

## Tesis de Doctorado

Autora:

*María de los Ángeles  
Fanaro*

Director:

*Dr. Marco Antonio  
Moreira*

Co-Directora:

*Dra. María Rita Otero*

Lugar:

*Universidad de Burgos.  
España*

Programa:

*Doctorado Internacional en Enseñanza de  
las Ciencias.*

Fecha de defensa:

23 de julio de 2009

## La Enseñanza de la Mecánica Cuántica en la Escuela Media

Esta Tesis aborda el problema de la enseñanza de conceptos fundamentales de Mecánica Cuántica en la escuela media. La investigación se planteó en tres etapas. Como uno de los objetivos de la tesis era estudiar las transformaciones del saber para volverlo enseñable, en la primera etapa se comenzó por la reconstrucción del saber desde el punto de vista de la investigadora. Así se originó una Estructura Conceptual de Referencia (ECR) basada en el enfoque de la Mecánica Cuántica de Feynman “Integral de Camino” o “Caminos Múltiples”. En la Física, se reconoce este enfoque como alternativo y complementario al enfoque canónico. Su potencial para adoptarlo en la enseñanza reside en que permite prescindir del desarrollo estrictamente histórico y tradicional, que se adopta usualmente en la enseñanza, que no permite que los estudiantes comprendan los aspectos fundamentales de la Mecánica Cuántica. En esta propuesta se parte de la Física Clásica -con conceptos familiares para los estudiantes, como funciones de posición vs. tiempo- y se analiza y fundamenta la transición entre la Mecánica Cuántica y la Clásica. Se trata de enseñar el concepto de sistema cuántico y los Principios de Superposición y de Correspondencia.

Una vez reconstruida la ECR se realizó un análisis didáctico para anticipar la mayor cantidad de posibles acciones de los estudiantes y del profesor, considerando aspectos cognitivos y afectivos. Esta segunda fase de la investigación, dedicado a la elaboración de una *Estructura Conceptual Propuesta para Enseñar*. Los lineamientos didácticos adoptados en este diseño y análisis previo, son los propuestos por Otero (2006; 2007), que integra la Teoría de los Campos Conceptuales (Vergnaud, 1990), la Teoría del Aprendizaje Significativo (Ausubel, 1963, 1968; Novak, 1982; Gowin, 1981; Novak & Gowin, 1984); la Teoría del Aprendizaje Significativo Crítico (Moreira, 2000) y las ideas sobre emociones, conocimiento y lenguaje de Maturana (1995).

De este proceso de diseño y análisis resultó la secuencia lista para implementar en un curso con estudiantes del último año de la escuela secundaria. Durante el análisis previo a la implementación, se decidieron y anticiparon las *acciones* de los estudiantes y de la profesora, dirigidas a reconstruir conocimiento físico de Mecánica Cuántica. Se diseñó el conjunto de las *situaciones* que permitirían la emergencia y el funcionamiento de los *conceptos clave* junto con las *preguntas clave*. Se plantearon los *principios clave* a reconstruir y consensuar, las *explicaciones* y afirmaciones de conocimiento, los *mecanismos explicativos* y el *lenguaje* en el que serán formuladas las explicaciones y las afirmaciones de conocimiento.

La formulación matemática de la Integral de Camino se adaptó al conocimiento matemático de los estudiantes empleando un marco geométrico-vectorial. La técnica se aplicó para explicar los resultados que se obtienen en la Experiencia de la Doble Rendija (EDR). Esta experiencia se simuló con software disponible, a fin de que los estudiantes controlen los parámetros (ancho y separación de rendijas, tipo de proyectiles, etc.) y accedieran a los resultados obtenidos en relación a distribución en la pantalla colectora y curva de probabilidad. De esta forma, se buscó la emergencia de las ideas de los estudiantes -electrones como “pequeñísimas bolillas”- y se mostró como el concepto de sistema cuántico asociado a la técnica de *Path Integrals* explica la distribución de probabilidad de los electrones, que no puede derivarse desde las ideas clásicas de los estudiantes.

Se seleccionó del caso del electrón libre como un ejemplar que reúne las características de los sistemas cuánticos, y permite aplicar la técnica a la disposición experimental de la EDR, de manera relativamente sencilla. De esta forma, se logró modelizar la curva de probabilidades obtenida en la simulación

de la experiencia utilizando software de Simulación y explicar la forma de la curva. El diseño de la propuesta requirió la generación de situaciones que emplean software de simulación y la generación de dos nuevas simulaciones con *Modelus<sup>TM</sup>*.

En la tercera fase de la investigación, se implementó la secuencia, formada por seis situaciones, en un curso de Física del último año de la escuela media, durante quince encuentros de una hora cada uno, incluyendo la evaluación. En los encuentros se planteó la siguiente forma de trabajo:

El material de estudio impreso se entregaba a los estudiantes clase a clase, para regular apropiadamente la introducción de novedades y problemas. Al finalizar el encuentro áulico los estudiantes entregaban sus formulaciones a la profesora, y a la clase siguiente se realizaba la devolución.

El material impreso consistía en preguntas y problemas, para los cuales los estudiantes debían conversar con los integrantes de su grupo, consensuar y formular respuestas escritas en el lugar destinado para ello en el material. Cuando era necesario, se ocasiones se ofrecían síntesis escritas, para que los estudiantes leyeran y conversaran acerca de ellas.

Los momentos de síntesis y consenso se planteaban con todos los grupos en forma simultánea procurando la formulación por parte de los estudiantes.

Cada una de las clases fue registrada en formato de audio y se recogieron todas las producciones escritas de los estudiantes. En esta fase se analizó la Estructura Conceptual Efectivamente Reconstruida (ECER) por el Grupo de Clase, a partir del estudio de la Conceptualización, y de la descripción de los aspectos afectivos de los estudiantes. La conceptualización se analizó utilizando la Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud (1990), en base a la identificación de teoremas y conceptos en acto utilizados por los estudiantes, intentando establecer cuales fueron los obstáculos que fueron surgiendo al enfrentar las situaciones planteadas. Se concluyó que los obstáculos son superables, la secuencia es viable y adaptable en el último año de la enseñanza media.

Por otro lado, se analizaron los aspectos afectivos, obteniéndose como resultado que los estudiantes aceptaron la forma de trabajo propuesta, que era muy distinta a la habitual. Los estudiantes aceptaron las situaciones sin sentirse superados por ellas, enfrentaron los desafíos y fueron capaces de realizar el esfuerzo cognitivo y afectivo necesario. Un grupo amplio de estudiantes aceptó las explicaciones relativas al electrón como sistema cuántico, y los principios de superposición y de correspondencia entre la Mecánica Cuántica y la Mecánica Clásica.

Se reconoce la necesidad de avanzar en el estado del conocimiento actual acerca del tratamiento escolar de aspectos cuánticos que complementan los tratados en esta Tesis, como la cuantización de energía y el comportamiento de los fotones. Finalmente, se realizan algunas consideraciones acerca del tratamiento escolar de la mecánica clásica, que podría modificarse para colaborar con la introducción de conceptos cuánticos hacia el final de la escolaridad.