

ANÁLISIS DE LA CONCEPTUALIZACIÓN DE UN GRUPO DE ESTUDIANTES DE ESCUELA SECUNDARIA AL ABORDAR SITUACIONES DE MECÁNICA CUÁNTICA

Maria de los Ángeles Fanaro^{1;2}; *Maria Rita Otero*^{1;2}; *Marcelo Arlego*^{2;3}

¹ NIECyT- Departamento de Formación Docente- UNCPBA- Argentina

² CONICET- Argentina.

³ Instituto de Física- UNLP -Argentina.

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

Resumen

Presentamos una síntesis del trabajo de tesis que aborda el problema de la enseñanza de conceptos fundamentales de Mecánica Cuántica en la escuela media (Fanaro, 2009). Allí, elaboramos una estructura conceptual de referencia relacionada con el enfoque de la Mecánica Cuántica de Feynman “*Path Integrals*” o “Caminos Múltiples” adoptando los lineamientos didácticos propuestos en Otero (2006; 2007). Implementamos la propuesta en cursos de escuela media, y analizamos su viabilidad y adaptabilidad institucional. Presentamos aquí los resultados relativos a la conceptualización de los estudiantes, describiendo algunos teoremas y conceptos en acto que los estudiantes utilizaron al abordar las primeras situaciones planteadas en la secuencia.

Palabras clave: conceptualización, teoremas y conceptos en acto, electrón, sistema cuántico.

Definición del problema y marco teórico

El enfoque de la Mecánica Cuántica de Feynman “Caminos Múltiples”, es alternativo y complementario al enfoque canónico. Partimos de la Física Clásica -cuyos conceptos son familiares a los estudiantes- y propusimos analizar y fundamentar la transición entre la Mecánica Cuántica y la Clásica. Adaptamos la formulación matemática de la Integral de Camino al conocimiento matemático de los estudiantes empleando un marco geométrico-vectorial. Luego aplicamos la técnica para explicar los resultados que se obtienen en la Experiencia de la Doble Rendija (EDR). El diseño produce la emergencia de las ideas de los estudiantes - electrones como “pequeñísimas bolillas”- y permite establecer que el concepto de sistema cuántico asociado a la técnica de *Caminos múltiples* explica la distribución de probabilidad de los electrones, que no puede derivarse desde las ideas clásicas. El análisis didáctico previo nos condujo a la elección del caso del electrón libre como un ejemplar que reúne las características de los sistemas cuánticos, y nos permitió aplicar la técnica a la disposición experimental de la EDR, de manera relativamente sencilla. Así, fue posible modelizar la curva de probabilidad obtenida en la simulación de la experiencia y explicar el patrón de interferencia. Estudiamos la conceptualización utilizando la Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud (1990). En este marco teórico, la noción de esquema y de concepto de Vergnaud se fundamentan en la forma operatoria y en los aspectos implícitos de la conceptualización como en su forma predicativa, en la cual el lenguaje tiene un papel central. Nuestro análisis se fundamenta en la importancia de estudiar la actividad en situación, es decir: la acción, la selección de información que el sujeto

considera pertinente, los invariantes operatorios, las reglas de acción y los instrumentos o mecanismos de control que utiliza. (Vergnaud, 2010)

Metodología

Utilizando la noción de situación propuesta por la TCC desarrollamos un conjunto de situaciones de enseñanza organizadas en una secuencia didáctica, para enseñar el comportamiento cuántico de los electrones a los estudiantes de la escuela secundaria (Fanaro, Otero, Arlego, 2007a, 2007b, 2009). Los conceptos e ideas principales que la secuencia pretende abordar son:

1. Forma de la distribución de probabilidad $P(x)$ para pequeñas bolas y para electrones realizando la experiencia de la doble rendija.
2. El electrón como el sistema cuántico.
3. La noción de acción (S), la construcción del vector amplitud de probabilidad, y la construcción de la suma de todas las alternativas de funciones posición-tiempo (técnica STA).
4. Análisis de funciones alrededor de la función clásica ($x_{\text{clás}}(t)$) calculando la probabilidad total en los casos cuánticos y en los casos clásicos.
5. La transición cuántico-clásico.

Implementamos la secuencia en un curso de Física de treinta (30) estudiantes de edad promedio 17 años, en una escuela media de la ciudad de Tandil, durante quince encuentros áulicos incluyendo las instancias de síntesis y evaluación, aunque la investigadora permaneció todo el año en el campo como profesora del curso. Durante las clases los estudiantes tuvieron un protagonismo central, interactuando, consensuando y formulando respuestas escritas en grupos de trabajo. Además, de momentos de síntesis, puesta en común y consenso con todo el grupo de clase.

Todas las clases durante el desarrollo de la secuencia fueron registradas en audio, y se recogieron todas las producciones escritas de los estudiantes. Los datos permitieron identificar algunos invariantes operatorios (I.O.) que los estudiantes usaron para enfrentar cada situación. De esta forma analizamos los obstáculos en el proceso de conceptualización, y proponemos ayudas para evitarlos.

Resultados

El diseño de las situaciones es un proceso complejo, debido a la multiplicidad de decisiones que hay que tomar con relación a: ¿Cuáles conceptos y principios pueden enseñarse a los estudiantes? ¿Cuáles cuestiones y problemas parecerían ser las más apropiadas para la conceptualización? ¿Cuáles inferencias podrían hacerse? ¿Cuáles representaciones de los conceptos serán evitados? ¿Cuáles acciones y actividades esperamos de los estudiantes? ¿Cuáles serán posibles? En la fase de diseño anticipamos las preguntas clave de la situación, y también las respuestas posibles de los estudiantes y del profesor a las cuestiones propuestas, los conceptos clave, y las acciones requeridas. También anticipamos los posibles teoremas y conceptos en acto que podrían ser utilizados por los estudiantes, y las posibles inferencias que realizarían. Luego de la implementación analizamos lo ocurrido en relación a lo esperado, tomando en consideración algunos de los componentes de los esquemas (Vergnaud, 1990): interpretamos qué selección de la información posiblemente realizaron y algunos de los teoremas en acto posiblemente utilizados por los estudiantes. También identificamos los mecanismos de control que pareciera que utilizaron los estudiantes y de acuerdo a éstos, que inferencias o explicaciones lograron formular.

La Experiencia de la Doble Rendija (EDR) es muy importante en la Física, dado que ha sido y es un dispositivo experimental que permite apreciar tanto el carácter clásico como el cuántico, para la luz y los electrones. Planteamos a los estudiantes utilizando un software de simulación disponible. Previamente decidimos cuales variables serían controladas y cuáles valores serían adoptados para direccionar la conceptualización. Entre otras, propusimos dos situaciones consecutivas: Situación 1 "*Imaginando la experiencia de la doble rendija con pequeñas bolillas*" y Situación 2 "*Simulación de la EDR utilizando un software*". En la primera, presentamos a los estudiantes un esquema de la EDR sin software, donde ellos tenían que imaginar y anticipar los resultados de arrojar pequeñas bolillas al azar, que a continuación se encontraban con una pared con dos rendijas. Los estudiantes tenían que predecir la distribución de los impactos de las pequeñas bolillas sobre la pared colectora y la distribución de las frecuencias, con relación a la distancia en el centro de la pared (la abscisa). Luego, junto con el profesor, ellos analizaron que en el límite, la frecuencia tiende a la probabilidad. Llamamos Curva de Probabilidad a la curva obtenida al representar gráficamente la probabilidad de encontrar una bolilla, en cierta distancia del centro de la pared colectora. Les solicitamos a los estudiantes realizar gráfico de $P(x)$ y luego, para construir el concepto de suma (o la no pertinencia de la suma cuando la experiencia se realiza con electrones) de las curvas de probabilidad, propusimos realizar la experiencia bloqueando el paso de las bolillas por una rendija por vez, y comparar los resultados. En la Situación 2, propusimos a los estudiantes analizar los resultados con el software de simulación, y realizarla con electrones en lugar de bolillas. Por cuestiones de espacio y a modo de ejemplo del análisis realizado, presentamos el análisis previo y posterior de estas dos primeras situaciones:

Análisis Previo de la Situación 1

<i>Preguntas clave</i>	<i>Acciones requeridas</i>	<i>Conceptos clave</i>	<i>Teoremas en acto esperados</i>	<i>Explicaciones e inferencias esperadas</i>
¿Cómo es la distribución de las bolillas en la pared de madera?	Imaginar la experiencia para anticipar resultados. Dibujar los impactos de las bolillas en la pared.	Distribución de impactos. Curva de probabilidad. Máximos de la curva $P(x)$.	Las rendijas son un obstáculo para el reparto uniforme de las pequeñas bolas en la pared.	Las pequeñas bolillas son lanzadas de a una, pero existe una zona donde es más probable encontrar los impactos, que corresponde a la proyección de las rendijas en la pared.
¿Cómo se representa la distribución según el eje x ?	Graficar la curva de probabilidad en función del centro de la pared.		La probabilidad de impacto es mayor donde hay una cantidad mayor de impactos.	En el límite, la fracción (N° de pequeñas bolas que caen a una distancia x del centro de la pared) / N) representa la probabilidad.
¿Cómo se relaciona esta distribución con la distribución obtenida al cerrar de a una rendija por vez?	Comparar las curvas dibujadas cuando se abre una rendija por			Habrán dos curvas correspondientes a cada rendija. La curva de

	vez, y en simultáneo.			probabilidad es la superposición de las curvas individuales
--	-----------------------	--	--	---

Análisis Posterior de la Situación 1

<i>Selección de la información</i>	<i>I.O. utilizados</i>	<i>Instrumentos de control</i>	<i>Inferencias realizadas</i>
<i>La emisión aleatoria</i>	<i>T₁: Si los procesos son aleatorios, entonces no hay ley de probabilidad</i>		<i>Las bolillas se distribuirán uniformemente sobre la pared.</i>
<i>La fracción N° de bolillas que arriban a una distancia "x" del centro de la pared/N° de bolillas en total</i>	<i>T₂: Aunque las bolillas son disparadas al azar, siguen una ley de probabilidad</i>	<i>Comparación entre las representaciones pictóricas externas, con su descripción y con el resultado imaginado</i>	<i>Como hay dos rendijas, las bolillas copian la forma en la pared de Madera y formarán "dos columnas de concentración de los impactos"</i>
<i>Las rendijas están demasiado separadas y entonces los efectos no se superponen en el centro.</i> <i>Las rendijas se encuentran muy juntas</i>	<i>T₃: El número de máximos es proporcional al número de rendijas</i> <i>T₄: Hay superposición de efectos individuales en el centro</i>		<i>Hay un máximo de probabilidad en el centro</i>

Discusión:

Cuando los estudiantes tuvieron que anticipar los resultados de la EDR, una gran parte utilizó inicialmente el teorema en acto de la distribución uniforme T_1 y lo siguió utilizando varias veces, como si la presencia de las rendijas no afectara el viaje de las bolillas hacia la pared colectora. Inferimos a partir de las conversaciones de los estudiantes, que posiblemente este teorema haya sido evocado por la expresión “las

bolillas son disparadas al azar”. Los estudiantes tenían que abandonar el teorema T_1 para entender que las rendijas evitan una distribución uniforme de los impactos sobre la pared. Después de introducir la definición de probabilidad, cuando los estudiantes tuvieron que representar gráficamente la curva de distribución de probabilidad, la evidencia de la que disponemos indica que solo utilizarían T_2 .

Reconocer la presencia de las rendijas y su influencia en la distribución de impactos, (T_2) era fundamental para entender la ley de probabilidad y poder concluir que esta ley es muy diferente cuando se utilizan electrones en lugar de bolillas. Algunos estudiantes no habían focalizado en el azar, y usaron el teorema T_2 desde el principio, tendiendo hacia las ideas probabilísticas. Ellos pensaron que las pequeñas bolillas serían concentradas en los ciertos sitios de la pared y no distribuidas sobre la pantalla entera.

Interpretamos que los estudiantes atribuyen la forma de la curva de probabilidad a la presencia de las rendijas, bien colocando uno, o dos máximos, esto es utilizando T_3 ó T_4 . De esta forma, estaban muy cerca de conceptualizar a la curva de probabilidades como suma de curvas, a partir de la consideración de superposición de efectos en el centro. Es importante destacar que los estudiantes llegaron a esas conclusiones a partir del análisis cualitativo de la experiencia, antes de realizar la simulación. Por otro lado, los protocolos muestran que los teoremas en acto referidos, son inestables y que la necesidad de dar una respuesta escrita común, genera un consenso que también es inestable. Sin embargo, desde un punto de vista didáctico las conclusiones de los estudiantes satisfacen las anticipaciones realizadas en el diseño de la secuencia.

Análisis Previo de la Situación 2

<i>Cuestiones clave</i>	<i>Acciones requeridas</i>	<i>Conceptos clave</i>	<i>Teoremas en acto esperados</i>	<i>Explicaciones e inferencias esperadas</i>
<p>¿Cómo se puede explicar la forma de $P(x)$?</p> <p>Cómo es la relación entre las curvas individuales y la curva con ambas rendijas abiertas?</p> <p>¿Qué relación hay entre las curvas individuales y la curva que se genera cuando se abren ambas rendijas?</p>	<p>Contrastar las predicciones con la simulación.</p> <p>Variar y controlar los parámetros ancho y separación de las rendijas.</p> <p>Cerrar de a una rendija por vez y analizar lo que ocurre.</p> <p>Describir las curvas obtenidas con electrones.</p> <p>Diferenciar las</p>	<p>Histograma de frecuencias</p> <p>Curva de probabilidad</p> <p>Suma de curvas</p> <p>Máximos y Mínimos de $P(x)$</p>	<p>Si las rendijas están cerca, en el centro habrá un máximo de concentración.</p> <p>En cambio, si las rendijas están separados, habrá dos máximos en la curva</p> <p>Los electrones son como pequeñas bolillas.</p>	<p>Para las bolillas, la curva obtenida con ambas rendijas abiertas tiene un máximo en el centro debido a la superposición de las curvas individuales.</p> <p>La experiencia debe dar resultados similares si se realiza con electrones o con bolillas.</p>

¿Qué se obtiene en la EDR si se realiza con electrones?	curvas obtenidas con electrones y las obtenidas con bolillas.			
---	---	--	--	--

Análisis Posterior de la Situación 2

<i>Selección de la información</i>	<i>I.O. utilizados</i>	<i>Instrumentos de control</i>	<i>Inferencias realizadas</i>
<i>Las rendijas se mantienen y sólo se cambia bolillas por electrones</i>	<i>T5: “Los electrones son pequeñísimas bolillas”</i>	<i>Observación del máximo central de la curva $P(x)$ sin notar la presencia de otros máximos relativos.</i>	<i>Los resultados de la EDR son los mismos se trate de electrones o de pequeñas bolillas.</i>
<i>Los electrones pertenecen al campo de la química.</i>	<i>T6: “Los electrones son partículas especiales”</i>	<i>Observación de electrones distribuidos en toda la pantalla</i>	<i>Los electrones pueden “atravesar” la pared blindada, porque tienen una cualidad muy especial: atravesar barreras. Es como si la pared no estuviera, entonces los electrones van a estar distribuidos por toda la pantalla colectora.</i>

Discusión:

Los estudiantes que utilizaron T6 predijeron una distribución uniforme. Cuando vieron la simulación, ellos se vieron confundidos porque el teorema en acto utilizado no podía explicar lo que les mostraba el software. Al haber notado que los impactos se encontraban por toda la pared colectora, recurrieron a la explicación que los electrones “atravesan la pantalla y son distribuidas de este modo”. Ellos no podían notar que había zonas de la pantalla que no tenía ningún impacto, ni relacionaron este modelo con los conceptos de onda, que claramente no estaban disponibles en ese momento.

Para otros estudiantes, como el electrón es considerado una partícula pequeñísima (T5) la experiencia seguiría enmarcada en mecánica, y no habría ninguna razón para pensar una explicación basada en conceptos ondulatorios. De esta forma, no percibieron los mínimos en la curva de probabilidad mostrada por el software, y fue el profesor quien los debió señalar. Esto muestra la importancia de las ayudas a la conceptualización que en este caso, solo podía dar el profesor, quien al intervenir, redujo el oportunismo que caracteriza al proceso de conceptualización. Además, el profesor trajo a consideración de la clase las siguientes ideas

- Las rendijas afectan la distribución de los electrones, y en ese caso, no se copia la forma de las rendijas, porque los electrones no son bolillas pequeñísimas.
- Los electrones son caracterizados como “sistemas cuánticos” indicando de ese modo su comportamiento particular y propio, que es muy diferente al comportamiento de los objetos macroscópicos y las partículas. De aquí se establece la necesidad para buscar una explicación de la forma de la curva obtenida que no se puede alcanzar sumando curvas individuales.

En síntesis, a pesar del escaso conocimiento de los estudiantes acerca del álgebra de funciones, (en este caso la suma) ellos lograron, con la mediación del profesor, realizar

inferencias relevantes, y necesarias para la conceptualización de los aspectos fundamentales de mecánica cuántica que la secuencia pretendía enseñar.

Conclusiones

El análisis realizado muestra la génesis conceptual que la secuencia consiguió generar. Focalizamos en algunos de los teoremas y conceptos en acto identificados durante el encuentro de los estudiantes con cada situación, lo que debe entenderse en el contexto de la complejidad del estudio del proceso de conceptualización. Las acciones dirigidas por estos invariantes operatorios, son sistemáticas y se producen en el devenir de la historia cognitiva de los estudiantes. Uno de los ejemplos más representativos de esto es la reiterada utilización por parte de los estudiantes del teorema en acto que concibe a los electrones como pequeñísimas bolillas. Este teorema en acto, construido y utilizado durante años en la escuela y en los medios, también tiene un correlato mental imagístico y otro pictórico externo, que parecen inevitables. Su origen puede rastrearse y documentarse en múltiples textos de física y de química, pero en lugar de negar las ideas de los estudiantes la propuesta las acepta, las explicita y las usa para hacer emerger las ideas cuánticas.

Las replicaciones 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 antes comentada. 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 usados son otros. En consecuencia, las situaciones no pueden ser producto de la improvisación, sino que son resultado de un proceso de diseño, de análisis didáctico previo muy pormenorizado 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 tienen muchas dificultades para percibir 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-. Probablemente se podría sortear este obstáculo si durante su estadía en la escuela, trabajáramos la idea de 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, sino intentos hipotéticos de explicar y predecir los fenómenos observados.

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 [On line] http://www.exa.unicen.edu.ar/reiec/?q=es/anio3_num1

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] <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 (2009) La enseñanza de la Mecánica Cuántica. Tesis Doctoral. Universidad de Burgos (España)

Fanaro, M; Otero, M R; Arlego, M. A (2011) Teaching Basic Quantum Mechanics in Secondary School Using Concepts of Feynman's Path Integrals Method. *The Physics Teacher*. ISSN: 0031-921x (en prensa)

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 [on line]

http://www.exa.unicen.edu.ar/reiec/files/anio1/num1/REIEC_anio1_num1_art3.pdf

Vergnaud, G. (1990) La théorie des champs conceptuels, *Recherches en Didactique des Mathématiques*. 10 (2/3), pp.133-170. La Pensée Sauvage, Marseille