

ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE DE ASPECTOS FUNDAMENTALES DE FÍSICA CUÁNTICA EN LA ESCUELA SECUNDARIA A PARTIR DEL ESTUDIO DE LA LUZ

Mariana Elgue¹; María de los Ángeles Fanaro^{1,2}; María Rita Otero^{1,2}; Marcelo Arlego^{1,2,3}

¹ Núcleo de Investigación en Enseñanza de las Ciencias y la Tecnología (NIECyT).
Facultad de Ciencias Exactas- UNCPBA.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

³ Universidad Nacional de La Plata.

mfanaro@exa.unicen.edu.ar, nanaelgue@gmail.com, rotero@exa.unicen.edu.ar,
marlego@exa.unicen.edu.ar

Resumen

En este trabajo se presenta un análisis de la evaluación que realizaron los estudiantes de cuatro cursos de escuelas secundarias (N=83), al final de la implementación de una secuencia de situaciones relativa a la luz, que adopta el enfoque de la “Suma de Caminos Alternativos” de Feynman para abordar su aspecto cuántico. Las respuestas de los estudiantes fueron categorizadas según sus obstáculos y avances en la conceptualización. Se generaron seis grupos que representan sendos estados de conceptualización, que permiten explicar el aprendizaje de la totalidad de los estudiantes de este trabajo. El análisis, realizado en base a la Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud, permitió identificar un conjunto de posibles teoremas en acto utilizados por los estudiantes para afrontar las situaciones relativas a las nociones cuánticas presentadas en la secuencia de situaciones.

Palabras clave: Conceptualización, Secuencia didáctica, Luz, Caminos múltiples de Feynman, Teoría de los Campos Conceptuales.

Abstract

In this work we analyze the test solved by N=83 students of secondary school, after having implemented a set of situations to teach basic quantum aspects of light based on Feynman's approach "Sum of Alternative Paths". The student's responses were categorized according to the obstacles and advances in the conceptualization in the description of four experiences with light, using an adaptation of the technique of Feynman and in his quantum reformulation. Then six groups of conceptualization, who concentrated types of resolutions that allowed explaining the conceptualizations of all students involved in this study, were generated. The analyses, based on Vergnaud theory of conceptual fields, identified a set of possible theorems in action used by students for dealing with situations, and allowed us to understand the process of conceptualization about the quantum notions presented in the sequence of situations. From the analysis presented in this paper it is possible to know the viability of the sequence.

Keywords: Conceptualization - pedagogical intervention - light- Feynman' multiple paths- Fields Conceptual Theory.

1. Introducción

Ante el problema de enseñar conceptos básicos de mecánica cuántica con sentido para los estudiantes de la escuela secundaria, el enfoque de Caminos Múltiples de Feynman

(1965) ofrece una alternativa para el estudio del comportamiento de los electrones y de la radiación electromagnética, que permite abordar el concepto de probabilidad, central de este campo de la física, ofreciendo así la posibilidad de comprender el carácter fundamental y universal de las leyes de la mecánica cuántica. Su potencialidad reside en la posibilidad de utilizar un marco geométrico-vectorial para calcular probabilidades, que se aplica a un caso simple de emisión y detección de un electrón libre (o luz) y luego los resultados se pueden aplicar a casos más complejos como la Experiencia de la Doble Rendija (EDR), crucial para la Física. Desde hace varios años el equipo de investigación viene trabajando en esta línea, diseñando, implementando y analizando resultados de secuencias de situaciones que emplean el enfoque de Feynman, para estudiantes de la escuela secundaria, tanto para el comportamiento de los electrones, como de la luz. (Fanaro, Otero y Arlego, 2012 a) y b); Fanaro, Arlego, y Otero, 2014, Fanaro, Otero y Elgue, 2014).

Desde el enfoque de Caminos Múltiples de Feynman, adaptado para los estudiantes de la escuela secundaria, el grupo de investigación diseñó e implementó una secuencia de situaciones con N=83 estudiantes de dos escuelas secundarias. Luego de la implementación, los estudiantes realizaron una evaluación escrita, objeto de análisis en este trabajo, que se presenta en el Anexo. Las situaciones que componen la evaluación se diseñaron de forma tal que guardaran estrecha relación con las situaciones presentadas en la secuencia. En este trabajo interesa describir y comprender el dominio de los conceptos relativos al comportamiento cuántico de la luz por parte de los estudiantes, a partir del uso de sus invariantes operatorios en las distintas situaciones que conforman la evaluación.

2. Marco teórico

El análisis de las resoluciones de los estudiantes se realiza en base a la Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud (1990, 1994, 2013). Esta teoría ofrece elementos que permiten analizar el dominio de los conceptos relativos al comportamiento cuántico por parte de los estudiantes, en particular considerando la actividad de los estudiantes en las situaciones durante la evaluación.

Los invariantes operatorios, conceptos y teoremas en acto tienen la función de reconocer y de identificar los objetos, sus relaciones, sus propiedades y sus transformaciones. En esto consiste la función de conceptualización y de inferencia. Un teorema en acto se define como una proposición tenida como verdadera en la actividad. Un mismo concepto en acto puede asociarse a numerosos teoremas diferentes, más o menos complejos y no necesariamente verdaderos, dependiendo del grado de elaboración del concepto. Hay una relación dialéctica entre teorema en acto y conceptos en acto, unos no existen sin los otros. En este sentido, Vergnaud destaca que en las disciplinas científicas y tecnológicas tiene poco sentido decir que un estudiante comprendió un concepto, más bien es importante decir qué teoremas en acto es capaz de utilizar en ésta o aquella situación.

La estructura de la actividad es sistemática porque en numerosas situaciones diferentes se atiene a reglas unívocas (la resolución de una ecuación, el control de una central nuclear, la realización de un procedimiento quirúrgico, etc.). Pero también, la actividad se adapta a las situaciones nuevas, donde es preciso responder a contingencias e imprevistos. En este hecho asombroso que consiste en la capacidad de dar sentido y resolver una situación nueva, los invariantes operatorios cumplen un papel esencial, en el reconocimiento de los objetos, y el establecimiento de relaciones. Ellos emergen en la

interacción del esquema con la situación, bien porque existían antes, porque se recombinaron o se modificaron para generar algo nuevo.

3. Metodología

Previo a la evaluación que se analiza en este trabajo, se implementó una secuencia de situaciones en cuatro cursos públicos de gestión privada del anteúltimo año de la escuela secundaria (16-17 años), durante dos años consecutivos respectivamente. El propósito fue reformular una descripción de los fenómenos relativos a la luz desde el modelo más ampliamente aceptado por la comunidad de los físicos actuales: la teoría cuántica. La Experiencia de la Doble Rendija tiene un rol predominante, y en lugar de utilizarse como comúnmente se lo hace -para comprobar el carácter ondulatorio de la luz en términos de interferencia y difracción- se la propuso para formular una explicación de la experiencia realizada en la clase con los estudiantes, utilizando los conceptos y principios de la mecánica cuántica. (Fanaro, Elgue y Otero, 2016)

Al finalizar la implementación (aproximadamente 20 horas de clase para desarrollar las 13 situaciones) se propuso una última situación, la evaluación escrita, objeto de análisis en este trabajo (Anexo). La misma se formuló de forma análoga a la estructura de la secuencia, con cuatro tipos de situaciones: reflexión especular, refracción de la luz, EDR realizada en clase con la luz de láser doméstico y EDR con llegada discreta. Luego, para analizar las resoluciones de las N=83 evaluaciones de los estudiantes, se elaboraron de forma inductiva, tres categorías que describen los obstáculos y los avances en la conceptualización alcanzada acerca del comportamiento cuántico de la luz, a partir de los lineamientos didácticos y físicos adoptados. Ellas son relativas a: la descripción de las experiencias con luz (DE), el uso de la técnica CCA³⁰ (UT) y la explicación cuántica de las mismas experiencias (EC), considerando los distintos ítems de la evaluación como se presenta en la Tabla 1³¹.

Tabla 1: Categorías de análisis (aspectos de la conceptualización) indicando los ítems de la evaluación considerados para el análisis

	Ítem relativo a reflexión	Ítem relativo a refracción	Ítem relativo a la EDR (analizada con fotografías)		Ítem relativo a la EDR (realizada en clase)
	1	2	3.a)	3.b)	4
DE	X	X	X		X
UT	X	X		X	X
EC	X	X		X	X

Para cada categoría se definen tres subcategorías, considerando que cada modalidad da indicios de la conceptualización alcanzada por los estudiantes en cada aspecto considerado. También para cada categoría se identificaron e infirieron algunos teoremas en acto que posiblemente los estudiantes utilizaron al abordar las situaciones de la evaluación.

a) Descripción de las experiencias con luz (DE)

³⁰ Es enfoque de la “Suma de Caminos Alternativos” de Feynman, en la secuencia presentada a los estudiantes.

³¹ Cada una de las tres categorías se construye con más de un ítem de la evaluación, por lo tanto aquellos ítems en los cuales los estudiantes no respondieron, no inciden directamente en los resultados de la categorización, sino son contemplados en las distintas subcategorías según la importancia en cada aspecto de la conceptualización considerado.

Con esta categoría se analiza cómo los estudiantes realizaron la descripción de las experiencias en las diferentes preguntas de la evaluación. Ello significa analizar si pudieron comprender el diseño experimental de cada experiencia y sus resultados.

Respecto a la subcategoría **DE₁**, se considera que los estudiantes que no hayan logrado describir físicamente las experiencias, al menos desde un marco clásico, difícilmente habrán podido conceptualizar el comportamiento cuántico de la luz ($n=8$). Por su parte, aquellas resoluciones que se sitúan en **DE₃**, al utilizar los conceptos de ángulo de incidencia, de reflexión, de refracción, etc., y además referenciar el carácter discreto de la luz, tendrían condiciones favorables para la conceptualización de la técnica CCA y el aspecto probabilístico ($n=37$).

b) Uso de la técnica (UT)

Con esta categoría se analiza cómo los estudiantes emplearon la técnica CCA para responder las diferentes preguntas de la evaluación. Ello significa analizar si pudieron asociar a cada camino alternativo posible un vector, y considerando la disposición experimental, realizar la suma geométrica para finalmente hallar la resultante y la probabilidad.

Se encuentran 32 estudiantes que no utilizaron la técnica en forma explícita para resolver las evaluaciones (**UT₁**). Por otra parte, las resoluciones de **UT₃** corresponderían a los estudiantes que lograron un buen dominio de la técnica, (identificando los caminos posibles con vectores, realizando la suma en forma geométrica, y obteniendo una resultante) lo cual los colocaría en condiciones de reformular las experiencias de reflexión y refracción desde la técnica CCA y poder conceptualizar el carácter cuántico de la luz, a partir del resultado de la suma de caminos posibles, para explicar las franjas en la EDR ($n=18$).

c) Explicación cuántica (EC)

Esta categoría analiza las resoluciones de los estudiantes con respecto a la formulación explícita de una explicación de las experiencias planteadas en la secuencia, utilizando los conceptos propuestos por la Mecánica Cuántica y la técnica CCA: probabilidad, caminos de tiempo mínimo, máximos y mínimos, eventos, y detecciones discretas.

Hubo 19 estudiantes que no lograron reformular en términos cuánticos todas las experiencias en esta instancia (**EC₁**). Por otra parte, los estudiantes cuyas respuestas se ubicaron en **EC₃** serían quienes lograron conceptualizar de forma adecuada los conceptos cuánticos presentados, reformulando las explicaciones de las experiencias en términos probabilísticos, vinculados a la técnica CCA ($n=21$).

A partir del resultado de la categorización propuesta se agruparon las evaluaciones de los estudiantes en grados crecientes de conceptualización alcanzada. El grupo más bajo correspondería a aquellos estudiantes que no lograron ni siquiera la descripción clásica de las experiencias, y el más alto indicaría que lograron reformular una explicación cuántica de las experiencias, dominando la técnica CCA. Estos grupos de conceptualización construidos a partir de las resoluciones, no se equipararían a un conjunto de escalones consecutivos por los cuales necesariamente los estudiantes deben transitar hasta llegar a la conceptualización pretendida, sino que indicarían más bien los distintos obstáculos y ventajas que tuvieron los estudiantes en la conceptualización. En forma complementaria a la categorización, también se identificaron para cada aspecto analizado, algunos de los teoremas en acto utilizados por los estudiantes, que posiblemente obstaculizaron su conceptualización, como se presenta a continuación.

4. Resultados y discusión

Algunos posibles teoremas en acto utilizados por los estudiantes, inferidos de las resoluciones de los estudiantes, y que se consideran obstáculos para la conceptualización pretendida son los siguientes:

a) Teoremas en acto relativos a la Descripción de las Experiencias (TeaDE)

- TeaDEintensidad: *En las experiencias lo principal es que la luz del láser pierde intensidad.*
- TEADereflexion-refraccion: *La refracción y la reflexión son el mismo fenómeno.*

b) Teoremas en acto relativos a la Utilización de la Técnica (TeaUT)

- TeaUTvectorcamino: *Los vectores son los caminos que sigue la luz*
- TeaUTluzcamino: *En la EDR, los mínimos de luz corresponden a los caminos poco probables y los máximos a los caminos más probables.*

c) Teoremas en acto relativos a la Explicación Cuántica (TeaEC)

- TeaECclásica: *Las explicaciones en términos de la física clásica son las únicas necesarias para las experiencias*
- TeaECmencionar-explicar: *Mencionar los conceptos básicos de la Mecánica Cuántica alcanza para explicar los resultados de las EDR.*

Tabla 2: Distribución de frecuencias de las categorías, en los distintos Grupos de conceptualización, y algunos teoremas en acto obstaculizadores

Categoría (aspecto de la conceptualización)	Teorema en acto	Subcategoría	Grupo 1 N=8	Grupo 2 N=11	Grupo 3 N=13	Grupo 4 N=27	Grupo 5 N=9	Grupo 6 N=15	Total N=83
Descripción de las experiencias DE	TeaDEintensidad TEADereflexion-refraccion	DE ₁	8	0	0	0	0	0	8
		DE ₂	0	7	9	22	0	0	38
		DE ₃	0	4	4	5	9	15	37
Utilización de la Técnica CCA	TeaUTvectorcamino TeaUTluzcamino	UT ₁	8	11	13	0	0	0	32
		UT ₂	0	0	0	27	6	0	33
		UT ₃	0	0	0	0	3	15	18
Explicación Cuántica EC	TeaECclásica TeaECmencionar-explicar	EC ₁	8	11	0	0	0	0	19
		EC ₂	0	0	13	27	3	0	43
		EC ₃	0	0	0	0	6	15	21

A partir de la tabla 2, se concluye que los primeros dos grupos (Grupo 1 y Grupo 2, n=8 y n= 11 estudiantes respectivamente) presentan dificultades en la conceptualización, que les impiden abordar las situaciones de la evaluación, ya que no realizaron más que una descripción de las experiencias, sin utilizar los conceptos cuánticos estudiados, como si éstos fueran innecesarios. Al analizar las dificultades, se encontró que las respuestas de estos estudiantes, parecen estar guiadas por el uso de teoremas en acto que obstaculizan la conceptualización. Por ejemplo, *la luz del láser pierde intensidad en las experiencias*”, o como *“los vectores son los caminos que sigue la luz”* constituye un impedimento serio para avanzar en la conceptualización.

En los tres grupos intermedios (Grupos 3 a 5) se encuentra algo más de la mitad de los estudiantes (n=49) cuyas evaluaciones evidencian una conceptualización en progreso, que resulta satisfactoria desde el punto de vista didáctico, ya que aunque con algunas dificultades, la técnica CCA y las reformulaciones cuánticas de las experiencias están presentes en esta instancia. En las evaluaciones correspondientes a estos grupos también se detectaron teoremas en acto que, en varias ocasiones no ayudaron a una conceptualización adecuada. Sin embargo, estos teoremas en acto permitieron igualmente a los estudiantes avanzar en la conceptualización.

Por último, los estudiantes del grupo 6, con n=15 estudiantes, realizaron sus evaluaciones de forma acorde a las máximas expectativas de la secuencia, y no presentaron problemas en la conceptualización buscada. Resulta admirable el uso

espontáneo de más de un sistema de representación de algunos estudiantes (representaciones gráficas de las experiencias) para complementar, detallar y mejorar las explicaciones cuánticas formuladas.

5. Conclusiones

El propósito de la secuencia era lograr la explicación de cuatro experiencias con luz, considerando su carácter cuántico. Para ello, era necesario que los estudiantes interpreten las experiencias y se acerquen a la conceptualización de la técnica CCA. Ello implica, identificar caminos posibles con vectores, realizar sumas en forma geométrica, y obtener una resultante. La EDR tiene un rol predominante, ya que en sus resultados se aprecia el carácter discreto de la luz y a partir de la utilización de la técnica CCA, se explica la distribución de las franjas.

Los grupos de conceptualización formulados en este trabajo, son una construcción inductiva de los investigadores, a los efectos de la descripción, que no pretenden ser una escala general, y que tampoco implican, al menos con la información disponible hasta ahora, una secuencia necesaria por la que cada estudiante debe pasar.

Los resultados encontrados en cuanto al proceso de conceptualización son acordes con la Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud, que establece el carácter sistémico y complejo de la actividad, basada en los esquemas durante el proceso de conceptualización. Como los esquemas son una totalidad dinámica y funcional (Vergnaud, 2013), a la que sólo podemos acceder indirectamente a través de lo que los sujetos hacen explícito en la acción, es importante dimensionar las dificultades del proceso de investigación y el valor de contar con un análisis pormenorizado de N=83 sujetos, que si bien no nos habilita a ninguna generalización, nos da indicadores relativamente relevantes acerca de los obstáculos y de los logros.

6. Referencias

- Fanaro, M., Otero M. R. y Arlego, M. (2012a). A proposal to teach the light at secondary school from the Feynman method. *Problems of Education in the 21st Century*, 47, 27-39.
- Fanaro, M., Otero M.R y Arlego, M. (2012b). Teaching Basic Quantum Mechanics in Secondary School Using Concepts of Feynman's Path Integrals Method. *The Physics Teacher*, 50, 156-158.
- Fanaro, M. Arlego, M. y Otero M.R (2014). The double slit experience with light from Feynman's Sum of Multiple Paths viewpoint. *Revista Brasileira de ensino de Física*, 36(2), 1 -7.
- Fanaro, M, Otero, M.R y Elgue, M (2014). Implementation of a proposal to teach quantum mechanics concepts from the Multiple Paths of Feynman applied to the light. Trabajo presentado en *GIREP-MPTL International Conference on Teaching/Learning Physics*, Integrating Research into Practice, University of Palermo, Italy.
- Feynman, R (1985). *QED The strange theory of light and matter* (p. 158). USA: Penguin Books y Princeton University Press.
- Vergnaud, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 10(23), 133-170.
- Vergnaud, G. (coord.). (1994). *Aprendizajes y didácticas: ¿Qué hay de nuevo?* Buenos Aires: Editorial.
- Vergnaud, G. (2013). Pourquoi la théorie des champs conceptuels? *Infancia y Aprendizaje*, 36(2), 131-161.

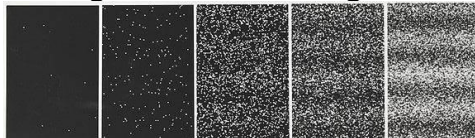
ANEXO

Evaluación: La luz desde el enfoque de la Mecánica Cuántica

1- a) ¿Cómo se explica en términos de probabilidades la ley de reflexión de la luz en un espejo? Justificar comparando la descripción cuántica con los hechos experimentales observados con el láser y el espejo.

2- ¿Cómo explica el modelo de “Considerar todas las Alternativas” (CCA) de la Mecánica Cuántica lo que notamos cuando la luz pasa de un medio a otro (refracción)? Ejemplifica

3- Al realizar la Experiencia de la Doble Rendija, con ciertos sistemas de detección sofisticados, se obtiene la siguiente serie de imágenes a medida que pasa el tiempo.



a) Describir la imagen en términos de Mecánica Cuántica

b) ¿Cómo se interpreta desde la técnica CCA de la Mecánica Cuántica este resultado?

4- ¿Cómo se relaciona la función de $P(x)$ que se obtiene al aplicar la técnica de Considerar todas las Alternativas con el resultado que se obtiene al realizar la experiencia en el aula?