

Investigación y desarrollo de propuestas didácticas para la enseñanza de la Física en la Escuela Secundaria: Nociones Cuánticas

María Rita Otero^{1,2}, María de los Ángeles Fanaro^{1,2}, Marcelo Arlego^{2,3}

rotero@exa.unicen.edu.ar, mfanaro@exa.unicen.edu.ar, arlego@fisica.unlp.edu.ar

1 NIECyT- Facultad de Ciencias Exactas -UNCPBA - Argentina

2 CONICET - Argentina

3 Instituto de Física La Plata (IFLP)- UNLP – Argentina

Resumen

En este trabajo se describe el proceso de desarrollo de una secuencia didáctica para enseñar conceptos fundamentales de Mecánica Cuántica en la Secundaria. Fundamentalmente se describe el referencial didáctico que se asume. Se definen las distintas estructuras conceptuales que es necesario reconstruir para abordar el problema de cómo enseñar nociones cuánticas partiendo de la situación del alumno, respetando su lugar e invitándolo a que asuma su responsabilidad, es decir, generando una dinámica emocional de aceptación. Se describe la Estructura Conceptual de Referencia que es definida por el investigador. El analiza las relaciones conceptuales que viven en la Comunidad Científica que genera el conocimiento y que tomará como referencia, y a la vez, la comunidad en la que ese saber va a ser reconstruido y las transformaciones que serán necesarias para enseñarlo. Se describe brevemente la Estructura Conceptual propuesta para enseñar y se discuten de manera general algunos resultados obtenidos en la implementación escolar de la ECPE con relación a la conceptualización y a la viabilidad de la secuencia.

Palabras clave: Didáctica de la Física, Conceptos Cuánticos, Escuela Secundaria.

Abstract

This paper describes the process of development of a didactical sequence to teach basic concepts of quantum mechanics in secondary school. Basically, the didactical framework adopted is described. The different conceptual structures that have to be developed to approach the problem of how to teach basic concepts of quantum mechanics starting from the student's knowledge, respecting the student's place (freedom) and inviting him to take his own responsibility, this implies creating an emotional dynamic of acceptance into the classroom. The Conceptual Structure of Reference that must be defined by the researcher is described. The researcher analyzes the conceptual relationships existing in the scientific community where knowledge is generated and that he will adopt as his frame of reference, also, he must take into account the community where that knowledge will be reconstructed and the knowledge transformations that will be necessary for teaching. Briefly, the Conceptual Structure Proposed to Teach is described and some results obtained during the scholar implementation of the CSPT, related to the conceptualization and viability of the sequence, are discussed in general.

Keywords: Physics Didactic, Basic Quantum concepts, Secondary School

1. INTRODUCCIÓN

Las investigaciones internacionales acerca de la enseñanza de la Física (Cuppari, Rinaudo, Robutti, y Violino, 1997; Fischler y Lichtfeldt, 1992; González, Fernández, y Solbes, 2000; Greca, Moreira y Herscovitz, 2001; Hanc y Tuleja, 2005; Jorge Cabral de Paulo y Moreira, 2004; Montenegro y Pessoa, 2002; Moreira y Greca, 2000; Müller y Wiesner, 2002; Niedderer, 1997; Olsen, 2002; Osterman y Moreira, 2000; Ostermann y Ricci, 2004; Osterman, F; Prado, S y Ricci, T. 2006; Pessoa, 1997; Pinto y Zanetic, 1999; Taylor,

Vokos, O'Mearac y Thornberd, 1998; Taylor, 2003; Zollman, 1999) y los programas curriculares de muchos países, proponen el tratamiento escolar de los conceptos fundamentales de la teoría cuántica (Lobato y Greca, 2005).

En nuestro país, las recomendaciones curriculares para la asignatura Física emanadas desde donde se "piensa el funcionamiento didáctico"¹ proponen entre otros objetivos,

¹ Chevallard (1990) ha creado la noción de *noosfera* para definir este lugar desde donde se piensa el funcionamiento del sistema de enseñanza.

la comprensión y descripción de los conceptos fundamentales de Física Moderna y Contemporánea, sin embargo, esto no se produce en la escuela secundaria. Este hecho puede relacionarse con ciertas condiciones que deberían darse para que un saber sea ecológicamente viable en una institución. Además, es preciso insistir en que tanto en la escuela media como en la universidad, ha venido produciéndose un proceso de olvido de las preguntas que dan origen y sentido a un saber, reduciendo la enseñanza a las respuestas. Regresar a las preguntas, es un punto fundamental a modificar si se pretende enseñar cualquier saber, en este caso Física. Para que una pregunta, o un conjunto de preguntas de Física puedan estudiarse con “sentido” en una determinada Institución, por ejemplo en la Escuela media, es necesario satisfacer ciertos postulados (Bosch, García, Gascón, Ruiz Higuera; 2006)

- Provenza de *cuestiones* que la Sociedad propone para que se estudien en la Institución (*legitimidad cultural o social*).

La Mecánica Cuántica (MC) aparece como conocimiento socialmente valioso en la actualidad, buena parte de la tecnología actual se basa directa o indirectamente en ella. Se encuentra en la base de la electrónica basada en semiconductores, el láser y la tecnología nuclear y además, juega un rol central en el desarrollo de tecnologías actuales y futuras como la nanotecnología y computación cuántica.

- Aparezca en ciertas *situaciones* “umbilicales” de la Física situadas en la *raíz central* de la Física (*legitimidad Física*).

La Mecánica Cuántica es hoy la teoría que explica el comportamiento de la materia tanto a escala atómica como macroscópica, convergiendo con la física clásica en los casos límite, resolviendo problemas anómalos –irresolubles desde la clásica- y prediciendo nuevos fenómenos. La formulación probabilística y la noción de indeterminación, expresan el abandono del carácter determinístico de la física clásica por una teoría que provee solo la probabilidad de un evento dado, considerando ciertos estados inicial y final e introduce limitaciones fundamentales acerca de la precisión con que pueden medirse ciertas magnitudes en un sistema cuántico. En la teoría clásica la indeterminación aparece ligada a cuestiones de naturaleza práctica mientras en cuántica la indeterminación es teórica y fundamental. Sin la Mecánica Cuántica no es posible comprender las propiedades de los metales, o de un cristal líquido, por ejemplo. La Mecánica Cuántica, junto con la teoría de la relatividad, provee el marco adecuado para describir las interacciones fundamentales a nivel sub-nuclear y a energías arbitrarias a través del modelo estándar. Incluso teorías aún especulativas acerca de la unificación de todas las interacciones (incluida la gravedad), como lo es la teoría de cuerdas, no contradicen los principios de la Mecánica Cuántica.

- *Conduzca a alguna parte*, esto es, que esté relacionada con otras preguntas que se estudian en la Institución, sean Físicas o relativas a otras disciplinas (*legitimidad funcional*).

La conceptualización de un sistema cuántico requiere ingresar en un nuevo dominio explicativo y aceptar categorías que desafían a las originadas en la experiencia macroscópica. Desde nuestro punto de vista, la enseñanza de la MC no encuentra “sentido” en la escuela media, y en consecuencia predominantemente no se enseña. 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, que no satisface los dos últimos postulados mencionados antes.

La estructura tradicional es estrictamente histórica y puede encontrarse más o menos presente, en buena parte de los textos y planes de estudio de la llamada “física moderna”. De esta forma, se recorren 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

Así, los textos “derivan” de la presentación del problema anómalo para la mecánica clásica de la radiación de cuerpo negro, abordado por Planck, la expresión $E = h \cdot \nu$ para la cuantización de la energía, produciendo una pérdida de “sentido” de la constante de Planck. Presentando el problema anómalo del efecto fotoeléctrico, abordado y explicado por Einstein; se introduce el llamado “comportamiento corpuscular de la luz”, a partir del “*ábrete sésamo*” de la noción de fotón, a la vez que se reafirma la expresión $E = h \cdot \nu$ como expresión de la energía de los fotones incidentes en el cátodo; y considerando el problema del tamaño de los átomos, se propone el modelo de Bohr para el átomo, enfatizando la cuantización de los niveles de energía del átomo de hidrógeno y en ciertos casos, suele introducirse la cuantización del momento angular para deducir el primer radio de Bohr.

Es importante reflexionar acerca de que este recorrido, más que introducir nociones genuinamente cuánticas, muestra la insuficiencia de la teoría clásica para dar cuenta de estas “anomalías”; las hipótesis “ad hoc” que formularon estos físicos geniales para buscar explicaciones dentro de mecánica clásica y ante lo imposible, más allá de ella, y las fascinantes características del proceso de generación del conocimiento, apreciables por quienes disponen de los subsumidores adecuados, lo cual no suele ser el caso de los estudiantes. 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, ora en los cursos de química, ora en los de fisicoquímica, convirtiéndose en un nuevo “*ábrete sésamo*” a los llamados números cuánticos combinados con el principio de exclusión de Pauli.

Otro aspecto destacable es que en la textualización para el nivel secundario o en los textos para los cursos universitarios introductorios –exceptuando el de Feynman–, el comportamiento cuántico de los electrones, se trata

siempre después de la introducción de la noción de fotón. Son muy pocos los textos para secundaria que abordan la idea de una “longitud de onda asociada” a toda la materia y el papel fundamental de la constante de Planck relativo al límite clásico-cuántico.

En consecuencia, si se pretende enseñar aspectos fundamentales de (MC) a estudiantes de secundaria, respetando sus posibilidades reales de acceso al conocimiento y aceptando su punto de partida, la reconstrucción del saber antes mencionada reduce la legitimidad funcional y conceptual de las preguntas que puedan formularse. Pues las soluciones propuestas por Planck, Einstein, Bohr y de Broglie, se realizaron en medio de su propia perplejidad y reflexión frente a las consecuencias y los límites de la teoría confirmada hasta ese momento. Cuando Planck postuló la cuantización de la energía radiada, no pensaba que había abierto las puertas de una nueva física, él solo atribuyó a los cuantos el carácter de artilugio matemático, sin significación física genuina, y abrigó la esperanza de que estaba frente a un enigma – resoluble dentro de la física clásica- y no frente a una anomalía.

2. Investigaciones Previas acerca de la Enseñanza de MC en la Secundaria

En la tesis de Fanaro (2009) relativa a la Enseñanza de la Mecánica Cuántica en la Escuela Media, se consideran las excelentes revisiones realizadas por Greca y Moreira (2001) acerca de la enseñanza de la Física Cuántica en general y por Osterman y Moreira (2000), además de Pereira (2008) cuya revisión se refiere a la enseñanza de la Física Moderna y Contemporánea (FMC).

En el caso de las críticas a los cursos y las propuestas implementadas se mencionan la importancia de evitar expresiones como “*doble naturaleza*” de los sistemas cuánticos y abandonar la terminología “*onda-partícula*” pues esto conduciría a que “*los estudiantes se confundan al intentar aunar ambos conceptos*” (Fischler y Lichtfeldt, 1992), en lugar de conceptualizar que son sistemas cuánticos con características propias”. Strnad (1981) destaca la necesidad de evitar frases confusas como “*los electrones se comportan como ondas*”. Se critican la forma axiomática (Kragh, 1992) y la presentación cuasi-histórica (Greca, 2003: 33) de los contenidos de Mecánica Cuántica. Se comienza “*por la vieja teoría cuántica, y algunos de los experimentos reveladores de la estructura cuántica de los sistemas microscópicos, en los cuales se hace uso (y abuso) de analogías y modelos clásicos*” (Greca, 2004). Se trata al inicio el problema de la radiación de cuerpo negro, pasando luego por los primeros modelos atómicos hasta el átomo de Bohr, y se presenta la ecuación de onda de Schrödinger, lo cual según Greca (2004) produce resultados insatisfactorios. Por otro lado, en los cursos introductorios solo se proponen algunas fórmulas aisladas, como la fórmula de Planck para la energía de los fotones, y la ecuación de Schrödinger.

Como hemos insistido desde el inicio, una de las mayores pérdidas de sentido que se producen se relacionan con que “*la constante de Planck se reduce a un factor de proporcionalidad en una fórmula que liga la energía con la frecuencia. No se analizan ni la magnitud de la constante, ni las consecuencias que tiene para los conceptos en los*

cuales está relacionada” (Fanaro, 2009). Usualmente dichas propuestas otorgan un papel exclusivo a la ecuación de Schrödinger y a sus soluciones, “*oscureciendo la física con el álgebra, dejando a los estudiantes la impresión que la Mecánica Cuántica se logra comprender más a medida que más se dominan las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales*” (Dowrick, 1997).

En 1996 en Estados Unidos Edwin F. Taylor (MIT, Massachusetts, US) elaboró el curso “Desmitificando la Mecánica Cuántica”, basado en el conocido libro de Richard Feynman “*QED: The Strange theory of light and matter*”. Este conocido texto fue publicado hacia finales de la década de 1970 y estaba dirigido a un público no especializado en el tema. En él se expone su método *Paths Integrals* (Integral de camino) en un lenguaje no técnico y accesible. El curso de Taylor (2003) se basa en la modelización en computadora y software realizado en una plataforma independiente de lenguaje cT. Según Hanc y Tuleja (2005, p.4), “*aunque este software tiene un gran valor pedagógico, hoy día resulta rudimentario y no permite un control confortable para el usuario; además su lenguaje no es muy bien soportado*”.

En el Reino Unido, John Ogborn (2003) (Institute of Education, University of London, UK), propuso en el proyecto “Advancing Physics” un nuevo curriculum de Física para los dos últimos años de la escuela secundaria con tópicos de física actual. El curso adopta el libro de Feynman y partes del curso de Taylor. La propuesta *Advancing Physics* utiliza el software Modellus de Vitor Teodoro-Duarte de la Nueva Universidad de Lisboa en Portugal² como parte de la modelización involucrada. También en USA, Dan F. Styer (Oberlin College, Ohio) (1985) desarrolló un curso basado en la formulación de Feynman que comienza con sistemas cuánticos simples, pero a diferencia del curso de Taylor, no considera la evolución de la función de onda en el tiempo. Las lecciones del curso están condensadas en su libro “*The Strange World of Quantum*”³. Retomando las ideas de John Ogborn, en Eslovaquia, Hanc y Tuleja desde el año 2001 han desarrollado y testeando materiales para enseñar MC exclusivamente con la computadora. Su propuesta se basa en el libro de Feynman y en el curso de Taylor, en una versión más extensa que la de Ogborn, la propuesta agrega el estudio en el nivel universitario. La organización de contenidos puede encontrarse en Hanc y Tuleja (2005, p.7), y ellos expresan que su aproximación “*entusiasma a los estudiantes y logran una comprensión más conceptual de las ideas cuánticas fundamentales*”, aunque no se explicita el marco teórico utilizado ni como fue testeado el material.

Las propuestas de enseñanza basadas en el enfoque de Feynman recién comentadas, utilizan la técnica de Caminos Múltiples, y se centran en el comportamiento de la luz, comenzando por el comportamiento de los fotones, y con un predominio del uso de herramientas computacionales. En cambio, el trabajo de Fanaro (2009) utiliza la técnica de Caminos Múltiples y un diseño didáctico apropiado que analiza el comportamiento cuántico de los electrones. La

² (<http://phoenix.sce.fct.unl.pt/modellus/>)

³ (<http://www.oberlin.edu/physics/dstyer/StrangeQM/>)

secuencia comienza y termina con la Experiencia de la Doble Rendija, produciendo la emergencia del comportamiento cuántico de la materia, pues la experiencia se realiza con proyectiles cuya masa se va reduciendo sucesivamente hasta llegar a los electrones. Esta secuencia, permite introducir el principio de superposición y de correspondencia, para mostrar que la Mecánica Cuántica predice los mismos resultados que la Mecánica Clásica, si los valores de acción (S) son del orden de la constante de Planck. Es decir, que las nociones cuánticas se introducen a partir del conocimiento previo de ciertas nociones estudiadas previamente en el marco de la Física Clásica, mostrando la correspondencia entre ambas en el límite clásico-cuántico, devolviendo sentido y relevancia a la constante de Planck.

3. Didáctica de la Física

Nuestro trabajo considera a la Didáctica de la Física como “*el estudio del proceso según el cual se reconstruye el conocimiento Físico en un grupo de clase de cualquier institución, con la orientación de uno o más profesores*” Otero (2006; 2007). Se utilizan referencias que permiten entender los procesos de reconstrucción del conocimiento desde una base biológica y emocional (Maturana, 1984, 1990, 1991, 1995, 2001; Damasio, 1994, 2005) y desde una epistemología constructivista (Piaget, 1955; García, 2000; Maturana, 1995). Para describir el aprendizaje de conceptos se aceptan explicaciones y constructos propios de dominios centrados en la esfera de lo mental (Piaget, 1955; Vergnaud, 1990, 1994, 1996, 2005; Ausubel, 1963, 1968; Moreira, 2000, 2005).

En Didáctica de la Física se distinguen fenómenos didácticos y se construye un dominio para analizar, explicar y proponer acciones dirigidas a reconstruir el conocimiento físico que tendrán lugar en un cierto grupo de clase, dentro de una cierta institución. El análisis didáctico de la reconstrucción del saber incluye el de sus condiciones de posibilidad y requiere considerar al menos los siguientes componentes: **alumno, profesor, conocimiento e institución**. Usualmente, profesor y alumnos constituirán el grupo de clase. Parcialmente, el funcionamiento de tal grupo está sujeto a normas externas -institucionales, políticas, etc.- que de hecho, establecen un conjunto de condiciones de contorno para su desarrollo. Aunque se consideran condiciones externas al grupo de clase, la unidad de análisis se enfoca en la dinámica operacional del grupo y de sus miembros en el proceso de estudio, relativa a la construcción del conocimiento Físico. Se enuncia un pequeño conjunto de *Principios Didácticos* que hemos desarrollado más extensamente en otros trabajos (Otero, 2006, 2007)

D.1 Principio de la Institución Educativa como partícipe del sistema de regulación vital y ámbito propicio para el bienestar y la supervivencia

Entendamos que las instituciones educativas son creaciones humanas para extender -al menos como deseo o intención- los mecanismos de regulación vital. Se trataría de mecanismos de regulación no automáticos, que al igual que los automáticos, tendrían que ser funcionales a nuestra supervivencia. En este sentido, la escuela puede ser entendida como una posibilidad de convivir armoniosamente con otros, en adaptación. La institución

escolar tiene que proponerse como un ámbito propicio para nuestro bienestar y supervivencia.

D.2 Principio del Grupo de clase como ámbito de convivencia

Alumnos y profesor o profesores constituyen grupos que interactúan en conversaciones o culturas con relación a un dominio de conocimiento específico. Se aspira a que tales grupos de clase (GC) funcionen como espacios de máxima convivencia, como condición de posibilidad del desarrollo de la identidad de cada uno de sus miembros en armonía y felicidad. Para construir y contribuir a la generación de un espacio de convivencia se requiere estar en *aceptación del otro*.

D.3 Principio de Aceptación del Otro

La constitución de un espacio relacional de convivencia requiere que cada uno de sus miembros acepte *la legitimidad del otro como un legítimo otro en la convivencia* (Maturana, 1995). La aceptación es lo opuesto a la negación del otro, siendo esta dinámica emocional indispensable para reconstruir un dominio de conocimiento, donde se compartirán determinadas acciones aceptadas como válidas. Así todos los miembros del grupo necesitan "verse" mutuamente para que ninguno sea negado. Este principio se relaciona con la actitud de vigilancia para no caer en la tentación de la certidumbre (Otero, 2006). Si observamos cualquier grupo de clase, veremos que muchas de las acciones que se producen se realizan desde el hábito de la certidumbre. La aceptación no es sinónimo de tolerancia, pues esta última se realiza desde la certeza. Se tolera a otro cuando se asume la certeza de que está equivocado absolutamente, mientras nosotros no lo estamos. Esta certidumbre supone una base trascendente que nos permite no asumir la responsabilidad de nuestro desacuerdo con el otro. El esta mal y yo estoy bien, entonces lo tolero, “le permito estar equivocado”. En cambio, si tomamos conciencia de que no tenemos acceso a la verdad ni a la realidad de manera trascendente, el otro es tan legítimo como nosotros y su realidad es tan legítima como la nuestra, aún cuando no me guste o suponga que es peligroso. En ese caso, puedo negarlo, pero asumiré mi responsabilidad, es mi decisión y mi deseo, no es porque pueda establecer o no, que está equivocado.

D.4 Principio de la acción del Profesor

Cuando como profesores concebimos al GC como un espacio de aceptación, nuestra experiencia se reformula. La ciencia que queremos enseñar no trata con la verdad en un sentido trascendente, ni con la realidad de manera directa, adherimos a un criterio de validación acerca de lo que se exige de una explicación científica y a un conjunto de afirmaciones científicas basadas en explicaciones científicas válidas. Tampoco poseemos ninguna certeza, ni somos dueños de ninguna verdad, pero operamos en un espacio de reflexión que nos permite responsabilizarnos por las consecuencias de nuestras acciones. Alumnos y profesores somos componentes esenciales en el grupo de clase. El principio de convivencia y el principio de legitimidad del otro, destacan la importancia de estar en aceptación. Consecuentemente, tendremos que estar atentos a la satisfacción de estos principios. Allí, nuestro "saber" está ligado a la aceptación de los alumnos, si ellos no aceptan

nuestra invitación a ingresar en un nuevo dominio cognoscitivo, nada podremos hacer para enseñarles. Mientras la emoción que especifica las acciones científicas es la curiosidad y la pasión por explicar, la emoción que especifica las acciones del profesor es la pasión por comunicar.

D.5 Principio de la acción del Alumno

También se modifica nuestro entendimiento de los alumnos y de su lugar, de su responsabilidad. A ellos les cabe decidir si aceptan o rechazan la invitación a estudiar Física que se les realiza. Si aceptan, son co-responsables del conocimiento que construyan, junto con el profesor y con los demás miembros del grupo. Los alumnos también se comprometen con la convivencia del grupo de clase, aceptando al otro como legítimo otro en la convivencia. Aceptar la invitación del profesor a ingresar en un mundo de significados compartidos, nuevo para los estudiantes, supone realizar un cierto tipo de acciones, que son constitutivas del dominio cognoscitivo que se va a reconstruir. El grupo de clase va a reconstruir un dominio de conocimiento, en referencia a otro preexistente, pero estos dominios no serán estrictamente los mismos. Las acciones constitutivas del dominio que se va a reconstruir, a partir de las cuales emergerán los conceptos y las afirmaciones de conocimiento aceptadas como válidas -en arreglo a la satisfacción de cierto mecanismo explicativo- no serán estrictamente idénticas a las que operan en el dominio de referencia. Esto no implica que no conserven o no procuren conservar, cierta continuidad epistémica con las explicaciones científicas y los mecanismos para su generación en el dominio de origen. Así, mientras los científicos hacen ciencia movidos por la pasión de explicar, los estudiantes que intentan ingresar a ese mundo de significados compartidos, estarán al menos en principio, movidos por la pasión de comprender.

En una dinámica emocional de aceptación como la que caracteriza al conversar en el GC, las acciones aceptadas como válidas en el dominio de conocimiento que se va a construir son producto del acuerdo, los conceptos emergerán de prácticas compartidas y lo mismo ocurrirá con las afirmaciones de conocimiento. Los alumnos preguntarán, responderán, conversarán, dudarán y expresarán lo que saben y los criterios que se aceptan para especificar que otro sabe. Al igual que el profesor, estarán vigilantes para no caer en la tentación de la certidumbre.

D.6 Principio de la Emoción como base de la Razón

La racionalidad, tiene un fundamento emocional. En general todos los sistemas racionales se basan en la aceptación "a priori" de las premisas que postulan. Es precisamente esta aceptación en la que interviene la emoción. Así, un argumento, una explicación será considerada racional en la medida en que satisface los criterios de racionalidad de quien la acepta. Por esto, rechazamos el dualismo emoción-razón, las emociones son la condición de posibilidad de la razón. Este principio es muy importante para que ofrezcamos una visión de ciencia, en la cual la razón es mucho más que la satisfacción de ciertos principios lógicos, que también son aceptados consensualmente por una cierta comunidad científica. En la escuela, actuamos como si las ideas fueran razonables en un sentido absoluto, como si no hubieran existido cambios importantes acerca de lo que en

una cierta época se aceptó como razonable con relación a otra. Relativizar la noción de razón y racionalidad al sistema explicativo escogido, es también una manera de ejercer el principio de vigilancia ante la tentación de la certidumbre. Otra forma de pensar la racionalidad es ligarla con nuestra supervivencia y con el conjunto de mecanismos automáticos y adquiridos, que nos ayudan a decidir, a razonar la mejor opción en una situación dada. A lo largo de la vida desarrollamos mecanismos que merced a nuestra capacidad mental de generar sentimientos y registros de las consecuencias positivas o negativas de nuestras acciones, nos permiten luego anticipar y tomar decisiones. Estos mecanismos, no hubiesen sido posibles sin la precedencia de las emociones. Existe pues una estrecha relación entre emociones, sentimientos y razones, en lugar del pretendido antagonismo que suele adjudicárseles. En la mayoría de los sistemas educativos del mundo, los seres humanos viven al menos dieciséis años. Hemos dicho que tales sistemas tendrían que operar como ocasiones para desarrollar extensiones de nuestras funciones de autorregulación vital.

Sin embargo, dentro de las escuelas se producen cada vez más acciones destructivas que atentan contra la supervivencia de los jóvenes -violencia, negación, malestar, deshumanización, adicción-. Una didáctica que tome en cuenta las bases emocionales de la convivencia como fundamento de la supervivencia y de la generación de conocimiento, podría contribuir al desarrollo de espacios más compatibles con nuestra impronta biológica de cooperación.

D.7 Principio del Error

La suspensión de la certidumbre, permite resignificar el error ¿Cómo y cuándo nos damos cuenta de que estamos errando? Es imposible que reconozcamos un error mientras lo estamos cometiendo, obviamente ¡si así fuera no lo cometeríamos! Esto se refleja en la afirmación de Maturana : *el error es siempre a posteriori*, pues solo reflexionando acerca de las consecuencias de nuestras acciones se toma conciencia del error. Además, esta concepción modifica sustancialmente la manera en que nos sentimos cuando erramos pues sólo podemos detectarlo después. Lamentablemente, suele vivirse en una cultura escolar que no acepta los errores, y esto es así en muchos dominios de conocimiento, no solo en la física escolar y no sólo en la institución escuela. Esta ilusión de perfección y certeza, lleva a los estudiantes a sentimientos de minusvalía, desvalorización y desánimo frente al estudio de la Física. Ahora bien, si no podemos eliminar el error porque es constitutivo de nuestro modo de operar ¿cómo vamos a establecer que alguien sabe o no sabe?

D.8 Principio sobre como sabe que sabe, quién sabe

Trataremos el problema de la evaluación en desarrollos posteriores, por ahora sólo diremos en el grupo de clase que alguien sabe, cuando sus acciones satisfacen los criterios de aceptación establecidos por el grupo para construir los conocimientos que se consideran aceptables. Tales criterios son producto del consenso y forman parte del conocimiento público -del grupo- según haya sido formulado en documentos escritos o en el flujo de las conversaciones que forman parte del vivir de dicho grupo.

D.9 Principio del bienestar, la creatividad y razonamiento

El bien-estar es parte de nuestro mecanismo de supervivencia. Las instituciones educativas son extensiones de nuestros mecanismos no automáticos de regulación para sobrevivir. El bienestar en el grupo de clase, se relaciona con la construcción de un espacio relacional de convivencia armoniosa basada en la aceptación del otro como legítimo otro. Este espacio relacional que acepta y promueve el desarrollo de la identidad de cada uno de sus miembros, es la condición de posibilidad del bienestar entendido como el esfuerzo por alejar emociones que niegan al otro. Aceptar que el error es inevitable en nuestro operar como conocedores, que es siempre "a posteriori" (Maturana, 1995, 2001) modifica nuestro sentir frente a lo que denominamos errar.

En el aula, el error suele implicar sufrimiento porque conlleva negación. Estar en un espacio de aceptación, contrario a una dinámica emocional de negación, es la condición de posibilidad para decidir la mejor forma de actuar en una situación dada en un momento dado, es decir de razonar. Hay evidencia neurobiológica de incremento de la actividad cerebral en las regiones ligadas al razonamiento y la creatividad, en los estados emocionales de bienestar y lo contrario en los estados de tristeza. Un alumno que está habituado a no comprender, y a que esto se considere como un déficit que solo es atribuible a él, acaba sintiendo malestar y en ocasiones tristeza, en consecuencia, sus razonamientos disminuyen y su generación de ideas también, con lo cual su incompreensión aumenta. El grupo de clase como espacio de convivencia en aceptación y cooperación permitiría superar esto e incrementar la convivencia en beneficio de todos.

Estos principios son compatibles con la idea de que *el grupo de clase es una comunidad que está aceptando la invitación a ingresar en un mundo de significados compartidos y creados por otra comunidad* (Otero, 2006; 2007). Asumir esta perspectiva, lleva a la necesidad de tomar en cuenta una comunidad que llamaremos de referencia, donde se genera un saber que será "exportado" a otras culturas e instituciones. Este fenómeno consistente en la migración de un saber que "vive" en una cierta institución hacia otra a la cual deberá adaptarse para continuar "vivo" es lo que Chevallard (1992, 1997, 1999) define como *Transposición Didáctica*.

Entonces, la Mecánica Cuántica generada por la comunidad de físicos profesionales resultará inevitablemente transformada desde el momento en que se comienza a pensar como enseñarla en una cierta institución, en este caso la escuela, hasta que de hecho esta enseñanza se realiza.

La Mecánica Cuántica es un campo conceptual en el sentido de Vergnaud (1990), dentro del cual es posible distinguir por lo menos una estructura conceptual. En Física es posible reconocer diversos campos conceptuales dentro de los cuales es distinguible al menos una estructura conceptual de referencia. Cuando un investigador estudia el proceso de reconstrucción de un cierto campo conceptual, para diseñar una secuencia didáctica reconstruye lo que denominamos una cierta Estructura Conceptual de Referencia (ECR) con la mirada puesta en el conocimiento de la comunidad científica y en la institución en donde será reconstruido.

Una ECR es un conjunto de conceptos, relaciones entre ellos, principios, afirmaciones de conocimiento y explicaciones relativos a un cierto CC, reconstruidos por el investigador en arreglo al conocimiento producido por la comunidad científica de referencia.

La reconstrucción total o parcial de dicha ECR en un grupo de clase -en la escuela media, en los cursos preuniversitarios, en los cursos de la universidad o en los cursos avanzados-, produce una estructura conceptual diferente a la primera, tanto por los componentes como por las relaciones entre ellos. De manera más o menos explícita, cada profesor en un cierto grupo de clase reconstruirá una estructura para ser enseñada, y en el mejor de los casos invitará a su grupo de clase a estudiarla (Otero, M. R, 2006, 2007). Se denomina a esta otra estructura: Estructura Conceptual Propuesta para Enseñar (ECPE), definida como *"el conjunto de conceptos, relaciones entre ellos, afirmaciones de conocimiento, principios, y explicaciones relativos a un cierto campo conceptual, que debe ser reconstruido por los profesores a partir de una estructura conceptual de referencia (ECR) con el objeto de transformarla en reconstruible en un contexto y en una institución dada"* (Otero, 2006, 2007).

Esta estructura se caracteriza por su relatividad institucional y personal, lo cual implica que podrían existir tantas estructuras conceptuales propuestas ECPE_n (véase la Figura 2) como profesores, grupos de clase e instituciones se consideren. Un punto importante para el análisis didáctico es que en ciertas instituciones existen estructuras características, referidas a diversos campos conceptuales que están vivas, adaptadas, aceptadas. Estas son *ecológicamente viables*, ya que de lo contrario no sobrevivirían al paso del tiempo, a las reformas educativas de diversa índole, etc. Por el contrario, otras estructuras son propuestas y casi nunca se adaptan. En este sentido, un aspecto esencialmente didáctico de nuestra investigación es la reconstrucción y análisis de una ECPE relativa en este caso a la Mecánica Cuántica, que sea viable en la Institución escuela secundaria. Una vez que se diseña la ECPE y resulta viable en una institución dada, también nos interesa su replicabilidad y su adaptabilidad a instituciones semejantes. El diseño de la ECPE requiere un conjunto de situaciones vinculadas en una secuencia didáctica que pretende producir la emergencia de conceptos clave, explicaciones, etc. La reconstrucción de esta estructura incluye el análisis de la conveniencia de utilización de distintos soportes como el informático; en este caso fue la selección y/o elaboración de software que pueda utilizarse con los estudiantes. También en esta reconstrucción se analizan cuáles decisiones y acciones didácticas resultarían adecuadas para favorecer una dinámica emocional contraria a cualquier tipo de negación.

La idea de situación se entiende en el sentido de Vergnaud (1990). Al proponer una ECPE, se diseñan y analizan didácticamente el conjunto de situaciones que permitirán la emergencia y el funcionamiento de los conceptos clave, los principios clave de la ECPE correspondiente, las preguntas clave, las explicaciones y afirmaciones de conocimiento que se espera realizar, las emociones y acciones, los sentimientos, los mecanismos explicativos y el lenguaje en el que serán formuladas las explicaciones y las afirmaciones de conocimiento (Otero, 2006; 2007). Estos constituyentes

de la ECPE son definidos como sigue y algunas de sus relaciones clave se presentan en la Figura 1:

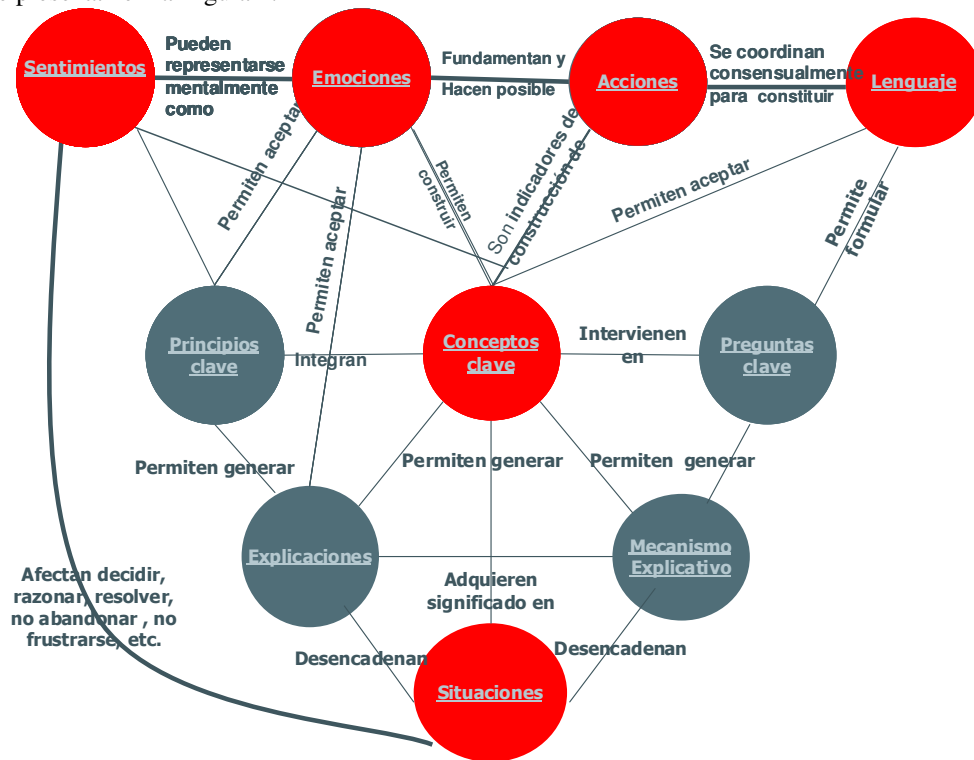


Figura 1: Los elementos que componen la ECPE y sus relaciones (Otero, 2008)

Situaciones: se refiere a la noción de situación adoptada por Vergnaud (1990).

Conceptos Clave: son los conceptos centrales que se espera construir como emergentes de la situación propuesta y sin los cuales el problema formulado no podría resolverse.

Principios Clave: son afirmaciones de conocimiento que se aceptan sin deducirse de otras. Por ejemplo, el principio de Mínima Acción en mecánica clásica o el principio de Conservación de la Energía.

Preguntas Clave: las situaciones propuestas a los alumnos por el profesor tienen un carácter problemático, razón por la cual conllevan un conjunto de preguntas cuya respuesta da lugar a un conjunto de interacciones recurrentes entre los miembros del grupo de clase, conversaciones.

Emociones: las emociones son las disposiciones corporales que determinan nuestro dominio de acciones. No son controlables pero el organismo puede modularlas. Sin embargo, las conversaciones en las cuales participamos afectan nuestras emociones y estas afectan nuestro modo de vivir en una cierta cultura. La ECPE tiene que operar al nivel del alumno como una invitación a ingresar en un cierto dominio de conocimiento, que debe evitar cualquier atisbo de negación del otro. La ECPE tiene que contemplar la constitución de una dinámica emocional propicia para la construcción de conocimiento físico.

Acciones: Entendemos la acción en tres dimensiones: biológica, mental y actuativa. En el nivel de la ECPE privilegiamos la dimensión actuativa. Nos interesan las acciones de los miembros del grupo de clase relativas al conocimiento. Se trata de anticipar qué acciones son adecuadas en el dominio de conocimiento que está en construcción. Además, el significado de un objeto emerge del sistema de prácticas asociadas a él y dentro de cada dominio

Explicaciones: Las explicaciones son conjuntos sistémicos de afirmaciones de conocimiento que permiten predecir los eventos físicos o dar razón de ellos, mediante la atribución de relaciones causales a los objetos físicos construidos en un cierto dominio. Las explicaciones tienen el carácter de de tales para quienes las aceptan en el dominio de conocimiento al que pertenecen, en este caso, la física escolar.

Mecanismo explicativo: es el procedimiento o conjunto de acciones aceptadas en un dominio explicativo, como método para generar afirmaciones de conocimiento válidas. En el caso de la física, se tratará de la construcción de modelos físicos y matemáticos que generan objetos físicos, fenómenos nuevos a ser explicados, experimentos, predicciones y contrataciones.

Lenguaje: en sentido amplio se refiere a los diversos modos semióticos que constituyen, especifican, y describen a los objetos propios de cada dominio de conocimiento.

Cuando el profesor y su grupo de clase reconstruyen efectivamente la ECPE en la institución específica, se produce otra estructura, la Estructura Conceptual Efectivamente Reconstruida (ECER), definida como: “el conjunto de conceptos, relaciones entre ellos, principios, afirmaciones de conocimiento y explicaciones relativos a un cierto campo conceptual que efectivamente resulta reconstruido por un grupo de clase, a partir de las coordinaciones consensuales de acciones que tienen lugar en las conversaciones de las cuales participan el profesor y los alumnos en dinámicas emocionales adecuadas. (Otero, 2007, p.21)

Los conceptos y los significados que se reconocen en esta estructura, emergen del conjunto de acciones que se ponen en juego en las diversas situaciones que se proponen. Los

significados se entienden en una doble dimensión cognitiva: personal y grupal. Así cada miembro del grupo de clase construirá una estructura conceptual personal y una red de significados única -en el sentido de propia- y privada. A la vez, las conversaciones del grupo de clase generan una red de significados compartidos y públicos, comunes, que son un producto consensual, lo que se ha denominado "negociación de significados" (Gowin, 1981; Novak & Gowin, 1984; Moreira, 2000, 2005). Este proceso de negociación puede ser más o menos explícito y más o menos conciente, dependiendo de la profesionalidad del profesor y de la distancia entre la estructura de referencia, la estructura propuesta y la efectivamente enseñada. Las nociones ECR y ECPE se relacionan en parte con la idea de estructura cognitiva en el sentido de Ausubel y Novak y con la noción de campo conceptual y de concepto de Vergnaud (Otero 2008, p. 13). Las estructuras son sistemas (componentes + organización) que incluyen tanto a los conceptos relevantes, como a las relaciones: principios fundamentales, explicaciones y mecanismos explicativos que los vinculan.

La noción de concepto de Vergnaud, incluye al lenguaje, a los significantes y a los invariantes operatorios, que suponen la conservación de las formas de organización de la acción. Esta noción de concepto ligado a la acción en todas sus variantes, permite tender un puente a las emociones subyacentes y a los sentimientos, también incluidos en la estructura. Las estructuras conceptuales son indisolubles del conjunto de problemas y situaciones que les dan sentido. Las situaciones que se diseñan como parte de una ECPE, llaman a su vez a ciertos esquemas (en el sentido de Vergnaud), lo cual permite analizar el fenómeno de la puesta en acto de una ECPE, esto es la ECER, también desde un punto de vista cognitivo. El estudio del proceso de inserción de nociones cuánticas en la escuela media, requiere según nuestra concepción didáctica del análisis, diseño y reconstrucción de las estructuras que se presentan en el esquema siguiente. Este proceso permitirá decidir la viabilidad de este producto y posteriormente estudiar su reproducibilidad y adaptabilidad a múltiples contextos. La relación entre el campo conceptual, la ECR, ECPE y ECER, se presenta en la Figura 2.

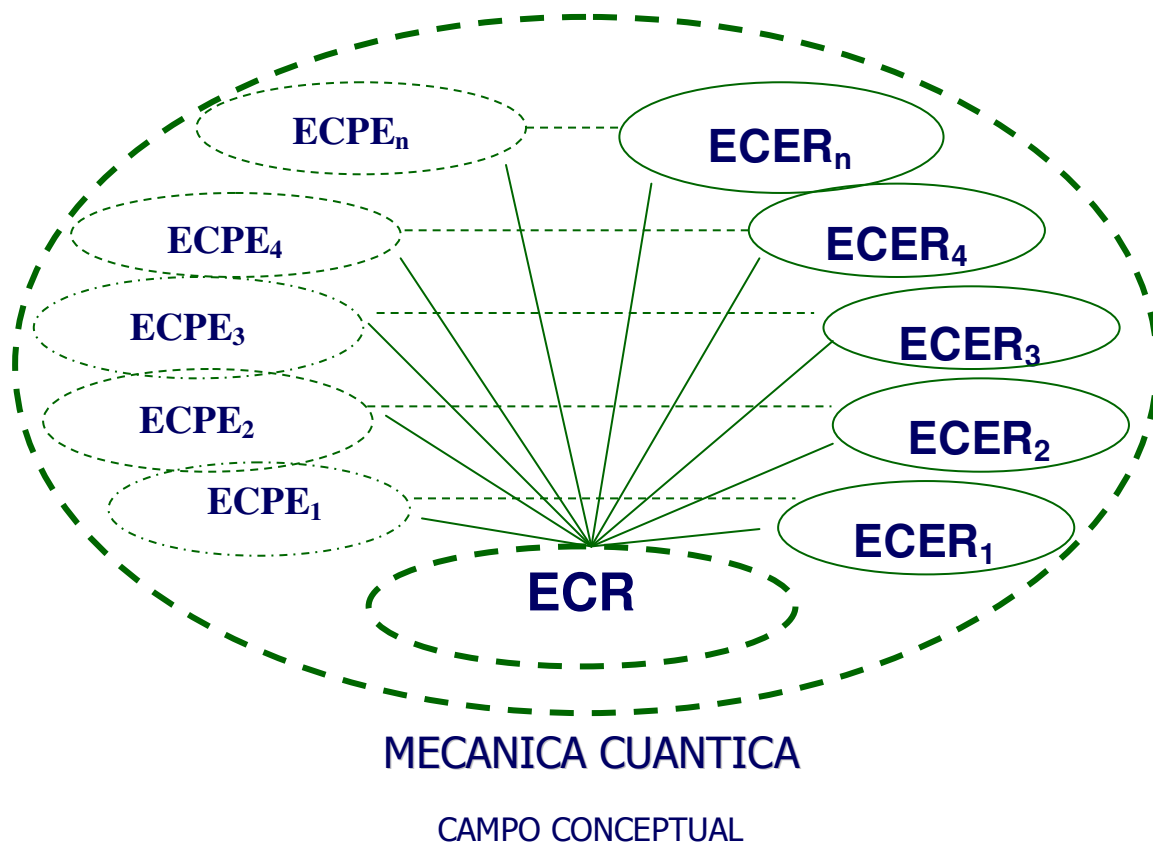


Figura 2 (Otero, 2009)

4. La ECR de los caminos múltiples

A continuación se presentan algunos argumentos acerca de las ventajas de la construcción de esta ECR, un desarrollo pormenorizado de la misma puede encontrarse en (Arlego 2008):

- Explicar la transición entre el comportamiento microscópico y macroscópico, enfatizando el papel de la constante de Planck, a partir del análisis del cociente entre la acción S y dicha

constante fundamental, es decir abordar el Principio de correspondencia.

- Estudiar nociones fundamentales de Mecánica Cuántica a saber: Principio de Superposición, Principio de Correspondencia y descripción probabilística del Sistema Cuántico, con estudiantes que disponen de escasos conceptos físicos y matemáticos, más allá de los de Mecánica Clásica habitualmente tratados en la secundaria.

- Aplicar la técnica STA a un sistema simple como el electrón libre – ejemplar que reúne las características fundamentales de los sistemas cuánticos- analizando y caracterizando los sistemas cuánticos utilizando operaciones elementales con vectores (suma y módulo) y enfatizando la idea probabilística de la Mecánica Cuántica y el principio de superposición.
- Utilizar herramientas informáticas para visualizar y comprender los resultados de aplicar la técnica de Caminos Múltiples.

- Evitar el desarrollo que se encuentra en la textualización que conduce a la pérdida de legitimidad conceptual y funcional de las preguntas en la institución escuela media.

El mapa que se presenta a continuación resume los **conceptos y principios clave** que componen esta ECR.

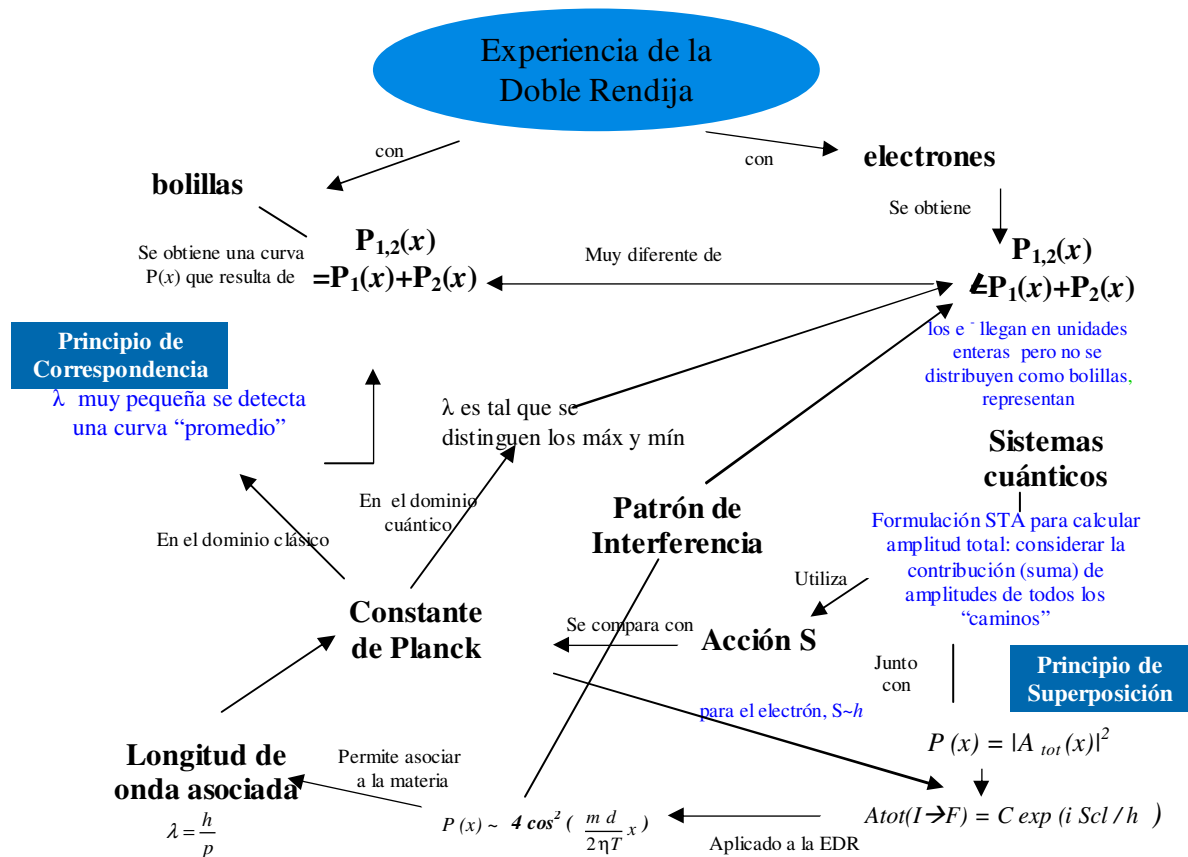


Figura 3. Estructura Conceptual de Referencia (Fanaro, 2009)

A continuación, se describen brevemente las etapas en las cuales se desarrolló la ECPE relativa a esta ECR para un curso del último año de la escuela secundaria.

Etapa 1- Experiencia de la Doble Rendija (EDR) con bolillas y con electrones

Se plantearon dos situaciones: en la primera, los estudiantes debían imaginar y anticipar los resultados de esta experiencia cuando se utilizan bolillas. En la segunda situación, se propuso utilizar el software "Doppelspalt"⁴ y

se simuló la EDR con bolillas. El software permite apreciar los impactos en la pantalla, generar el histograma de frecuencias y visualizar la curva teórica de la curva de probabilidad $P(x)$. Los estudiantes compararon sus predicciones sobre el resultado del experimento con los resultados de la simulación; y resolvieron un conjunto de tareas para analizar el efecto en la forma de la curva cuando se varía el ancho de las rendijas y su distancia de separación. Con esto se esperaba establecer el principio: "Cuando ambas rendijas están abiertas la curva resultante es la suma de las curvas individuales"

Luego se propuso seleccionar electrones en lugar de bolillas. En este caso, la simulación muestra el patrón de interferencia, que resulta inexplicable tanto desde la teoría

⁴ "Experimento de la doble rendija en Mecánica Cuántica" (2003). Creado por Muthsam, K (Versión 3.3 traducido al español por Wolfmann y Brickmann) Physics Education Research Group of the University of Munich. Obtenido en Internet de

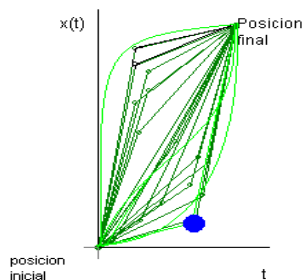
<http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Downloads/doppelspalt/dslit.html>

clásica como desde la idea escolar de que los electrones serían pequeñísimas bolillas. Esto produce un conflicto y la necesidad de buscar una explicación para el comportamiento inesperado de los electrones. Se esperaba que el grupo de clase formulase el siguiente principio clave: “Cuando ambas rendijas están abiertas y aunque los electrones llegan en unidades discretas, la curva resultante difiere de la obtenida con bolillas, porque no se genera sumando ambas curvas individuales” Como no se puede obtener la curva mostrada en la simulación sumando las curvas individuales -al abrir las rendijas de a una por vez-, resulta inadecuado considerar a los electrones como partículas.

Etapa 2- Análisis y aplicación de la técnica STA para electrones libres.

La propuesta enfatiza la descripción probabilística como un aspecto central de la teoría cuántica. Se plantea la cuestión: Para un electrón que se considere en cierto estado inicial -a la salida de la fuente en este caso- ¿Cuál es la probabilidad de que finalmente se encuentre en cierto lugar de la pantalla colectora? Para que los estudiantes pudieran usar el “Método de caminos múltiples de Feynman para la Mecánica Cuántica” se reemplazó la notación con números complejos por una representación vectorial. Utilizar el caso de la partícula libre, para producir la emergencia de las propiedades de los sistemas cuánticos, fue una decisión didáctica clave, pues el ejemplo es sencillo y a la vez reúne las propiedades más generales de los sistemas cuánticos (Arlego, 2008). La técnica o método para calcular la probabilidad se presentó a los estudiantes como “Sumar Todas las Alternativas” (STA) de la siguiente forma:

1) Considerar todos los caminos (trayectorias) que conectan el estado inicial $I(0,0)$ con uno final $F(x,T)$,



Luego, con cada $x(t)$ posible, asociamos un valor numérico llamado acción (S) relacionado con la energía cinética promedio temporal (E_{cp}) y potencial promedio temporal (E_{pp}):

$$S = (E_{cp} - E_{pp}) \cdot T,$$

Si la partícula está “libre” es decir no está en presencia de fuerzas, consideramos que tiene energía potencial nula. Entonces, directamente la acción en este caso es:

$$S = E_{cp} \cdot T$$

$$S = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \cdot T$$

2) Con dicha acción S se construye un vector en el plano llamado “Amplitud de probabilidad” que tiene módulo uno y ángulo de medida S/\hbar (con respecto al eje x positivo). El denominador de este cociente es el valor de $\hbar = h/2\pi$ donde $h = 6.625 \times 10^{-34}$ J.s se denomina

constante de Planck

Es decir:

Cada $x(t)$ tiene un valor de S
con esta S se construye un vector:



Vector Amplitud asociado a cada $x(t)$

$$\left(\cos \frac{S}{\hbar}; \sin \frac{S}{\hbar} \right)$$

3) Se suman todos los vectores asociados a las diferentes trayectorias que conectan ambos estados inicial y final. Llamamos a este vector suma “Amplitud de probabilidad total”

Amplitud de probabilidad total = Suma de todos los vectores asociados

$$\left(\cos \frac{S}{\hbar}; \sin \frac{S}{\hbar} \right)$$

4- Se calcula el MÓDULO de la amplitud de probabilidad total (o sea el vector resultante de la suma) y se eleva al cuadrado. El resultado es la probabilidad de arribar al estado final F , habiendo partido del estado inicial I

Los electrones de la EDR se pueden considerar libres desde el momento que son disparados por la fuente hasta que llegan a la pantalla, suponiendo que el disparo se realiza en intervalos de tiempo suficientemente alejados para que no interactúen entre sí. En el caso de un sistema libre se puede obtener una expresión analítica para la suma de todos los caminos, aunque su deducción está más allá de los objetivos del trabajo. En una primera etapa no se mencionó a los alumnos la existencia de dicha fórmula sino que se realizaron simulaciones con el software ⁵ModellusTM para familiarizarlos con los principales conceptos. La Figura 2 representa una pantalla de salida del software al seleccionar distintas funciones posibles para conectar los estados inicial y final:

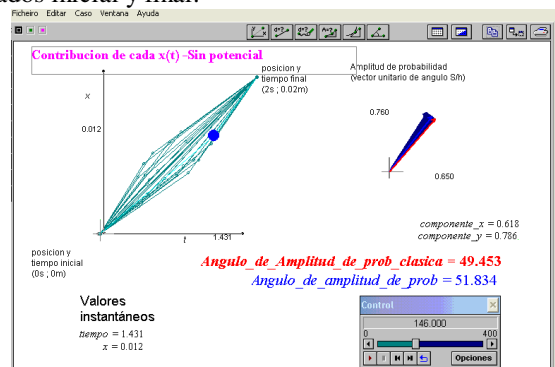


Figura 4: Pantalla de la simulación 1

Seleccionando las distintas funciones $x(t)$ que conectan los estados iniciales y finales, la simulación muestra los

⁵ MODELLUSTM versión 2.5 Creado por Victor Duarte Teodoro, Joao Paulo Duque Viera; Filipe Costa Clérigo Faculty of Sciences and Technology Nova University, Lisbon, Portugal. Obtenido de Internet en Diciembre de 2006 de <http://phoenix.sce.fct.unl.pt/modellus>

ángulos correspondientes en un plano cartesiano. Simultáneamente se dibujan los vectores de amplitud de probabilidad correspondiente a cada función $x(t)$ seleccionada.

Las situaciones propuestas para utilizar el software y la representación en un mismo plano cartesiano de los vectores asociados a funciones $x(t)$ cercanas y alejadas de la función clásica, permitirían al grupo de clase formular las siguientes conclusiones:

- La acción S es mínima para la trayectoria clásica (una recta en este caso).
- Los ángulos de los vectores amplitud asociados a aquellas $x(t)$ o “caminos” cercanos⁶ al camino clásico $x_{clas}(t)$ son similares. En cambio, los ángulos de los vectores asociados a las $x(t)$ que se encuentran alejadas del camino clásico, difieren mucho entre sí. Esto significa que sólo un conjunto de caminos “alrededor” del camino clásico pueden aportar a la suma. Los caminos que están demasiado alejados del clásico, tienen asociados vectores que, debido a su diferencia de direcciones, se anulan entre sí al sumarlos.
- Cuanto mayor es la masa de la partícula hay menos vectores que considerar en la suma, porque hasta los caminos más cercanos se anulan. Para una partícula macroscópica, que es el caso límite, la única que contribuye a la suma es la $x_{clas}(t)$.
- Es la relación entre el valor de la acción –la única variable en nuestro caso es la masa- y el valor de la constante de Planck la que permite interpretar la transición cuántico-clásico.

Etapa 3- Aplicación de la STA para reconstruir el diagrama de la EDR con electrones

En esta etapa se considera la pregunta clave: *¿Cuál es la probabilidad de que el electrón que disparó la fuente se encuentre finalmente a una distancia x del centro de la pantalla?* Se propuso construir la respuesta aplicando la técnica STA al caso de la EDR con electrones para ciertas disposiciones experimentales dadas: separación de las rendijas, distancia entre la fuente y la pantalla y velocidad de los electrones. Aplicando la fórmula para el caso de un sistema libre mencionado en la etapa 2 al problema de la doble rendija se obtiene la expresión:

$$P(x) \approx 4 \cos^2 \left(\frac{md}{2\eta T} x \right)$$

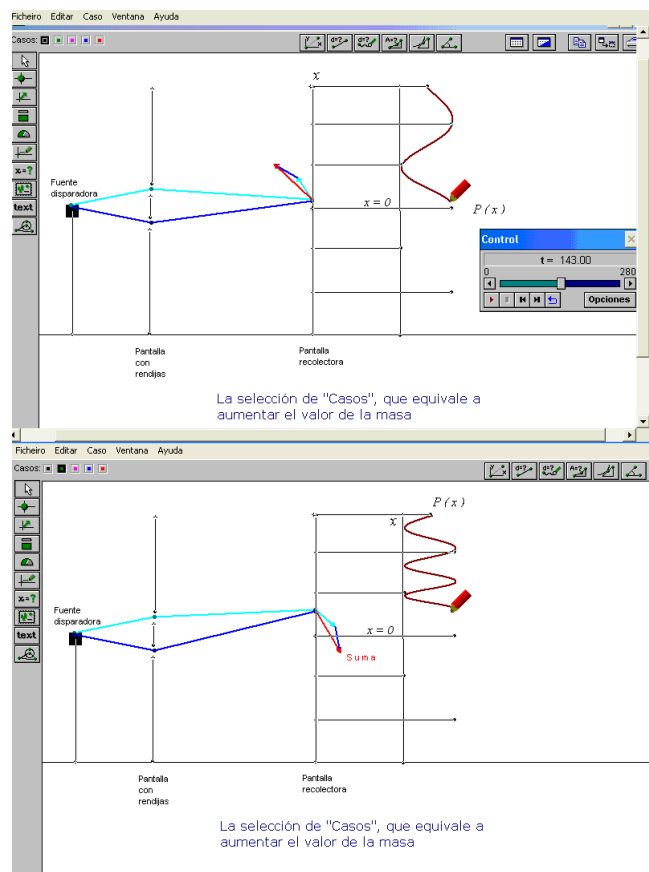
Los estudiantes discutieron y analizaron con su grupo las características funcionales de esta expresión.. A partir de ella y proporcionando determinadas características experimentales (distancia de separación, tiempo empleado, etc.) realizaron una representación gráfica aproximada de $P(x)$. Para que se aprecien los máximos y mínimos, se proporcionó un conjunto de valores de la variable independiente. Sin esta orientación, la reconstrucción de la

⁶ El significado de "alrededor" debe ser conversado con el grupo de clase. En este caso el aporte está determinado por la masa del sistema que se trate. Para un objeto macroscópico, "alrededor" es tan cerca de la partícula clásica que prácticamente es ella misma. A medida que la masa se reduce y pasa a dimensiones microscópicas "alrededor" va significando regiones cada vez mas alejadas de la $x(t)$ clásica.

gráfica habría desviado a los estudiantes del objetivo principal en ese momento: reconocer que la gráfica adopta una forma similar a la gráfica de $P(x)$ obtenida en la primera simulación, por lo cual se infiere que la STA modeliza la situación de la Experiencia de la Doble Rendija. Este resultado permite retornar a la cuestión generatriz de la secuencia: *¿cómo explicar los máximos y mínimos de la curva de $P(x)$?*

Etapa 4- Análisis de la transición clásica-cuántica en la EDR

Para evidenciar que la relación entre la masa x a través de la acción y la constante de Planck determina la formación del patrón de interferencia cuántica, se generó otra simulación con *Modellus*TM. Manteniendo constantes los demás parámetros, se puede observar cómo cambia la curva $P(x)$ en la misma experiencia, con el aumento progresivo de los valores de masa. La simulación también representa el vector asociado a cada alternativa -pasar por una u otra rendija-, el vector suma y la curva. Las figuras siguientes muestran como aumenta la frecuencia espacial de la curva $P(x)$ al incrementar la masa. Experimentalmente, en el caso límite, de masa macroscópica, no es posible distinguir los máximos y mínimos de la curva y detectar así el efecto de interferencia. En este caso, la curva obtenida es la suma de las contribuciones de cada rendija por separado, tal como se observaba para bolillas. Así, la misma formulación es capaz de reproducir los resultados cuánticos y clásicos mostrando la transición entre la mecánica cuántica y la mecánica clásica, al variar la masa.



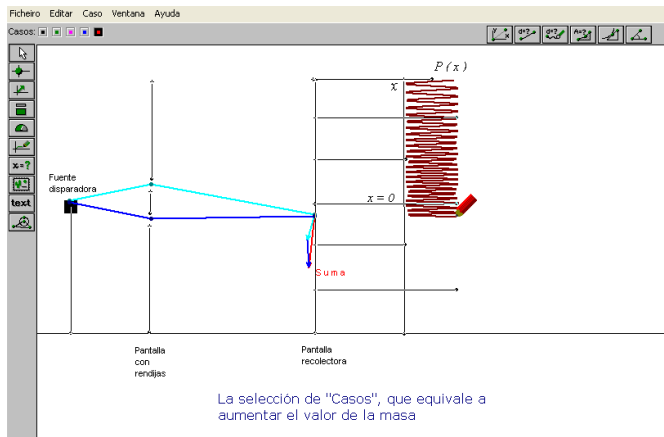


Figura 5: Pantallas de salida de la simulación de la EDR

Para que los estudiantes reconozcan que en el experimento real el aumento de la frecuencia espacial de la curva significa la obtención de una sola curva o “curva promedio” como la que muestra la primera simulación de la experiencia se propuso la siguiente figura:

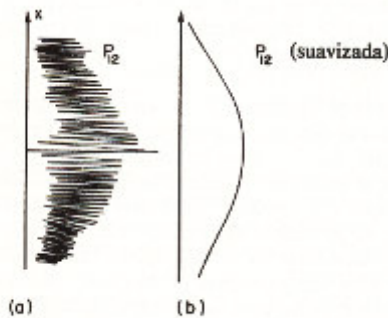


Figura 6: Función $P(x)$ con proyectiles de masa mucho mayor al electrón, realizando la EDR.

(a) Curva predicha por la mecánica cuántica (b) Diagrama observado experimentalmente

Luego se propuso a los estudiantes analizar resultados de la EDR realizada en Tonomura en 1974, analizando una serie de fotografías de las sucesivas pantallas colectoras de electrones en el tiempo. En ellas se puede notar la llegada de los electrones en unidades discretas, y a su vez, la distribución en franjas de concentración. En este contexto se discutió y justificó el concepto de longitud de onda asociada a los electrones, como proporcional al cociente entre la constante de Planck y al producto masa-velocidad. Luego, se generalizó el concepto de longitud de onda asociada a todas las partículas, aceptando que tanto los sistemas cuánticos como los clásicos tienen asociada una longitud de onda. Buscando confrontar esta última idea con los resultados antes obtenidos con el primer software, se planteó la cuestión *¿Por qué no se aprecia interferencia cuántica cuando la experiencia se realiza con bolillas?* Se propuso analizar la relación entre la longitud de onda asociada y el patrón de interferencia. Se estableció que es posible detectarlo con electrones, y no para las bolillas. En este último caso, el cociente entre la constante de Planck y la masa es extremadamente pequeño, debido al valor de h , por lo tanto la longitud de onda asociada es demasiado pequeña, y los máximos y mínimos de la curva $P(x)$ resultan indistinguibles, obteniéndose una curva promedio que es la curva clásica. La secuencia concluye otorgando a

la constante de Planck como constante fundamental un papel fundamental en la naturaleza, como valor de referencia para establecer que el comportamiento cuántico se evidencie experimentalmente o no.

Algunos resultados relativos a la ECER

La ECER se describe a partir de varios instrumentos que permiten analizar la conceptualización con un test escrito realizado al final, con los protocolos de las respuestas escritas de los alumnos en cada situación de la secuencia y los protocolos originados en el registro de audio de las clases relativos a la actividad grupal y con un test diseñado para analizar las opiniones de los estudiantes sobre la secuencia. Conocer los teoremas en acto utilizados y las inferencias que éstos permitieron y/o obstaculizaron permite describir el proceso de conceptualización. Es importante recordar que dicho proceso no termina en el tiempo en que se implementó la secuencia de situaciones y la evaluación. Para Vergnaud (2008, p. 5) *“la serie de teoremas en acto susceptible de ser asociada al mismo concepto es generalmente muy grande, particularmente en las disciplinas científicas y técnicas, de manera que, declarar que tal sujeto ha entendido el concepto, a menudo no tiene sentido”*. Por otro lado, la secuencia es un instrumento en el cual cada etapa se sostiene en la anterior, el hecho de que los estudiantes puedan llegar al final, triangulado con sus opiniones acerca del esfuerzo y sentimientos durante el desarrollo de dos meses, es otro indicador de viabilidad de la misma. En este marco, se puede afirmar lo siguiente sobre la relación entre los conceptos que se esperaban reconstruir, los teoremas en acto identificados cuando los estudiantes abordaron las situaciones, y los resultados obtenidos en la evaluación:

- Respecto a la conceptualización de **distribución de probabilidad $P(x)$** para bolillas y para electrones en la EDR (descripción probabilística del electrón)

Inicialmente el concepto de azar fue dominante, y no permitió a los estudiantes pensar en términos de probabilidades debido a que ellos utilizaban un teorema en acto referido a la uniformidad de los resultados, que luego fue abandonado. En la evaluación utilizaron el concepto de curva de probabilidades [$P(x)$] en los marcos algebraico, funcional y gráfico de forma adecuada. Casi todos los estudiantes lograron diferenciar las curvas de probabilidad $P(x)$ para electrones y para bolillas, en términos de la presencia de máximos y mínimos.

Cuando los estudiantes abordaron las situaciones que implicaban el concepto de suma de funciones, no lograban reconocer la suma de ambas curvas en el sentido funcional, aunque varios de ellos notaban el efecto de superposición en el centro. Luego, la simulación con el software de la doble rendija habría contribuido a que reconocieran y explicitaran, que los efectos de cada una de las curvas se superponían cuando se abrían ambas rendijas en simultáneo. Este fue un buen punto de partida para contrastar con la curva $P(x)$ de electrones.

- Respecto al electrón como **sistema cuántico**

En el análisis “a priori” se había anticipado que los estudiantes asociarían los resultados con los fenómenos ondulatorios -interferencia y difracción-, cuando se enfrentaran con la curva $P(x)$ en el software de la Experiencia de la Doble Rendija con electrones, pues ésta función es visualmente similar a la representación gráfica de la curva de intensidad en la Experiencia de Young. Sin embargo, esto no sucedió. Es posible que no se pueda esperar que los estudiantes utilicen una estrategia cognitiva tan propia de los físicos: relacionar la interferencia clásica con la cuántica, a partir de ciertas características matemáticas comunes. Tal vez, si los estudiantes dispusieran de una base conceptual sólida de los conceptos ondulatorios, la asociación podría resultar más probable.

Inicialmente, los estudiantes no advirtieron la distribución de los electrones en franjas de concentración, aún viéndolas. Al contrario, insistían en que estaban “*distribuidos por toda la pared*” sin advertir las bandas de concentración y los lugares vacíos. Lo atribuimos a que utilizaban un teorema en acto referido al comportamiento de los electrones: “*son bolillas pequeñísimas que pueden atravesar paredes*”-, lo cual les hacía ver la distribución homogénea en la pared, evidenciando una vez más, que los invariantes operatorios orientan la percepción y la acción como un todo. Cuando la profesora cuestionó su percepción de homogeneidad y preguntó acerca de la interpretación de los mínimos de la curva, los estudiantes revisaron su percepción y aceptaron la necesidad de encontrar una nueva categoría para los electrones, alternativa a “pequeñísimas bolillas”, conviniendo en llamarlos “sistemas cuánticos”. De esta forma cobró sentido la búsqueda de una manera de explicar la ley que rige la distribución de probabilidades. Estos resultados confirman que: 1) los productos de investigación deben ser testeados en aulas reales, modificados, y así siguiendo; 2) la relevancia de la intervención oportuna del profesor imbuido en la tarea que está desarrollando. Expresiones de los estudiantes como “*ahora nos estás cambiando nuestro pensamiento de...de toda la vida! los electrones no son bolillas...(estudiante A13, en el E9)*” estarían indicando que ellos al menos dudaron de la idea de los electrones como “pequeñas bolillas”.

Según los resultados de la evaluación, una buena parte de los estudiantes parece reconocer el comportamiento “diferente” del electrón, respecto de las partículas macroscópicas como bolillas. Sin embargo, algunas respuestas en dicha instancia, muestran que ellos aún siguen considerando a los electrones como partículas, añadiendo la propiedad “cuántica”. Esto significa que los teoremas en acto referidos a los electrones como “*pequeñas bolillas*” probablemente sean reutilizados en aquellas situaciones que les requieran representar, nombrar e imaginar a los electrones.

- Respecto a la **técnica STA y la contribución de las funciones $x(t)$ cercanas a la función clásica en el cálculo de probabilidad (Principio de Superposición)**

Durante el desarrollo, algunos estudiantes manifestaron dificultades para responder a las preguntas requeridas con la utilización del software Modellus, debido a la dificultad

de comprender la relación entre las funciones $x(t)$ y el vector amplitud de probabilidad. Sin embargo otros, a pesar de la falta de familiaridad con la simulación, reconocieron la relación entre proximidad de funciones y dirección de los ángulos del vector amplitud. Esto permitió avanzar en la conceptualización de la contribución de funciones en el cálculo de probabilidad. Finalmente, se formularon y aceptaron las conclusiones acerca de los resultados de la aplicación de la STA para el caso de electrones libres. En la evaluación, casi todos los estudiantes lograron referirse en forma adecuada a la contribución de funciones o “camino” cercanos al clásico en varias de sus respuestas.

Cuando se propuso aplicar la técnica STA para sistemas cuya masa fuera aumentando gradualmente, surgieron nuevos obstáculos. Por un lado, la dificultad para interpretar la salida del software, por otro, aquellos estudiantes que no comprendían los resultados para el caso del electrón, naturalmente tampoco comprendían la aplicación de la STA con masas mayores. En algunos estudiantes fue notable la utilización del teorema en acto “*Queda un solo vector en la suma, entonces, el resultado es más exacto*”. Esto indicaría que se aproximaban a la idea de que la probabilidad se transformaba en certeza si con una sola función se podía describir el movimiento de las partículas macroscópicas. Es decir que estaban a un paso de conceptualizar la transición cuántico-clásico.

- Respecto a la **interferencia cuántica y a la longitud de onda asociada**

Cuando se aplicaron los resultados de la STA a la EDR, se obtuvo una función que se ajustaba –parcialmente- a la función experimental mostrada por el software. Los estudiantes expresaron dificultades para reconocer la modelización, porque ambas curvas no resultan exactamente iguales: la que muestra el software considera la difracción debido al ancho finito de cada rendija que no es considerado en nuestro tratamiento. Sin embargo, la propuesta de utilizar la **Simulación 2** colaboró para construir el concepto de longitud de onda asociada, porque ellos confirmaron cómo cambia la curva de $P(x)$ al aumentar la masa, que ya habían reconocido cuando analizaron la expresión funcional. En la evaluación, ellos parecen utilizar adecuadamente este concepto, cuando consiguen graficar curvas de probabilidad relativas a sistemas cuánticos y a sistemas clásicos, y calculan e interpretan apropiadamente las longitudes de onda involucradas en las preguntas.

- Respecto al significado de la **constante de Planck y la transición cuántico-clásico (Principio de correspondencia)**

En varias ocasiones durante el desarrollo de la secuencia se destacó la importancia de la pequeñez de la constante de Planck en un contexto macroscópico. Se propusieron ejemplos para que los estudiantes analicen distintos cocientes, para casos cuánticos y clásicos, y para que calculen longitudes de onda asociada a distintos valores de masa. Finalmente se concluyó que la constante de Planck es fundamental en la naturaleza, pues fija el límite entre lo macroscópico y lo microscópico. En los problemas de la

evaluación la mayoría de los estudiantes se refirieron adecuadamente a la constante de Planck, a sus dimensiones, la utilizaron de forma adecuada, y se aludieron en varias ocasiones a su aspecto fundamental para la Mecánica Cuántica. Expresaron conocer las diferencias entre formación y detección de la curva de interferencia, y realizaron representaciones gráficas adecuadas. En este sentido, se podría decir que conceptualizaron el Principio de Correspondencia.

Las repeticiones y adaptaciones de esta secuencia con otros grupos de clase, han permitido reafirmar el papel que la relación entre esquemas del sujeto y situaciones tiene en la conceptualización. Por ejemplo, el caso del azar y la distribución, en la experiencia de la doble rendija. Los estudiantes interpretaron la situación a la luz del concepto en acto de azar, recuperando los teoremas y conceptos en acto disponibles y a su juicio, acordes a la solución buscada. Al modificar la formulación de la situación, los teoremas y conceptos llamados son otros. Así se pone de manifiesto que las situaciones no pueden ser producto de la improvisación, sino que son resultado de un proceso de diseño, del análisis didáctico a priori y de prueba efectiva en aula produciendo una reformulación y un nuevo ciclo. Como señala Vergnaud al admitir el carácter *contingente* de la acción, entendemos como los invariantes operatorios dirigen las acciones de los estudiantes, pero éstos invariantes son gatillados a partir de las preguntas y tareas solicitadas en las situaciones. En este sentido, la acción es también una oportunidad para la conceptualización pretendida.

Por otro lado, este trabajo también muestra la necesidad de discutir el significado de modelización en física con los estudiantes. Ellos no perciben que se trata de una forma de representar la situación que se quiere explicar - la distribución de los electrones en la pantalla colectora, en este caso-. Los estudiantes no comprenden que los modelos científicos son aproximaciones que no tratan directamente con la realidad ni la agotan, tal como en la aplicación del método de Feynman.

Los aspectos afectivos se analizaron en dos momentos: durante la implementación, y al final de ella. Cada instancia se realizó en base a dos tipos de instrumentos: los protocolos de los estudiantes situación a situación para el primer caso, y un cuestionario individual que ellos respondieron al finalizar la implementación, para el segundo caso. La secuencia demanda a los estudiantes un esfuerzo importante para no ser superados por las situaciones propuestas y para aceptar los desafíos. Este esfuerzo tiene doble naturaleza: por un lado cognitiva, para poder actualizar y relacionar los conceptos nuevos con otros conceptos previos, y es necesario aceptar que se intenta "*cambiar las ideas de toda una vida*" tal como lo expresan los estudiantes. Por otro lado hay que realizar un esfuerzo afectivo, relacionado con sentirse a gusto en resolver problemas y cuestiones, y por aceptar que dichas "*ideas de toda la vida*" son erradas. El diseño asume la legitimidad del estudiante, como alguien que acepta la invitación a ingresar en un nuevo dominio de conocimientos que formula el profesor, así, siempre se aceptaron las ideas de los estudiantes, sus predicciones y explicaciones, y luego, se trató de perturbarlas con

preguntas, con problemas o con el software. También requirió un gran esfuerzo por parte de la profesora para aceptar que los estudiantes tienen la responsabilidad de aceptar o rechazar la invitación que se les realiza, y resistir la tentación de ocupar el lugar del alumno, no resolviendo los problemas por ellos (Otero, 2006; 2007).

Con relación al software, también los estudiantes reconocen el valor de su utilización y el esfuerzo que les requirió. Si bien las herramientas elegidas y diseñadas buscan aliviar ciertos aspectos desalentadores como el cálculo, no suponen una utilización pasiva. Ellas son parte de situaciones indisolubles de la conceptualización y por lo tanto están ligadas a problemas y preguntas. Otro indicador de viabilidad es la satisfacción que los estudiantes manifiestan acerca de los resultados de su esfuerzo y de la forma de trabajo, que exigió atención y enfatizó la comunicación oral y escrita.

Comentarios Finales

El trabajo ha mostrado la viabilidad de esta secuencia didáctica para enseñar ciertos aspectos fundamentales de Mecánica Cuántica en el último año de la escuela secundaria. Los resultados provisionales -la secuencia está aún en construcción- se consideran aceptables. Se trataron aspectos cuánticos fundamentales como, descripción probabilística, sistema cuántico, principio de superposición y principio de correspondencia y los estudiantes no fueron superados por las situaciones propuestas y enfrentaron todas las situaciones de la secuencia. La aproximación cuántica construida a partir del modesto conjunto de instrumentos conceptuales de los estudiantes, es producto del proceso de investigación y desarrollo didáctico que consiste en la delimitación y organización del saber de referencia relativo a la adopción del enfoque de Feynman (ECR) desde dentro del campo conceptual de la Mecánica Cuántica considerando la institución a la que será exportado. Luego, se realizó el diseño de la secuencia y su análisis a priori (ECPE) y se reconstruyó la ECR luego de la fase de implementación. El hecho de que los estudiantes pudieran completar la secuencia y aceptaran los desafíos y esfuerzos planteados, son indicadores de la viabilidad de la secuencia. Es importante que con las modestas herramientas físicas y matemáticas a disposición de los estudiantes, los obstáculos fueran sorteados. También es destacable que frente a la realidad del sistema educativo argentino, donde las horas dedicadas al estudio de la Física han sido progresivamente reducidas, se puedan introducir nociones cuánticas en 12 encuentros de dos horas semanales cada uno.

El diseño es adaptable, pues si los estudiantes dispusieran de un conocimiento más sólido de los fenómenos ondulatorios, la secuencia permite aprovecharlos para producir asociaciones fecundas con relación a la longitud de onda. Y si este no es el caso y las nociones ondulatorias no se disponen, aun así es posible a través de la propuesta enfatizar el papel de la constante de Planck en el análisis de la transición cuántico-clásico y estudiar el principio de correspondencia. Se han previsto nuevas implementaciones con ajustes y mejoras para estudiar su viabilidad ecológica en un contexto más amplio. Actualmente, se está trabajando en la ampliación de la ECR construida con base

en el comportamiento cuántico del electrón, para introducir rigurosamente y con sentido para el estudiante la noción de fotón, con el objetivo de ofrecer una visión del comportamiento cuántico de la luz.

Bibliografía

Arlego, M. (2008) Los fundamentos de la mecánica cuántica en la escuela secundaria utilizando el concepto de integral de camino *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, 3(1), 59-66 [En línea] Obtenido de http://www.exa.unicen.edu.ar/reiec/?q=es/anio3_num1

Ausubel, D. P., Novak, J. D. & Hanesian, H. (1983). *Psicología educativa: un punto de vista cognoscitivo*. Editorial Trillas, México

Cabral de Paulo, I y Moreira, M A (2005) Um Estudo Sobre A Captação Do Significado Do Conceito De Dualidade Onda-Partícula Por Alunos Do Ensino Médio *Enseñanza de las Ciencias*, Número extra.

Chevallard Y. (1992) Concepts fondamentaux de la didactique: Perspectives apportées par une approche anthropologique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*. 12(1), pp. 73-112.

Chevallard, Y. (1997) Familière et problématique, la figure du professeur. *Recherches en Didactique des Mathématiques*. 17 (3), pp. 17-54.

Chevallard, Y. (1999) L'analyse des pratiques enseignantes en théorie anthropologique du didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, Vol. 19 (2) pp. 221-265.

Cohen-Tannoudji, C; Diu, B y Laloe, F (1977) *Quantum mechanics* New York : Wiley-interscience.

Cuppari, A, Rinaudo, G, Robutti, O y Violino, P (1997) Gradual introduction of some aspects of quantum mechanics in a high school curriculum, *Physics Education* 32, 302-308

Damasio, A. (2001) *El error de Descartes*. Editorial Crítica, Barcelona. Original (1994) *Descartes' s Error. Emotion, Reason and the Human Brain*. Putnam Book, NY.

Damasio, A. (2005) *En busca de Spinoza. Neurobiología de la Emoción y los Sentimientos*. Editorial Crítica, Barcelona.

Dowrick, N J (1997) Feynman's sum-over-histories in elementary quantum mechanics *Eur. J. Phys.* 18, 75-78.

Fanaro, M. (2009) La enseñanza de la Mecánica Cuántica en la Escuela Media, Tesis Doctoral.

Fanaro, M., Arlego, M., Otero M. R (2006) Los caminos múltiples de Feynman y la mecánica cuántica en la escuela media *Actas del 8 Simposio de Investigación en Educación en Física* (pp161-169)- Asociación de Profesores de Física de la Argentina (APFA).

Fanaro, M, Otero, M, R, Moreira, M. A (2007) Estructura Conceptual Propuesta para Enseñar los fundamentos de la Mecánica Cuántica en la escuela *Actas del V Encuentro Internacional sobre Aprendizaje Significativo*. Indivisa, Boletín de Estudios e Investigación, Monografía VIII, pp. 189-201. Madrid.

Fanaro, M., Arlego, M., Otero, M. R., (2007). El método de caminos múltiples de Feynman para enseñar los conceptos fundamentales de la Mecánica Cuántica en la escuela secundaria, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* 22, 233-260

Fanaro, M., Otero, M. R Arlego, M. (2007) Software de simulación y reconstrucción de fundamentos de la mecánica cuántica en la escuela *Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología* N° 2, 4-12

Fanaro, M., Otero, M. R; Arlego, M (2007) Nociones matemáticas necesarias para reconstruir fundamentos de la mecánica cuántica en la escuela: la importancia de los vectores y los números complejos. *Acta I Encuentro Nacional sobre Enseñanza de la Matemática*, Argentina (pp.297-309)

Fanaro, M., Otero, M. R., (2008) Basics Quantum Mechanics teaching in Secondary School: One Conceptual Structure based on Paths Integrals Method *Lat. Am. J. Phys. Educ.* 2(2), 103-112. [En línea] Obtenido de <http://journal.lapen.org.mx/may08/LAJPE%20149F-Fanaro%20Otero.pdf>

Fanaro, M; Otero, M R; Arlego, M. A (2009) "Teaching the foundations of quantum mechanics in secondary school: a proposed conceptual structure" *Investigações em Ensino de Ciências – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, BRASIL.* ISSN 1518-8795 V14(1), pp. 37-64.

Fanaro, M; Otero, M R; (2009) Teoremas en acto y situaciones de Mecánica Cuántica en la Escuela Media *Latinamerican Journal of Physics Education* 2 (2) pp. 24-33. ISSN 1870-9095. <http://www.journal.lapen.org.mx/may09>.

Feynman, R (1965) *El carácter de la ley Física*. Tusquets Editores.

Feynman, R (1985) *QED The strange theory of light and matter*. Penguin Books. Princeton University Press, USA

Feynman, R y Hibbs A (1965) *Quantum Mechanics and Path Integrals*. McGraw-Hill, Inc. USA

Fischler y Lichtfeldt (1992) Modern Phisycs and students' conceptions. *International Journal of Science education* 14(2):181-190

Freire J R, O, Carvalho Neto, R. A. de, Rocha, J. F. M., Vasconcelos, M., J. L., Socorro, M., Anjos, E. L. (1995). *Introducing quantum physics in secondary school*. Salvador: Instituto de Física – UFBA

Goldstein, H (1966) *Mecánica Clásica*. Madrid : Aguilar.

González, E. Fernández, P y Solbes, J (2000) Dificultades de docentes de ciencia en la conceptualización de temas de física actual. *Actas del V Simposio de Investigación en Educación en Física, Tomo 1*.138-147. Argentina.

Gowin, D.B (1981). *Educating*. Ithaca, N.Y., Cornell University Press. Traducción al español: *Hacia una teoría de la educación*. Ediciones Aragón. Argentina

Greca, I (2000) *Construindo Significados Em Mecânica Quântica: Resultados De Uma Proposta Didática Aplicada A Estudantes De Física Geral*. Tesis Doctoral.

- Greca, I & Moreira, M.A (2004) Obstáculos representacionales mentales en el aprendizaje de conceptos cuánticos. En Moreira, M A. (2003) *Sobre el cambio conceptual, obstáculos representacionales, modelos mentales, esquemas de asimilación y campos conceptuales*. (pp. 26-40) Instituto de Física. UFRGS, Brasil.
- Greca, I; Moreira, MA y Herscovitz, V (2001) Uma Proposta para o Ensino de Mecânica Quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. 23(4), 444-457.
- Greiner, W (1994) *Quantum mechanics; an introduction* Berlin : Springer-Verlag,
- Hadzidaki, P (2008) 'Quantum Mechanics and Scientific Explanation' An Explanatory Strategy Aiming at Providing 'Understanding' *Science & Education* 17:49-73
- Hanc, J y Tuleja, S (2005) The Feynman Quantum Mechanics with the help of Java applets and physlets in Slovakia. En actas del 10th *Workshop on Multimedia in Physics. Teaching and Learning*. Berlin. [En línea] Obtenido de http://pen.physik.uni-kl.de/w_jodl/MPTL/MPTL10/contributions/hanc/Hanc-Tuleja.pdf
- Hobson, A (2000) Teaching "Modern" Physics in Introductory Courses. *The Physics Teacher* 38, Letters to the Editor
- Hobson, A (2005). Electrons as field quanta: A better way to teach quantum physics in introductory general physics courses. *Am. J. Phys.* 73 (7) 630-634
- Jones (1991) Teaching modern physics- misconceptions of photon can damage understanding. *Physics Education*, 26 , 93-98
- Klimovsky, G. & Boido, G. (2005). *Las desventuras del conocimiento científico*. AZ Editora. Buenos Aires, Argentina.
- Kragh, H. (1992) A sense of history: history of science and the teaching of introductory quantum theory. *Science & Education*, Dordrecht, v. 1, p. 349-363, 1992.
- Landau, L y Lifshitz; E. M (1978) *Mecánica cuántica no-relativista* Barcelona: Reverte.
- Lawrence I. (1996) Quantum physics in school. *Physics Education*, Bristol, v. 31, n. 5.
- Lobato, T y Greca, I (2005) Análise da inserção de conteúdos de teoria quântica nos currículos de física do ensino médio. *Ciencia & Educação*, 11(1), 119-132
- Mashaddi, A (1998) Instructional Design for the 21 st Century Towards a New Conceptual Framework. Paper presented at the International Conference on Computers in Education. Beijing, China. [En línea]. Obtenido de la base ERIC: http://eric.ed.gov/ERICDocs/data/ericdocs2sql/content_storage_01/0000019b/80/17/87/b9.pdf
- Mashaddi, A (2000) 21 st Century Thinking and Science Education. Paper presented at the International Conference on Thinking. Singapur. [En línea]. Obtenido de la base ERIC: http://eric.ed.gov/ERICDocs/data/ericdocs2sql/content_storage_01/0000019b/80/15/13/82.pdf
- Maturana, H. R. (1990) *Emociones y Lenguaje en Educación y Política* Editorial Dolmen, España.
- Maturana, H. R. (1991) *El Sentido de lo Humano*. Editorial Dolmen, España.
- Maturana, H. R. (1995) *La realidad ¿objetiva o construida? I y II. Fundamentos biológicos de la realidad*. Ed. Anthonopos/Universidad Iberoamericana/ Iteso. México.
- Maturana, H. R. (2001) *Cognição, Ciência e Vida Cotidiana*. Editorial UFMG, Brasil.
- Merzbacher, (1970) *Quantum mechanics* New York : J Wiley.
- Messiah, A (1973) *Mecánica cuántica* Madrid : Tecnos.
- Montenegro, R. L. y Pessoa Jr., O. (2002) - Interpretações da teoria quântica e as concepções dos alunos do curso de física – *Investigações em Ensino de Ciências*, 7,(2), Obtenido en mayo de 2006 de <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/revista.htm>
- Moreira M. A. A (2002) Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud, o Ensino de Ciências e a pesquisa nesta área. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, V. 7, n. 1, p. 7-30
- Moreira, M. A. (2005). *Aprendizagem significativa crítica*. Porto Alegre, Brasil.
- Moreira, M. A. y Greca, I. (2000) Introdução a Mecânica Quântica: seria o caso de evitar a aprendizagem significativa (subordinada)? Em *Atas do III Encontro Internacional sobre Aprendizagem Significativa*, Peniche, Portugal.
- Moreira, M. A. y Lang da Silveira, F. (1993) Instrumentos de pesquisa em ensino e aprendizagem: a entrevista clínica e a validação de testes de papel e lápis- (EDIPUCRS, Porto Alegre)
- Müller, R y Wiesner, H (2002) Teaching quantum mechanics on an introductory level *American Journal of Physics*, (70) 3 200-209.
- Niedderer, H y Deylitz, S. (1999) Evaluation of a new approach in quantum atomic physics in high school. In: Annual Meeting National Association For Research In Science Teaching, Boston. *Collection of papers presented*. Disponible en internet: www.phys.ksu.edu/perg/papers/narst
- Novak, JD. & Gowin, DB. (1988) *Aprendiendo a aprender*. Madrid: Alianza Editorial Martínez Roca.
- Ogborn, J (1970) Introducing quantum physics *New Trends in Physics Teaching Volume 2 Paris: UNESCO* 436-443
- Olsen, R (2002) Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway *International Journal of Science Education* 24(6), 565-574
- Osterman, F & Moreira, M (2000) Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa "física moderna e contemporânea no ensino médio *Investigações em ensino de ciências*. 5(1) Obtenida en mayo de 2006 de http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol5/n1/v5_n1_a2.htm

- Osterman, F y Ricci, T (2004) Construindo uma unidade didáctica conceitual sobre mecánica cuántica: um estudo na formação de profesores de física. *Ciência & Educação*, 10, (2) 235-257. [En línea] Obtenido en Junio de 2006 de <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol7/Num1/v12a07.pdf>
- Osterman, F; Prado, S y Ricci, T (2006) Desenvolvimento de um software para o ensino de Fundamentos de Física Quântica *A Física na Escola*. São Paulo, 7(1): 22-25
- Osterman, F; Prado, S y Ricci, T (2008) Investigando A Aprendizagem De Professores De Física Acerca Do Fenômeno Da Interferência Quântica. *Ciência & Educação*, 14(1) 35-54
- Otero, M. R. (2006) *Emociones, sentimientos y razonamientos en Didáctica de las Ciencias*, Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias, 1(1) 24-53 [En línea] Obtenido de http://www.exa.unicen.edu.ar/reiec/files/anio1/num1/REIE_C_anio1_num1_art3.pdf.
- Otero M R (2007) Emociones, sentimientos y razonamientos en Educación Matemática *Acta I Encuentro Nacional de Enseñanza de la Matemática: perspectiva Cognitiva, Didáctica y Epistemológica*. (Acta I ENEM. pp. LXXXII-CV). Tandil, Buenos Aires, Argentina.
- Paulo, I.J.C. & Moreira, M. A (2004) Abordando conceitos fundamentais da mecânica quântica no nível médio. En *Actas del II Encuentro Iberoamericano sobre Investigación Básica en Enseñanza de las Ciencias*, España.
- Paulo, I.J.C. (2006) A Aprendizagem Significativa Crítica de Conceitos da Mecânica Quântica Segundo a Interpretação de Copenhague e o Problema da Diversidade de Propostas de Inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Tesis Doctoral.
- Pereira de Pereira (2008) Fundamentos de física quântica na formação de profesores: uma análise de interações discursivas em atividades centradas no uso de um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. Tesis de maestría, Obtenida en Internet: <http://www.bibliotecadigital.ufrgs.br/da.php?nrb=000631479&loc=2008&l=2649039b325c30f3>
- Pessoa Jr, O. (1997) Interferometria, interpretação e intuição: uma introdução conceitual à Física Quântica *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 19 (1) 27-47.
- Pinto, A.C. y Zanetic, J. (1999) – É possível levar a Física Quântica para o Ensino Médio? *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 16(1), 7-34.
- Posner G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., Gertzog, W. A. (1982) Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change. *Science Education*, New York, v. 66, n. 2.
- Ryder L. Quantum field theory. Cambridge University Press, 1996.
- Shankar, R (1980) *Quantum Mechanics*. Plenum Press, New York.
- Simas Alvetti, M A (1999) *Ensino de física moderna e contemporânea e a revista ciência hoje*. Florianópolis, 1999. Dissertação (Mestrado em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Stamatis V; Shaffer, P; Ambrose B, y McDermott L. (2000) Student understanding of the wave nature of matter: Diffraction and interference of particles *Phys. Educ. Res., Am. J. Phys. Suppl.* 68 (7) S42-S51
- Strnad, J (1981) Pitfalls in the teaching of introductory quantum physics. *European Journal of Physics* 2, Letters and comments 250-254
- Strnad, J (1981) Quantum physics for beginners *Physics Education*, V16: 88-92.
- Styer, D. F. (2000) *The Strange World of Quantum mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, [En línea] Obtenido de <http://www.oberlin.edu/physics/dstyer/StrangeQM/>
- Taylor, E (2000) *Demystifying QM Quantum Mechanics Workbook*. [En línea] Disponible en <http://www.eftaylor.com/>
- Taylor, E. (2003) A call to action *American Journal of Physics*, 71(5), 423-425. Guest Editorial
- Taylor, F; Stamatis Vokos, S ; O'Mearac, J y Hornberd, N (1998) Teaching Feynman's sum-over-paths quantum theory. *Computers in Physics*, 12 (2), 190-199.
- Vergnaud, G. (1990) La théorie des champs conceptuels, *Recherches en Didactique des Mathématiques*. 10 (2/3), pp.133-170. La Pensée Sauvage, Marseille
- Vergnaud, G. (1992) Qu'est-ce que la didactique ? En quoi peut-elle intéresser la formation des adultes peu qualifiés. in G. Vergnaud. *Education Permanente*. N° 111. 19-31.
- Vergnaud, G. (2000) Apprentissage et didactique en formation professionnelle. In J.C. Ruano-Borbalan et M. Fournier (Eds) *Savoirs et compétences*. Les Editions Demos.
- Vergnaud, G. (1992) Conceptual Fields, Problem-Solving and Intelligent Computer-Tools. in E. De Corte, M. Linn, H. Mandl and L. Verschaffel (Eds). *Computer-based learning environments and problem-solving*. Berlin, Springer.
- Vergnaud, G (2005) en *Sur la théorie des situations didactiques*. Hommage a Guy Brousseau. La Pensée Sauvage, Ádition.
- Vergnaud, G. (2008) *Functions, concepts and schemes*. A reply to Rita Otero. (Comunicación personal)
- Holman, D (1999) Research on teaching and learning quantum mechanics Papers presented at the *Annual Meeting National Association For Research In Science Teaching (NARST)*. [En línea] Disponible en http://web.phys.ksu.edu/papers/narst/QM_papers.pdf.

Dra. Maria Rita Otero

Doctor por la Universidad de Burgos (Enseñanza de las Ciencias). UBU-UFRGS, 2003.
Magister en Educación. Orientación Psicología de la Educación. UNICEN-UNICAMP, 1998.
Profesor en Matemática y Física. Facultad de Ciencias Exactas. UNICEN, 1983.

Temas de Interés: Enseñanza de las Ciencias (Matemática y Física). Conceptualización en Ciencias (Matemática y Física). Educación Media y Superior.

Posición Actual: Investigador Adjunto CONICET. Profesor Asociado Ordinario de la Facultad de Ciencias Exactas. UNCPBA. Director Núcleo de Investigación en Enseñanza de las Ciencias. Facultad de Ciencias Exactas. Coordinadora del Programa de Posgrado en Enseñanza de las Ciencias de la Facultad de Ciencias Exactas de la UNCBA.