

ANÁLISIS DE LA CONCEPTUALIZACIÓN EN LA FASE DE PREDICCIÓN Y EXPERIMENTACIÓN DE UNA ENSEÑANZA DE ASPECTOS CUÁNTICOS DE LA LUZ BASADA EN EL ENFOQUE DE FEYNMAN

María de los Ángeles Fanaro; Mariana Elgue; María Rita Otero; Marcelo Arlego
¹Núcleo de Investigación en Enseñanza de las Ciencias y la Tecnología (NIECyT).
Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.

² CONICET Argentina; 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 la primera parte de un conjunto de situaciones que componen una secuencia diseñada para enseñar conceptos relativos a la luz, que enfatizan su aspecto cuántico, con el fin de promover su conceptualización en estudiantes del último año de la escuela secundaria. Comenzar la secuencia de situaciones con este conjunto de experiencias con luz (en su mayoría realizables en el aula de clases) es muy importante porque establece la necesidad de contar con una formulación de una explicación cuántica y unificada de las mismas, que en este caso es el enfoque de Caminos Múltiples de Feynman. Se presenta un análisis de la conceptualización, basada en la Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud de los N=83 estudiantes que participaron en la implementación.

Palabras clave: Conceptualización, Teoremas en acto, Luz, Cuántica, Caminos múltiples de Feynman.

Abstract

In this work the first part of a set of situations of a sequence designed to teach concepts related to light and its quantum aspect for high school students is presented. Start sequence of situations with this set of experiences with light (mostly achievable in the classroom) is very important because it establishes the need for a formulation of a quantum and unified explanation thereof, which in this case is Multiple Pathways approach Feynman. An analysis of conceptualization, based on the Theory of Conceptual Fields of Vergnaud of N = 83 students who participated in the implementation is presented.

Keywords: conceptualization- theorems in act-light- quantum- Feynman' multiple paths.

1. Presentación del problema

Desde hace varios años nuestro equipo de investigación viene 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. (Arlego, Fanaro y Otero, 2012; Fanaro, Elgue y Otero, 2014). Diversos investigadores han elaborado propuestas de enseñanza de la mecánica cuántica (MQ) basadas en este enfoque, aunque para el nivel universitario. En general, estas propuestas se centran en el comportamiento dual de la luz desde el enfoque de Feynman, utilizando simulaciones informáticas, empleando el concepto de fotón. En cambio, en esta investigación, planteamos la enseñanza de aspectos básicos de mecánica cuántica en la enseñanza secundaria, sin recurrir al

concepto de fotón con los estudiantes, porque se quiere enfatizar los conceptos de probabilidad, principio de superposición y de correspondencia, para lo cual consideramos que no es necesario referirse a los fotones. Por otro lado, no nos proponemos abordar cuestiones ontológicas acerca de la luz, sino que preferimos centrarnos en la descripción, explicación y predicción de su comportamiento en distintas situaciones.

Proponemos para un curso del antepenúltimo año de la escuela secundaria una secuencia que se compone de cuatro fases consecutivas, conformadas por quince situaciones (incluyendo la situación de evaluación final) que regulan las progresivas conceptualizaciones de los estudiantes. En este trabajo se presentan las situaciones de la primera fase, cuyas acciones para los estudiantes fundamentalmente son la predicción, realización y descripción de experiencias sencillas con luz. Esta fase es muy importante en el desarrollo posterior de la secuencia, porque ofrece a los estudiantes la posibilidad de que expliciten sus invariantes operatorios, y que luego los pongan a prueba. Por su parte, también establecen un punto de partida que dota de sentido la introducción del cálculo de probabilidades, que en este caso se realiza desde la adaptación de la Suma de Caminos Múltiples de Feynman. Presentamos el análisis de la conceptualización, basada en la identificación de los invariantes operatorios utilizados por los N=83 estudiantes de las implementaciones.

2- Marco teórico

Para la Teoría de los Campos Conceptuales, la conceptualización se produce en todos los ámbitos de la experiencia humana: el familiar, el de la escolarización obligatoria, el de la formación profesional, el laboral, etc. En lo relacionado con los conocimientos físicos y matemáticos, se trata del aprendizaje de conceptos complejos, que ocurre en situaciones que la escuela secundaria puede recrear más probablemente, que ninguna otra institución social. En cada campo de conocimiento, son necesarios ciertos procesos de conceptualización, que se presentan en ciertos tipos de situaciones y de fenómenos, que convocan al desarrollo de determinadas formas de actividad.

Vergnaud propone una definición pragmática del concepto: triplete de tres conjuntos distintos, que no son independientes entre sí (Vergnaud, 2013: 156). Estos son: el conjunto de las situaciones que le dan sentido al concepto (S), el conjunto de los invariantes operatorios que integran los esquemas, evocados en las situaciones (I) *teoremas-en-acto* (tea) y conceptos en acto, y el conjunto de las representaciones lingüísticas y simbólicas (algebraicas, gráficas, etc.) que permiten representar los conceptos y sus relaciones (I). Un aspecto muy importante de la noción de conceptualización de Vergnaud, es que no distingue entre conceptos cotidianos y conceptos científicos, el proceso de conceptualización tiene las mismas características en todos los casos: se trata de identificar los objetos, sus propiedades y sus relaciones (Vergnaud, 2013b, p.41). En este sentido podemos usar la definición de concepto en el caso de Newton creando los conceptos de la Mecánica, como para Feynman construyendo su enfoque para la MQ. En consecuencia, podemos referirnos a las situaciones usadas por estos científicos, a los *teoremas-en-acto* (tea) y conceptos en acto con los cuales identifican los conceptos y describen sus propiedades y relaciones entre ellos, en este caso de manera explícita y provisoriamente correcta y al hecho de que en el caso de los conceptos científicos se trata de invariantes formalizados, en sistemas de representación sofisticados propios de la física y de la matemática subyacente (Otero, 2014).

3- Metodología

Para el análisis de los invariantes operatorios se toma como unidad de análisis a los conceptos que se esperan construir, en relación con las tareas que permitirán surgir los conceptos, y a los invariantes operatorios que dotan de operatividad al concepto y que son utilizados para analizar y dominar las situaciones. En el análisis didáctico a posteriori de la implementación, basado en las resoluciones de los N=83 estudiantes, se identifican los teoremas en acto en las respuestas que estudiantes fueron elaborando al afrontar las situaciones, y las puestas en común realizadas. Para describir el proceso de conceptualización, se generaron inductivamente tres categorías a partir de las resoluciones de los estudiantes, referidas a la predicción y descripción de las experiencias (PyD), analizando las cuatro situaciones en conjunto. Los estudiantes que participaron en las implementaciones, realizadas durante el 2012 y 2013 pertenecían a los cursos de quinto años de dos escuelas públicas de gestión privada de la ciudad de Tandil.

4- Las primeras cuatro situaciones de la secuencia

Estas situaciones constituyen una oportunidad para que los estudiantes expliciten algunos de sus conceptos y *teoremas-en-acto*, que tendrán progresivamente la oportunidad de ser corroborados y/o refutados en las situaciones de la secuencia.

S1: La reflexión de la luz en un espejo plano

Como se busca elaborar una formulación de la ley de reflexión a partir del análisis de la relación entre los ángulos de incidencia y de reflexión, se propone:

- a) *Queremos mirarnos en un espejo plano (que no deforma la imagen) que está en posición vertical y perpendicular al suelo, de tal forma que la imagen reflejada sea completa (es decir queremos ver la imagen de todo nuestro cuerpo reflejado). ¿Es posible lograrlo con un espejo de cualquier tamaño?*
- b) *Utilizando un puntero láser y un espejo, estudia el comportamiento de la luz al reflejarse en un espejo. Con lo que concluyas, vuelve al punto a) para corroborar o refutar la respuesta que habías dado.*

El primer problema hace referencia a una situación familiar para un estudiante, pero no resulta trivial, ya que requiere las siguientes acciones por parte de los estudiantes: relacionar el concepto de reflexión especular con el de mecanismo de visión, y analizar posiciones y distancias relativas entre distintos objetos y sus imágenes reflejadas. La idea es no restringir el problema con medidas y valores numéricos sino que los estudiantes puedan experimentar en el salón de clase, con distintos espejos ya sea que se encuentren en la escuela, o los que lleve el profesor y de esta forma se comience a analizar el comportamiento de la luz incidente en un espejo plano.

Luego, la segunda parte de la situación propone realizar la experiencia de la reflexión en el aula. Para realizar la experiencia, basta con contar con un puntero de luz láser doméstico, para apreciar la trayectoria de la luz, un espejo plano pequeño y un círculo graduado para que los estudiantes puedan notar la relación entre ángulo incidente y reflejado. Una vez que se institucionaliza que la luz que incide en un espejo plano se refleja con el mismo ángulo con el que incide respecto a una línea perpendicular al espejo denominada “normal”, es necesario volver al problema inicial. Así se busca consensuar que el largo del espejo debe ser de la mitad de la altura de la persona y éste debe ubicarse el borde superior del espejo a la altura de los ojos, para que la persona pueda verse reflejada totalmente.

S2: La refracción de la luz

Se propone a los estudiantes analizar el comportamiento de la luz cuando pasa de un medio a otro, como se muestra a continuación:

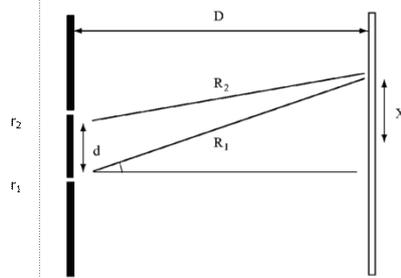
- a) Al sumergir parcialmente un objeto como un lápiz o una cuchara en un vaso que contiene líquido, como agua o aceite, ¿cómo lo percibimos? Justifica tu respuesta.
- b) Utilizando un puntero láser, un recipiente con líquido, y un círculo graduado, estudia el comportamiento de la luz al pasar del aire al líquido.

Manteniendo el esquema de la Situación 1, se propone comenzar con el planteo de una cuestión familiar y con sentido para los estudiantes sin restricciones en las variables del problema. El efecto de “distorsión” del objeto al sumergirse parcialmente en agua, posiblemente, sea familiar a los estudiantes. Luego, se propone realizar la experiencia en clase con el círculo graduado y el láser doméstico, para poder consensuar una descripción del fenómeno de la refracción, en términos del efecto que produce el líquido en el haz de luz que hace que se vea la deformación del objeto sumergido. Para realizar esta experiencia basta con llevar al aula de clases un recipiente de plástico transparente y líquidos de diferente densidad (agua, aceite, etc.). Aquí es preciso que los estudiantes noten que el cambio de dirección del haz de luz que pasa de un medio a otro, está vinculada a la idea de reflexión establecida previamente, ya que en ambos casos se hace incidir un haz de luz en una superficie y se establecen relaciones entre ángulos, pero ahora se busca la relación entre el ángulo de incidencia y el refractado. Así, se pretende establecer que la luz, al pasar de un medio a otro, cambia su dirección, y esto se puede explicar desde un cambio en la velocidad de la luz al pasar de un medio a otro.

S3: Estudiando la Experiencia de la Doble Rendija (EDR) con luz

A diferencia de las experiencias anteriores, se propone una situación que posiblemente no resulte familiar a los estudiantes, pero que resulta oportuna para que ellos expliciten sus teoremas y conceptos en acto relativos al comportamiento de un haz de luz al pasar por dos rendijas finas, situación poco familiar para ellos.

- a) En la Figura siguiente se presenta un esquema de una experiencia muy conocida e importante en Física, la “Experiencia de la doble rendija”, (EDR) vista desde arriba.



Esta experiencia consiste en hacer pasar un haz de luz de un solo color, por ejemplo un puntero láser rojo a través de dos rendijas o ranuras delgadas realizadas en la pantalla y detectar a simple vista la luz en un papel o simplemente en la pared detrás de las rendijas. ¿Cómo te imaginas que sería en este caso la distribución de la luz en la pared? Realiza un esquema del resultado y descríbelo.

- b) Utilizando un puntero láser, y una lámina con dos rendijas realiza la experiencia, proyectando sobre una pared a distancia considerable de la fuente de luz láser, y analiza los resultados.

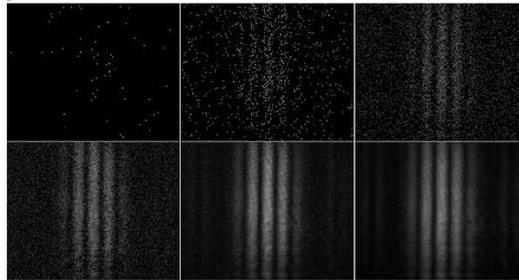
Se plantea la experiencia con luz láser debido a que para que los resultados sean notables, la luz debe ser monocromática. La primera parte de esta situación es predictiva, ya que requiere que los estudiantes anticipen la distribución de la luz en la pared, habiendo pasado por las rendijas, y permite explicitar sus conceptos y teoremas en acto, que luego serán retomados o desconsiderados, para la descripción de los

resultados de la experiencia que se propone en la segunda parte. Con esta situación se busca que los estudiantes realicen una descripción del fenómeno en términos de “lugares” o “zonas donde hay luz y zonas de oscuridad”, es decir que establezcan que la luz no se encuentra distribuida uniformemente en la pantalla, ni tampoco se encuentra en las dos zonas correspondientes a las rendijas.

Situación 4– Análisis de la EDR a partir de un conjunto de imágenes

Una vez que los estudiantes analizaron el comportamiento de la luz al incidir en un espejo plano, al atravesar distintos medios, y al pasar por dos rendijas finas, se busca enfrentar a los estudiantes al problema de la llegada discreta de la luz, como se presenta en la Situación 4 que se muestra a continuación. Como es muy dificultoso técnicamente realizar esta disposición experimental en el salón de clases con los estudiantes, se opta por presentar un conjunto de fotografías que muestra los resultados de la experiencia²⁹.

Se realiza la experiencia de la doble rendija pero, a diferencia de la anterior (donde a simple vista era posible notar el resultado) ahora se coloca una pantalla de detección que está formada por una gran cantidad de receptores muy sensibles a la luz. Lo que se obtiene es lo siguiente: en un primer momento el detector registró lo que presenta el primer cuadro de la Figura, y a medida que fue pasando el tiempo, los resultados son los que se presentan en los cuadros siguientes de la figura:



Describe y analiza los resultados de esta experiencia.

A partir de estas imágenes se puede inferir acerca de las detecciones individuales de luz, aunque se sigue conservando el patrón de zonas de luz y oscuridad, que es lo que se pretende explicar. En este punto, los estudiantes estarían en condiciones de abordar el modelo unificador propuesto en la secuencia, basado en el enfoque de Caminos Múltiples de Feynman (Fanaro, Elgue y Otero, 2016), a partir del cual se puedan explicar todas las experiencias anteriores.

5- Resultados

En las resoluciones que se encuentran en **PyD₁** (n=49) los estudiantes describieron los resultados de las cuatro experiencias en forma acorde con los teoremas y conceptos físicos que se querían enseñar, señalando el carácter discreto de la luz. Esto constituye un excelente punto de partida para la introducción de la técnica de Feynman para calcular probabilidades y reformular todas las experiencias cuánticamente. Los *tea* que se identifican como prototípicos de esta categoría son:

²⁹Imagen obtenida de <http://www.sps.ch/fr/articles/progresses/wave-particle-duality-of-light-for-the-classroom-13/> Como esta experiencia no puede llevarse a cabo en el aula, se busca que a partir de esta imagen los estudiantes noten que con luz de muy baja intensidad (para lo cual es necesario un sistema de filtros y una pantalla con detectores especiales), las detecciones de la luz son individuales, y que a medida que transcurre el tiempo, estas detecciones no están distribuidas al azar sino forman sectores donde se concentran, de forma similar a las bandas de luz y oscuridad observadas al realizar la experiencia en clase. En el sitio, además se puede ver el film de la experiencia, que es posible si las condiciones tecnológicas de la escuela lo permiten.

TeaReflexión: Como el ángulo con que llega la luz al espejo es el mismo que el reflejado, el tamaño del espejo para que se vea el cuerpo completo debe ser la mitad de nuestra altura

TeaRefracción: La luz cambia de velocidad al pasar por distintos medios hace que la luz se desvíe y cambie de dirección.

TeaFranjas: Las rendijas hacen que la luz presente zonas o franjas de luz y de oscuridad en la pantalla

TeaDiscreto: En la EDR con pantalla de detección, luego de cierto tiempo, se forma una figura de franjas claras y oscuras, en forma de puntos.

Estos *tea* resultan muy cercanos a los que se pretenden enseñar, y las resoluciones que se nuclean aquí se consideran las más satisfactorias. Por su parte, acompañan su sistema de representación verbal por variados y complejos sistemas de representación gráfica, de forma similar a los utilizados en la Física. Este resultado es alentador ya que significa que más de la mitad de los estudiantes pudieron acercarse a *tea* de la comunidad científica, respecto a la descripción de las cuatro experiencias con luz.

En la categoría **PyD₂**, se encuentran las resoluciones (n=14) donde los estudiantes describieron las experiencias de reflexión y refracción en forma adecuada (utilizando *TeaReflexión* y *TeaRefracción*, contrastaron las predicciones con los resultados de las experiencias, y describieron los resultados de una o ambas EDR. Para la EDR inicialmente, estos estudiantes consideraron el siguiente *tea*:

TeaCopia-forma: Si hay dos rendijas, en la pantalla va a haber dos puntos de luz

Este *tea*, fue falsado cuando realizaron la experiencia en clase, ya que advirtieron que sus predicciones habían sido erróneas: “no apareció lo que creíamos, no aparecieron los dos puntos sino que se unen los dos puntos y solo se nota la parte del centro con más luz y los costados con menos”(A69,S3). Luego, lograron identificar máximos y mínimos de luz (*TeaFranjas*) aunque no señalaron el carácter discreto. La utilización de estos teoremas en acto nos permiten afirmar que estos estudiantes se encuentran muy cercanos a la conceptualización pretendida.

Finalmente, la categoría **PyD₃**, reúne aquellas resoluciones (n=20) que se caracterizan por ser muy breves y sólo para algunas de las cuatro situaciones. Tampoco hay indicios de que contrastaron de las predicciones de los estudiantes con los resultados de las experiencias. Se identifican los siguientes *tea*:

TeaIntensidad: El láser disminuye su intensidad en las experiencias

TeaDifusión: La luz se difunde al pasar por las dos rendijas y cubre toda la pantalla. Al principio hay poca luz y luego mucha

La utilización de estos *tea* resulta obstaculizadora para la conceptualización, ya que no permite al estudiante avanzar en la descripción del comportamiento de la luz, más que en términos de intensidad y apreciar un comportamiento diferente de la luz, entre las dos primeras experiencias y la EDR en términos de cantidad de luz en la pantalla. Es destacable lo persistente que resultan estos teoremas en acto, ya que aún luego de realizar con sus compañeros la puesta en común al finalizar cada situación (S1, S2 y S3), algunos estudiantes seguían manteniendo en S3 y S4 este *tea*.

6- Conclusiones

Un aspecto muy destacable de esta primera fase que deben afrontar los estudiantes prediciendo y experimentando es que sienta las bases para la conceptualización de los conceptos cuánticos básicos, que se presentan mediante el enfoque de Feynman. La Teoría de los Campos Conceptuales de Gérard Vergnaud, habilita un análisis didáctico, porque la conceptualización que propone es pragmática, es decir ligada a acciones y fases que no pueden desvincularse de la estructura del conocimiento en juego. Resulta

alentador que en más de la mitad de las resoluciones es posible identificar *teoremas-en-acto* como *TeaReflexión*, *TeaRefracción*, *TeaFranjas* y *Teadiscreto*, que señalan que estos estudiantes estarían en condiciones más favorables para la conceptualización de la técnica CCA. Por su parte, las resoluciones en las que los estudiantes reconocieron las franjas en uno de los dos resultados de la EDR, también resulta alentador para lo que sigue en la secuencia, aunque haya que modificar la secuencia para que el aspecto discreto sea conceptualizado. Los estudiantes que no consiguieron describir los resultados de las experiencias, utilizando los *TeaDifusión* y *TeaIntensidad* nos lleva a reconocer que no se encuentran en un buen punto de partida para conceptualizar el comportamiento cuántico de la luz, y que es necesario un ajuste en la secuencia en pos de mejorar esta situación.

7- Referencias

- Arlego, M.; Fanaro, M and Otero, M.R. (2013) Teaching different aspects of light in the unified framework of quantum mechanics. **Proceedings of World Conference on Physics Education**, PegemAcademi, Istanbul, p. 795-799
- Fanaro, M; Otero, M.R. y Arlego, M. (2014) The double slit experience with light from Feynman's Sum of Multiple Paths viewpoint **Revista Brasileira de ensino de Física** 36 (2) pp. 1 -7.
- Fanaro, M, Elgue, M y Otero, M.R (2016) Secuencia para enseñar conceptos acerca de la luz desde el enfoque de Feynman para la mecánica cuántica en la escuela secundaria: un análisis basado en la teoría de los campos conceptuales. Cad. Bras. Ens. Física. En prensa.
- Otero, M.R., Fanaro, M; Sureda, P; Llanos, V C; Arlego, M. (2014) La Teoría de los Campos Conceptuales y la conceptualización en el aula de Matemática y Física. Buenos Aires. Editorial Dunken. 124p.
- 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 (2013). Pourquoi la théorie des champs conceptuels? **Infancia y Aprendizaje**, 36 (2) 131-161.
- Vergnaud, G Conceptual development and learning (2013). **Curriculum** 26, 39-59.