis*, Número extraordinario, 50-65.
- Declaración de Budapest. (1999). Marco general de acción de la Declaración de Budapest, en <http://www.oei.org.co/cts/Budapest.dec.htm>.
- Declaración de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, la Asociación de Profesores de Física de la Argentina (APFA) y la Asociación Física Argentina (AFA) en el Año internacional de la Física. (2005).

- Del Re, G. (2000). Models and analogies in science. *HYLE*, 6, 3-12.
- Deligeroes, S. (1990). *El Mundo Cuántico: La inquietante mecánica cuántica*. Alianza: Madrid.
- DiSessa, A. (1988). Knowledge in pieces. In Forman, G. y Pufall, P. A. (Eds.), *Constructivism in the computer age*, 49-7. Erlbaum: Hillsdale N. J.
- DiSessa, A. (1993). Towards an epistemology of physics. *Cognition and instruction*, 10(2-3), 105-225.
- DiSessa, A. (2008). A bird's-eye view of the "pieces" vs. "coherence" controversy. (From the "pieces" side of the fence). En Vosniadou, S. (Ed.), *International handbook of research on conceptual change*, Capítulo 2, 36-60. Routledge: Londres.
- Driver, R. (1986). Psicología cognoscitiva y esquemas conceptuales de los alumnos. *Enseñanza de las Ciencias*, 4(1), 3-15.
- Driver, R. (1988). Un enfoque constructivista para el desarrollo del currículo de ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 6, pp. 109-120.
- Driver, R. y Easley, J. (1978). "Pupils and paradigms: a review of literature related to concept development in adolescent science students". *Studies in Science Education*, 5, 61-84.
- Driver, R.; Guesne, E. y Tiberghien, A. (1989). *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*. Morata/MEC: Madrid.
- Duit, R. (2009). *Bibliography - STCSE Students' and Teachers' Conceptions and Science Education*. Kiel: Consultada en <http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/>.
- Duit, R. y Treagust, D. (1998) Learning in science - From behaviourism towards social constructivism and beyond. In B. Fraser & K. Tobin (Eds.), *International handbook of science education* (pp. 3-26). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Duschl, R.A., y Gitomer, G. (1995). *Perspectivas epistemológicas sobre el cambio conceptual: implicaciones para la práctica educativa*. *Comunicación, lenguaje y Educación*, 25, pp. 107-125.
- Duschl, R. A., y Gitomer, G. (1995). Perspectivas epistemológicas sobre el cambio conceptual: implicaciones para la práctica educativa. *Comunicación, lenguaje y Educación*, pp. 107-125.
- Ebenezer, L.V. y Gaskell, P..J. (1995). Relational conceptual change in solution chemistry. *Science Education*, 79(1). 1-17.
- Dykstra, D. I.; Boyle, C. F. y Monarca y I. A. (1992). Studying conceptual change in learning physics. *Science Education*, 76(6), pp. 615-652.
- Einstein, A. y Infeld L. (1986). *La evolución de la Física*. Salvat: Barcelona.

- Fensham, P. (2001). Science content as problematic: Issues for research, en H. Behrendt, et al. (Eds.) *Research in science education. Past, present, and future*, 27-41. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht.
- Fensham, P. J. (2002a). Time to change Drivers for Scientific Literacy. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 2(1), 9-24.
- Fensham, P. J. (2002b). De nouveaux guides pour l'alphabétisation scientifique. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 2(2), 133-149.
- Fernández, I.; Gil, D.; Carrascosa, J.; Cachapuz, A.; y Praia, J. (2002). Visiones deformadas de la ciencia transmitidas por la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, 20 (3), 477-488.
- Fernández, J.; Medina, M. y Elortegui, N. (2002). La formación del profesorado de Ciencias Naturales en Secundaria, a partir de sus ideas previas. *Investigación en la escuela*, 47, 65-74.
- Fernández, P. y Jardón, A. (2012). Simulaciones en la enseñanza de la física. La ilusión de la interactividad y las rutinas del profesor. *Revista de Enseñanza de la Física*, 24, (2), 27-48.
- Fernández, P.; González, E. y Solbes, J. (2005) . De los corpúsculos de luz al efecto fotoeléctrico. *Revista de Enseñanza de la Física*, 18 (1), 69-80.
- Fernández, P.; González, E. y Solbes, J. (1997). La inclusión de temas actuales de Física en el Polimodal. Algo más que ampliación de contenidos. *Revista Educación en Ciencias*, 1(3), 5-10.
- Feynman, R.; Leighton, R. y Sands, M. (1987). *Física*. Vol III: Mecánica Cuántica. Secciones 37-1 a 37-7. Addison-Wesley Iberoamericana: Wilmington, Delaware, USA.
- Fischler, H. y Lichtfeldt, M. (1992). Modern Physics and Students' Conceptions. *International Journal of Science Education*, 14 (2) 181-190.
- Fourez, G. (1997). *Alfabetización científica y tecnológica. Acerca de las finalidades de la enseñanza de las ciencias*. Buenos Aires: Colihue.
- Furió, C. (1994). Tendencias actuales en la formación del profesorado en Ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 12 (2), pp. 188-199.
- Furió, C., Barrenetxea, I. y Reyes, J.V. (1994). *Contribución de la resolución de problemas como investigación al paradigma constructivista de aprendizaje de las ciencias*. *Investigación en la Escuela*, 24, pp, 88-99.
- Furió, C. y Carnicer, J. (2002). El desarrollo profesional del profesor de Ciencias mediante tutorías de grupos cooperativos. Estudio de ocho casos. *Enseñanza de las Ciencias*, 20(1), 47-73.
- Furió, C. y Gil, D. (1989). La Didáctica de las Ciencias en la formación inicial del profesorado: una orientación y un programa teóricamente fundamentados. *Enseñanza de las Ciencias*, 7 (3), 257- 270.

- Furió, C. y Hernandez Perez, J. y Harris, H. (1987). Parallels between adolescents' conceptions of gases and the history of chemistry. *Journal of chemical education*, 64(7). p 616.
- Furió, C.; Solbes, J. y Carrascosa, J. (2006). Las ideas alternativas sobre conceptos científicos: tres décadas de investigación. Resultados y perspectivas. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 48, 64-78.
- Furió-Más, C., Solbes, J. y Furió-Gómez, C. (2008). Towards of effective ongoing training programmes for science teachers. *Problems of Education in the 21st Century*, vol. 6: 60-71.
- García Hourcade, J. L. y Rodríguez de Ávila, C. (1988). Ideas previas, esquemas alternativos, cambio conceptual y el trabajo en el aula. *Enseñanza de las Ciencias*, 6(2), 161-166.
- Garmendia, M.; Barragués, J.; Zusa, K. y Guisasola, J. (2013). Proyecto de formación del profesorado universitario de ciencias, matemáticas y tecnología, en las metodología de aprendizaje basado en problemas y proyectos. *Aceptado para su publicación en Enseñanza de las Ciencias*.
- Gess-Newsome, S. y Lederman N. (Eds.). (2003). *Examining Pedagogical Content Knowledge. The Construct and its Implications for Science Education*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, Boston, London.
- Gil, D. (1991). ¿Qué hemos de saber y saber hacer los profesores de ciencias? *Enseñanza de las Ciencias*, 9(1), 69-77.
- Gil, D. (1996). New trends in science education. *International Journal of Science Education*, 18(8). pp. 809-901.
- Gil, D. y Solbes, J. (1993). The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. *International Journal of Science Education*, 15, 255-260.
- Gil, D.; Carrascosa, J; Furió, C. y Martínez Torregrosa, J. (1991). *La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria*. Horsori/ICE: Barcelona.
- Gil, D.; Senent, F. y Solbes, J. (1989). Física moderna en la enseñanza secundaria: una propuesta fundamentada y unos resultados. *Revista Española de Física*, 3, 53-58.
- Gil, D.; Senent, F. y Solbes, J., (1986). Análisis crítico de la introducción de la Física moderna. *Revista de Enseñanza de la Física*, 2, 16-21.
- Gil, D.; Sifredo, C.; Valdés, P. y Vilches, A. (2005). ¿Cuál es la importancia de la educación científica en la sociedad actual? En Gil, D.; Macedo, B.; Martínez Torregrosa, J.; Sifredo, C.; Valdés, P. y Vilches, A. (Eds.), *Cómo promover el interés por la cultura científica? Una propuesta didáctica fundamentada para la educación científica de jóvenes de 15 a 18 años*. Capítulo 1 . Oficina Regional de Educación para América Latina y el Caribe OREALC/UNESCO: Santiago de Chile.
- Gilbert, J. K. (Ed.) (1993) *Models and modeling in science education*. Hatfield, Herts, UK: Association for Science Education.

- Gilbert, J. K. and Boulter, C. J. (1998) Learning science through models and modeling. In B. Fraser & K. Tobin (Eds.), *International handbook of science education* (pp. 53-66). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Gilbert, J. K.; Boulter, C. J. y Elmer, R. (2000). Positioning Models in Science Education and in Design and Technology Education. En Gilbert, J.K. y Boulter, C.J. (Eds.), *Developing Models in Science Education*, 3-17. Kluwer: Doordrecht.
- Gilbert, J. K.; Boulter, C. y Rutherford, M. (1998a). Models in explanations, Part 1: Horses for courses? *International Journal of Science Education*. 20(1), 83 - 97.
- Gilbert, J. K.; Boulter, C.; Rutherford, M.(1998b). Models in explanations, Part 2: Whose voice? Whose ears? *International Journal of Science education*, 20 (2), 187 – 203.
- Gilbert, J. K.; Osborne, R. J. y Fensham, P. (1982). Children's science an its implications for teaching. *Science Education*, 66, 625-633.
- Gimeno Sacristán, J. y Pérez Gómez, A. I. (1995). *Comprender y transformar la enseñanza*. Morata: Madrid.
- Giuliano, M.; Giorgi, M.; Giacosa, N.; Concari, S.; Meza, S. y Lucero, I. (2011). Una mirada a las estadísticas oficiales relativas a física y ciencias básicas en la educación superior argentina. *Revista de Enseñanza de la Física*, 24 (1), 81-96.
- González, E. (1994). Las prácticas de laboratorio en la formación del laboratorio de Física. Tesis doctoral en la Universidad de Valencia.
- González, E. (2001). *Educação Matemática e Formação de Professores no Cone Sul. La formación docente continua como problema*. Conferencia en el I Congreso Internacional de Ensino da Matemática, organizado por la Universidad Luterana (ULBRA), Porto Alegre.
- González, E. (2010). Algunos problemas referidos a la formación docente. *Revista de Educación en Biología*, 13(1), 39-45.
- Greca, I. y González, E. (2002). Comunidades de aprendizaje en desarrollo sustentable. *XX Encuentro de Didáctica de las Ciencias Experimentales*, La Laguna (Tenerife, España), septiembre. En: <http://www.ull.es/users/apice/>
- Greca, I. y Moreira M. A. (1998). O que estão entendendo alunos universitários nas aulas de mecânica quântica. *Atas (CDROM) do II ENPEC*. Moreira, M.A. (Org.), Valinhos, SP.
- Greca, I. y Moreira. M. A. (2002). Mental models, conceptual models, and modelling. *International Journal on Science Education*, 22(1), 1-11.
- Greeno, J. G.; Collins, A. M. y Resnick L. B. (1996). Cognition and learning. En Berliner, D. C. y Calfee, R. C. (Eds.), *Handbook of educational psychology*, 15-46. MacMillan: New York.
- Grosslight, L.; Unger, C.; Jay, E. y Smith, C. L. (1991). Understanding models and their use in science: Conceptions of middle and high school students and experts, *Journal of Research in Science Teaching*. 28, 799-822.

- Guisasola, J. y Morentin, M. (2007). ¿Comprenden la naturaleza de la ciencia los futuros maestros y maestras de Primaria? *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias* 6(3), 246-262.
- Gutiérrez, R. (2004). La modelización y los procesos de enseñanza/aprendizaje. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 42, 8-18.
- Gutierrez, R. y Ogborn, J. (1992). A causal framework for analysing alternative conceptions. *International Journal of Science Education*, 14(2), pp. 201-220.
- Gutwill, J., Frederiksen, J. Y Ranney, M. (1996). Seeking the causal connection in electricity: shifting among mechanistic perspectives. *International Journal of Science Education*. 18 (2). pp. 143-162
- Halloun, I. (1996) Schematic Modeling for Meaningful Learning of Physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 33(9), 1019 – 1041.
- Halloun, I. (2004). *Modeling Theory in Science Education*. Kluwer Academic Publishers: London.
- Halloun, I. (2007). Mediated modeling in science education. *Science & Education*, 16, 653-697.
- Harrison, A.G. y Treagust, D.F. (2006). Secondary students' mental models of atoms and molecules: Implications for teaching chemistry. *Science Education* 80, (5), pp. 509-534.
- Harrison, A.G. y Treagust, D.F. (2006) 'Teaching and learning with analogies: Friend or Foe', en Abusson, P.J.H.; Harrison, A.G. y Ritchie S.M.(eds.), *Metaphor & Analogy in Science Education*, Springer, Netherlands, pp. 11-24.
- Hatano, G. (Guest Ed.). (1994). Introduction: Conceptual change - Japanese perspectives. *Special Issue of Human Development*, 37(4), 189-197.
- Hatano, G. e Iganaky, K. (2003). When is conceptual change intended? A cognitive-sociocultural view. En Sinatra, G. M y Pintrich, P. R. (Eds.), *Intentional conceptual change*, 407-427. Erlbaum: Mashwah N. J.
- Hestenes, D. 1987. Toward a modeling theory of physics instruction. *American Journal on Physics*, 55(5), 440-454.
- Hewson, M. y Hamlyn, D. (1984). Preconcepciones sobre el calor en 2º de BUP. *Enseñanza de las Ciencias*, 3(3), 188-193.
- Hewson, P. W. (1981) A conceptual change approach to learning science. *European Journal of Science Education*, 3, 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, 61-78.
- Hewson, P. W. (1996) Teaching for conceptual change. In D. F. Treagust, R. Duit & B. J. Fraser (Eds.), *Improving teaching and learning in science and mathematics* (pp. 131-140). New York: Teachers College Press

- Hewson, P. W., y Hewson, M. G. ATB. (1984) The role of conceptual conflict in conceptual change and the design of science instruction. *Instructional Science*, 13, 1-13.
- Hewson, P. W., y Hewson, M. G. ATB. (1988) An appropriate conception of teaching science: A view from studies of learning. *Science Education*, 72(5) 597-614.
- Hewson, P. W., y Hewson, M. G. ATB. (1992) The status of students' conceptions. In R. Duit, F. Goldberg, & H. Niedderer. (Eds.), *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies* (pp. 59-73). Proceedings of an international workshop. Kiel, Germany: IPN - Leibniz Institute for Science Education.
- Holbrow, C. H.; Amato, J. C.; Galvez, E. J. y Lloyd, J. N. (1995). Modernizing Introductory Physics. *American Journal in Physic*, 63 (12), 1078-1090.
- Holbrow, C. H.; Lloyd, J. N.; Amato, J. C.; Galvez, E.; Parks y M. E. (2010). *Modern Introductory Physics*. Springer: New York.
- Holton, G. (2004). *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Reverté: Barcelona.
- Iganaki, K. y Hatano, G. (1977). Amplification of cognitive motivation and its effects on epistemic observation. *American Educational Research Journal*, 14(4), 485-491.
- Iganaky, K. y Hatano, G. (2008). Conceptual change in naïve Biology. En Vosniadou, S. (Ed.), *International handbook of research on conceptual change*, Capítulo 9, 240-262. Routledge: Londres.
- Ireson, G. (2000). The quantum understanding of pre-university physics students. *Physics Education*, 35, 15-21.
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Jung, W. (1992). Probing acceptance: A technique for investigating learning difficulties. In: Duit, R., Goldberg, F. y Niedderer, H. (Eds.), *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies*. Proceedings of an International Workshop at the University of Bremen. IPN: Kiel.
- Justi, R. (2006). La enseñanza de las ciencias basada en la elaboración de modelos. *Enseñanza de las Ciencias*, 24(2), 173-184.
- Justi, R. y Gilbert, J. (2000). History and philosophy of science trough models: Some challenges in the case of "the atom". *International Journal of Science Education*, 22 (9), 993-1009.
- Kalkanis, G., Hadzidaki, P. y Stavrou, D. (2003). An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*, 87 (2), 257-280.
- Kattmann, U. (2008). Learning biology by means of anthropomorphic conceptions? In Hamman, M.; Reiss, M.; Boulter, C. & Tunnicliffe, S. D. (Eds.), *Biology in context: Learning and teaching for the 21 century*. Institute of Education, University of London: London.

- Keil, F. C. (1994). *Concepts, kinds and cognitive development*. MIT Press: Cambridge M. A.
- Khun, T. S. (1971). *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo de Cultura Económica: Madrid.
- Krane, K. S. (1996). *Modern Physics*. John Wiley & Son: New York.
- Lakatos, I. (2007) *Escritos filosóficos 1: La metodología de los Programas de investigación científica*. Alianza: Madrid.
- Laudan, L. (1986). *El progreso y sus problemas. Hacia una teoría del progreso científico*. Encuentro: Madrid.
- Lehrer, R.; Kim, M. & Schauble, L. (2007). Supporting the development of conceptions of statistics by engaging students in modeling and measuring variability. *International Journal of Computers for Mathematics Learning*, 12, 195-216.
- Levy-Leblond, J. M. y Balibar, F. (1990). *Quantics: Rudiments of Quantum Physics*. Elsevier Science: Madrid
- Ley de Educación Nacional Nro. 26.206, Ministerio de Cultura y Educación, Buenos Aires, 14 de diciembre de 2006, disponible en: http://www.me.gov.ar/doc_pdf/ley_de_educ_nac.pdf
- Ley Federal de Educación Nro. 24.195. Ministerio de Cultura y Educación, Buenos Aires, 14 de abril de 1993, disponible en: <http://www.coneau.edu.ar/archivos/648.pdf>
- Linder, C.J. (1993). A Challenge to conceptual change. *Science Education*, 77(3), pp. 293-300.
- Llorens, J. A.; De Jaime, M. A. C y Llopis, R. (1989). La función del lenguaje en un enfoque constructivista del aprendizaje de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 7(2), 111-119.
- Luffiego. M.. Bastida. M.F., Ramos. F. v Soto. J. (1994). Systemic model of conceptual evolution. *International Journal of Science Education*, 16(3). pp. 305-313.
- Lynn Taylor, K. y Rege Colet, N. (2010). Making the shift from faculty development to educational development. A conceptual framework grounded in practice. En Saroyan, A. & Frenay, M. (Eds.), *Building, Teaching capacities in Higher Education: A comprehensive International Model*, 139-167. Stylus: Sterling VA.
- Maiztegui, A.; González, E.; Tricárico, H.; Salinas, J.; Pessoa De Carvalho, A. y Gil-Pérez, D. (2000). La formación de los profesores de ciencias en Argentina, un planteamiento necesario. *Revista de Enseñanza de la Física*, 13(2), 49-62.
- Marchisio, S.; Concari, S.; López, C.; Giuliano, M.; Meza, S.; Lucero, I.; Fogliatti, P.; Catalán, L. y Giacosa, N. (2006). Los docentes de Física en la Educación Polimodal. Un estudio exploratorio en cinco jurisdicciones de Argentina. *Memorias del 8° Simposio de Investigación en Educación en Física*, Gualeguaychú, Entre Ríos, 256-265.
- Marco, B. (2000). La alfabetización científica. En Perales, F. y Cañal, P. (Eds.), *Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 141-164. Marfil: Alcoy.

- Martín Díaz, M. J. y Bacas, P. (1996). El currículum actual en ciencias y la incorporación de nuevos temas. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 10, 11-28.
- Martinand, J. L. (1986). Enseñanza y aprendizaje de la modelización. *Enseñanza de las Ciencias*, 4(1), 45-50.
- Mc. Dermott, L. (1990). A perspective on teacher preparation in physics and other sciences: The need for special science courses for teachers. *American Journal in Physics*, 58(8), 734-742.
- Mellado, V. (2001). ¿Por qué a los profesores de ciencia nos cuesta tanto cambiar nuestras concepciones y modelos didácticos? *Alambique*, 40, 17-30.
- Mellado, V. (2003). Cambio didáctico del profesorado de ciencias experimentales y filosofía de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 21 (3), 343-358.
- Michellini, M.; Santi, L., Stefanel, A. (2013). La formación docente: un reto para la investigación. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 10, 846-870.
- Miyaque, N. (2008). Conceptual change through collaboration. En Vosniadou, S. (Ed.), *International handbook of research on conceptual change*, Capítulo 17, 453-478 . Routledge: Londres.
- Moreira, M. A. (1995). Cerrando brechas en educación en la física. *Revista de Enseñanza de la Física*, 8(1), 57-65.
- Moreira, Marco A, (2002) A teoria dos campos conceituais de vergnaud, o ensino de ciências e a pesquisa nesta área, *Investigações em ensinode ciências* Vol. 7, N. 1.
- Moreira, M. A y Greca, I. (2004). Obstáculos representacionales mentales en el aprendizaje de conceptos cuánticos. En Moreira, M. A. (Ed.), *Sobre el cambio conceptual, obstáculos representacionales, modelos mentales, esquemas de asimilación y campos conceptuales*, 26-40. Instituto de Física, UFRGS: Porto Alegre.
- Munby, H. y Rusell, T. (1998). Epistemology and context in research on learning to teach science. En Fraser, B. J. y Tobin, K. (Eds.), *International Handbook of Science Education*, 11, 530-540.
- National Research Council. (1996). National Science Education Standards. National Academy Press Washington D.C. En Gil, D.; Macedo, B.; Martínez Torregrosa, J.; Sifredo, C.; Valdés, P. y Vilches, A. (Eds.). (2005). *Cómo promover el interés por la cultura científica? Una propuesta didáctica fundamentada para la educación científica de jóvenes de 15 a 18 años. Capítulo 1* . Oficina Regional de Educación para América Latina y el Caribe OREALC/UNESCO: Santiago de Chile. En: http://www.unesco.cl/medios/biblioteca/documentos/como_promover_interes_cultura_cientifica.pdf
- Navarro, J. y Solbes, J. (1989). En torno a los orbitales atómicos. *Enseñanza de las Ciencias*, 7(3), 304-306.
- Neressian, N. J. (1992a). Constructing and Instructing: The role of “Abstraction Techniques” in creating and learning Physics. En Duschl R. & Hamilton R. (Eds.), *Philoso-*

phy of Science Cognitive Psychology, and Educational Theory and Practice. Cap. 2, 48-67.

- Neressian, N. J. (1992b). How do scientifics think. Capturing the dynamics of conceptual change in science. En Giere, R. N. (Ed.), *Cognitive models of sciences*, 3-45. University of Minnesota Press: Minneapolis.
- Neressian, N. J. (2008). Mental modeling in conceptual change. En Vosniadou, S. (Ed.), *International handbook of research on conceptual change*. Capítulo 15, 391-416. Routledge: Londres.
- Niedderer, H. y Goldberg, F. (1995). Learning pathway and knowledge construction in electric circuits. Paper presented at the First European Conference on Research in Science Education, Leeds, UK.
- Nussbaum. J (1989). Classroom conceptual change: philosophical perspectives, *International Journal of Science Education*, 11, pp. 530-540.
- Oliva Martínez, J. M. (1999). Algunas reflexiones sobre las concepciones alternativas y el cambio conceptual. *Enseñanza de las Ciencias*, 17 (1), 93-107.
- Oñorbe, A. (1996). Avance de la ciencia en el curriculum. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 10, 7-9.
- Otero, M. R.; Fanaro, M.A . y Arlego, M. (2009). Investigación y desarrollo de propuestas didácticas para la enseñanza de la Física en la Escuela Secundaria: Nociones Cuánticas. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, 4(1).
- Perales J y Cañal P. (Eds.). (2000). *Didáctica de las Ciencias: Teoría y Práctica de la Enseñanza de las Ciencias*. (Alcoy: Marfil).
- Pereira de Pereira, A.; Cavalcanti C. y Ostermann F. (2009). Concepções relativas à dualidade ondapartícula: uma investigação na formação de professores de Física. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 8(1), 72-85.
- Pérez, C. (2001). *Técnicas Estadísticas con SPSS*. Prentice Hall. Pearson Educación: Madrid.
- Petri, J. y Niedderer, H. (1998). A learning pathway in high school level quantum atomic physics. *International Journal of Science Education*, 20 (9), 1075-1088.
- Piaget, J. (1969). *Psicología y Pedagogía*. Ariel: Barcelona.
- Pinker, S. (2000). *Cómo funciona la mente*. Destino: Barcelona.
- Pinto, R Alibeiras, J. y Gómez, R. (1996). Tres enfoques sobre la investigación en concepciones alternativas. *Enseñanza de las Ciencias*, 14(2), pp. 221-232.
- Pintrich, P. R., Marx, R. W. and Boyle, R. A. (1993) Beyond cold conceptual change: The role of motivational beliefs and classroom contextual factors in the process of conceptual change. *Review of Educational Research*, 63, 167-199.
- Porlán, R. (1998). Pasado, presente y futuro de la didáctica de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 16 (1), 175-185.

- Porlán, R. y Martín del Pozo, R. (2004). The conceptions of in-service and prospective primary school teachers about the teaching and learning of science. *Journal of Science Teacher Education* 15, 39-62.
- Porlán, R.; Azcárate, P.; Martín del Pozo, R.; Martín Toscazo, J. y Rivero, A. (1996). Conocimiento profesional deseable y profesores innovadores: Fundamentos y principios formativos. *Investigación en la Escuela*, 29, 23-28.
- Porlán, R.; Rivero, A. y Martín del Pozo, R. (1997) Conocimiento profesional y epistemología de los profesores I: teoría, métodos e instrumentos. *Enseñanza de las Ciencias*, 15(2), 155-173.
- Porlán, R.; Martín del Pozo, R.; Rivero, A.; Harres, J.; Azcárate, P. y Pizzato, M. (2010). El cambio del profesorado de ciencias I. Marco teórico y formativo. *Revista de Enseñanza de las Ciencias*, 28(1), 31-44.
- Posner, G., Strike, K.; Hewson, P. y Gertzog, W. (1982). Accomodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211-227.
- Pozo, J. I.; Pérez, M. P.; Sanz, A. y Limón, M. (1992). Las ideas de los alumnos sobre la ciencia como teorías implícitas. *Infancia y Aprendizaje*, 57, pp. 3-22.
- Pozo, J. I., Sanz, A. y Gómez Crespo, M. A. (1995). Cambio conceptual: del conocimiento personal al conocimiento científico, en *Aspectos didácticos de física y química (física)*. Instituto de Ciencias de la Educación. Universidad de Zaragoza.
- Prebble, T.; Hargraves, H.; Leach, L.; Naidoo, K.; Suddbay, G. & Zepke, N. (2004). Impact of student support services and academic development programmes on student outcomes in undergraduate tertiary education: A synthesis of the research. Ministry of Education: Wellington.
- Proyecto de mejora para la formación inicial de profesores para el nivel secundario. Secretaría de Políticas Universitarias. Ministerio de Educación. Presidencia de la Nación. en: <http://repositorio.educacion.gov.ar:8080/dspace/handle/123456789/89786>.
- Resolución C.E. N° 787/12 Lineamientos Generales de la Formación Docente Comunes a los Profesorados Universitarios. Consejo Interuniversitario Nacional, en exactas.uba.ar/download.php?id=2594
- Resolución CFE N°23/07. Plan Nacional de Formación Docente 2007. Instituto Nacional de Formación Docente. Ministerio de Educación. Presidencia de la Nación. Anexo I. en: <http://www.me.gov.ar/consejo/resoluciones/res07/23-07-anexo01.pdf>
- Resolución N°.30/93 C.F.C.y E. Ministerio de Cultura y Educación, Consejo Federal de Cultura y Educación Secretaría General, Buenos Aires, 08 de Setiembre de 1993, disponible en: <http://www.me.gov.ar/consejo/resoluciones/res93/30-93.pdf>
- Rocard, M.; Csermely, P.; Jorde, D.; Lenzen, D.; Walweg Henriksson, H. y Hemmo, V. (2008). *Science Education Now: A renewed Pedagogy for the future of Europe* (Informe Rocard). En: http://www.oei.es/salactsi/Informe_Rocard.pdf, consultado en octubre de 2013.

- Rodrigo, M. J.; Rodríguez, A. y Marrero, J. (1993). *Las teorías implícitas. Una aproximación al conocimiento cotidiano*. Visor: Madrid.
- Rogoff, B. (1990). *Apprenticeship in thinking: Cognitive development in social context*. Oxford University Press: New York.
- Saltiel, E. y Viennot, L. (1985). ¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes? *Enseñanza de las Ciencias*, 3(2), pp. 137-144.
- Schön, D. A. (1992). *La formación de profesionales reflexivos*. Paidós: Madrid.
- Scott, P. (1991). Conceptual pathways in learning science: A case study of the development of one student's ideas relating to the structure of matter, in Duit, R., Goldberg, F., Niedderer, H. (Eds.) *Research in Physics Learning: Theoretical issues and empirical studies*, University of Kiel, Germany.
- Senge, P. (1996). *La quinta disciplina. El arte y la práctica de la organización abierta al aprendizaje*. Granica: Barcelona.
- Sfard, A. (1998). On two metaphors for learning and on the dangers of choosing just one. *Educational Researcher*, 27(2), 4-13.
- Shamos, M. (1995). *The Myth of Scientific Literacy*. Rutgers University Press: New Brunswick N. J.
- Shipstone, D. (1988). Pupils' understanding of simple electrical circuits: Some implications for instruction. *European Journal of Science Education*, 6(2), 185-198.
- Shulman, L. S. (1986). Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, 15 (2), 4-14.
- Shulman, L. S. (1999). Foreword in Guess-Newsome, J. y Lederman, N. G. (Eds.), *Examining Pedagogical content Knowledge: The construct and its implications for science education*, ix-xii. Kluger: Boston.
- Silvestre, V.; Solbes, J. y Furió, C. (2010). *Models atòmics i enllaç químic en l'ensenyament secundari*. Publicacions de la Universitat de València.
- Sinatra G. M. y Pintrich, P. R. (Eds.). (2003). *Intentional conceptual change*. Erlbaum: Mahwah N. J.
- Smiths, J.; diSessa, A. y Rochele, J. (1993). Misconceptions reconceived: A constructivist analysis of knowledge in transition. *The Journal of the Learning Sciences*, 3, 115-163.
- Solbes, J. (1986). *La introducción de los conceptos básicos de Física Moderna*. Tesis doctoral. Universitat de València.
- Solbes, J. (1996). *La Física Moderna y su Enseñanza*. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 10, 59-67.

- Solbes, J. (2009a). Dificultades de aprendizaje y cambio conceptual, procedimental y axiológico (I): resumen del camino avanzado. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 6(1), 2-20.
- Solbes, J. (2009b) Dificultades de aprendizaje y cambio conceptual, procedimental y axiológico (II): nuevas perspectivas. *Rev. Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 6(2), 190-212.
- Solbes, J. y Sinarcas, V. (2009). Utilizando la historia de la ciencia en la enseñanza de los conceptos claves de la física cuántica. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*. 23, 123-151.
- Solbes, J. y Sinarcas, V. (2010). Una propuesta para la enseñanza aprendizaje de la física cuántica basada en la investigación en didáctica de las ciencias. *Revista de enseñanza de la física*, 23 (1 y 2), 57-85.
- Solbes, J. y Traver, M. (1996). La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química, *Enseñanza de las Ciencias*, 14 (1), 103-112.
- Solbes, J. y Traver, M. (2003). Against a negative image of science: history of science in the physics & chemistry education, *Science & Education*, 12, 703-717.
- Solbes, J. y Traver, M. (2011). La Historia de la Física en la enseñanza de la Física en el Bachillerato. pp 35-53. En A. Caamaño (Ed.). *Física y Química. Complementos de formación disciplinar*. Grao: Barcelona.
- Solbes, J. y Vilches, A (1989). Interacciones ciencia técnica sociedad: un instrumento de cambio actitudinal. *Enseñanza de las Ciencias*, 7(1), 14-20.
- Solbes, J. y Vilches, A. (1997). STS Interactions and the teaching of Physics and Chemistry. *Science Education*, 81, 377-386.
- Solbes, J.; Bernabeu, J.; Navarro, J. y Vento, V. (1988). Dificultades en la enseñanza /aprendizaje de la física cuántica, *Revista Española de Física*, 2(1), 22-27.
- Solbes, J.; Calatayud, M.L.; Climent, J.B. y Navarro, J. (1987). Errores conceptuales en los modelos atómicos cuánticos, *Enseñanza de las Ciencias*, 5(3), 189-195.
- Solbes, J.; Domínguez-Sales, M. C.; Fernández-Sánchez, J; Furió, C.; Cantó, J. R.; Guisasaola, J. (2013 a y b). ¿El profesorado de física y química incorpora los resultados de la investigación en didáctica? *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 27, 155-178.
- Solbes, J.; Furió, C. y González, E. (2011). La formación inicial del profesorado de ciencias a debate ¿Qué finalidades y estrategias? *II Congreso Internacional de Docencia Universitaria*, organizado por la Universidad de Vigo, realizado en Vigo a partir del 30 de junio.
- Solbes, J.; Furió, C., Domínguez, M^a. C.; Fernández, J., Tarín, F.; Guisasaola, J. (2012). What factors have an influence on a quality teaching practice in Sciences? *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 46, 4513 – 4517.

- Solbes, J.; García E.; Alcalde, A. M. y Martínez, J. A. (1992). *Recursos y elementos de actualización científica del Curso de Actualización científica y didáctica*. Ministerio de Educación y Ciencia: Madrid.
- Solbes, J.; Silvestre, V. y Furió, C. (2010). El desarrollo histórico de los modelos de átomo y enlace químico y sus implicaciones didácticas. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*. 24, 83-105.
- Solís, R.,E.; Martín del Pozo, R; Rivero G., A. y Porlán A. R. (2013). Expectativas y concepciones de los estudiantes del MAES en la especialidad de Ciencias. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 10 (núm. extraordinario), 496-513.
- Steinberg, M. and Clement, J. (1997). Case Study of Model Evolution in Electricity: Learning from Both Observations and Analogies. En Volume 2 serie *Models and Modeling in Science Education* pp 103-116
- Steinert, Y.; Mann, K.; Centeno, A.; Dolmans, D.; Spenser, J.; Gelula, M. y Prideaux, D. (2006). A systematic review of faculty development initiatives designed to improve teaching effectiveness in medical education: BEME Guide No.8. *Medical Teacher*, 28 (6), 497-526.
- Strike, K. A. y Posner, G. J. (1985). A conceptual change view of learning and understanding. In L. West & L. Pines (Eds), *Cognitive structure and conceptual change* (pp. 259-266). Orlando. FL.: Academic Press.
- Strike, K. A., y Posner, G. J. (1992) A revisionist theory of conceptual change. In R. A. Duschl & R. J. Hamilton (Eds.), *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice* (pp. 147-176). New York: State University of New York Press.
- Stes, A.; Clement, J. y Van Petegem, P. (2011). The effectiveness of faculty training programme: long-term and institutional impact. *International Journal for Academic Development*, 12 (2), 99-109.
- Taylor, E. (2000). *Desmityfing QM Quantum Mechanics Workbook*. Department of Physics. Massachusetts Institute of Technology [En línea] Disponible en: <http://www.eftaylor.com/software/FrontMatter.pdf>
- Taylor, J. R. y Zafiratos, C. D. (1992). *Modern Physics for Scientists And Engineers*. Prentice-Hall: USA.
- Taylor, J. R.; Zafiratos, C.D.; Dubson, M. A.; Zafiratos, C. D. y Dubson, M. A. (2003). *Modern Physics for Scientists And Engineers*. Benjamin-Cummings Pub Co: Massachusetts, USA.
- Taylor, K. L. y Rege-Colet, N. (2010). Making the shift from faculty development to educational development: A conceptual framework grounded in practice. In Saroyan, A. y Frenay, M. (Eds.), *Building teaching capacities in higher education : A comprehensive international model*. Stylus: Sterling, VA .
- Thagard, P. (1988). *Computational Philosophies of science*. A Bradford Book. MIT Press: Cambridge MA.

- Thagard, P. (1992). *Conceptual revolutions*. Princeton University Press: Princeton N. J.
- Thagard, P. (2008). Conceptual change in the history of science. Life, mind and disease. En Vosniadou, S. (Ed.), *International handbook of research on conceptual change*, Capítulo 14, 374-390. Routledge: Londres.
- Tipler, P. A. (2000). *Física para la Ciencia y la Tecnología*, 507. Reverté: Barcelona.
- Tipler, P.A. (1980). *Física Moderna*. Reverté: Barcelona.
- Toulmin, S. (1972) *Human Understanding*. Vol. I. Oxford: Oxford University Press.
- Valbuena Ussa, E. (2007). El conocimiento didáctico del contenido biológico: estudio de las concepciones disciplinares y didácticas de futuros docentes de la UPN (Colombia). Tesis Doctoral.
- Van Driel, J. H. (2001). Professional development and reform in science education: the role of teachers' practical knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, 38(2), 137-158.
- Vosniadou, S. (2003). Exploring the relationships between conceptual change and intentional learning. En Sinatra, G. M. y Pintrich, P. R. (Eds.), *Intentional conceptual change*, 377-406. Erlbaum: Mahwah N. J.
- Vosniadou, S. (1994) Capturing and modelling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 45-69.
- Vosniadou, S. (2007). Conceptual change and education. *Human development*, 50(1), 47-54.
- Vosniadou, S. ed. (2008). *International Handbook of Research on Conceptual Change*. Routledge: NY.
- Vosniadou, S. y Ioannides C. (1998) From conceptual development to science education: a psychological point of view, *International Journal of Science Education*, (20),10, 1998
- Vosniadou, S.; Vamvahoussi, X. y Skopelli, I. (2008). La aproximación de las teorías marco al problema del cambio conceptual. En Vosniadou, E. (Ed.), *International handbook of research on conceptual change*, Capítulo 1, 3-34. Routledge: Londres.
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind and society: The development of higher mental process*. Harvard University Press: Cambridge M. A.
- Vygotsky, L. S (1978). *Pensamiento y lenguaje*. Madrid: Paidós
- Wandersee, J., Mintzes, J. J. y Novak, J. D. (1994). Research on Alternative Conceptions in Science. En D.L. Gabel (ed.), *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*, pp. 177-210. New York: Macmillan Publishing Company.
- Winter, G. (2000) A comparative discussion of the notion of 'validity' in qualitative and quantitative research. *The Qualitative Report*, 4 (3-4), Sexta Ed., Taylor & Francis: NY.
- Wiser, M. y Smith, C. (2008). Learning and teaching about matter in grades K-8: When should the atomic-molecular theory be introduced? En Vosniadou, S. (Ed.) *Interna-*

tional handbook of research on conceptual change, Capítulo 9, 205-238. Routledge: Londres.

Zembylas M (2005). Discursive practices, genealogies, and emotional rules: A poststructuralist view on emotion and identity in teaching. *Teaching and Teacher Education*, 21(8):935-948