

EL APRENDIZAJE DE LOS FENOMENOS DE INTERFERENCIA LUMINOSA

LEARNING LIGHT INTERFERENCE PHENOMENA

Silvia del Valle Bravo – Marta A. Pesa

Depto. Física – FCEyT – Univ. Nacional de Tucumán – Argentina

sbravo@herrera.unt.edu.ar – mpesa@herrera.unt.edu.ar

Resumen

Se presentan los primeros resultados de una investigación referida al aprendizaje y a la enseñanza de la interferencia de ondas luminosas en los ciclos básicos de las carreras de ingeniería. Estos resultados son interpretados a la luz del marco teórico de la teoría de los campos conceptuales de Vergnaud. El propósito es discriminar los elementos fundamentales de los esquemas que construyen progresivamente los estudiantes y las continuidades y rupturas que se producen en el aprendizaje del modelo ondulatorio. Los resultados muestran la complejidad de la conceptualización de esta temática y la necesidad de continuar la investigación profundizando aspectos relacionados con el origen de las dificultades de los estudiantes.

Palabras clave: conceptualización – interferencia ondas luminosas – teoría de campos conceptuales

Abstract

First results of research in the learning and teaching of the interference of light waves in the basic physics courses of engineering are presented. These results are interpreted in light of the theoretical framework of the theory of conceptual fields of Vergnaud. The purpose is to discriminate the fundamental elements of the schemes that progressively build student and the continuities and ruptures that occur in learning the wave model. The results show the complexity of the conceptualization of this theme and the need for further research to deepen aspects of the origin of students' difficulties.

Key words: conceptualization – interference of light waves – conceptual fields theory

Introducción

El campo conceptual de la óptica ondulatoria constituye un área de conocimientos básicos en la formación científica y tecnológica de físicos e ingenieros y, simultáneamente, de gran complejidad y dificultad para el aprendizaje. Nuestra propia experiencia docente ha puesto de manifiesto algunas dificultades de los estudiantes a la hora de resolver situaciones problemáticas referidas a sistemas experimentales reales:

- Inadecuada comprensión y falta de discriminación de las características más relevantes de los modelos de la óptica geométrica y de los modelos ondulatorios. Los alumnos

resuelven las situaciones problemáticas mezclando acríticamente elementos de ambos modelos, independientemente de los ámbitos explicativos de los mismos.

- Falta de comprensión del significado físico de la función de onda en referencia a sus formas de representación: función de onda independiente del tiempo y función de onda independiente del espacio.
- Imprecisión en el lenguaje, que conduce a la inadecuada selección de las representaciones más adecuadas para la resolución de los problemas, selección de informaciones, inferencias y exposición de argumentos.
- Dificultad para establecer vínculos y analogías entre distintos sistemas físicos que permiten la observación de patrones estables de franjas estables claras de interferencia y/o difracción (ondas en agua, sistemas de doble ranura de Young, patrones por superposición de círculos concéntricos generados en computadora en acetatos, etc.)
- Falta de criterios claros para traducir los patrones de intensidad obtenidos con distintos sistemas experimentales a esquemas gráficos y, en general, para interrelacionar esquemas gráficos, patrones en pantallas y sistemas experimentales específicos.

Si se pretende generar propuestas didácticas fundamentadas para la superación progresiva de estas dificultades es necesario profundizar y sistematizar las mismas a fin de localizar y estudiar las filiaciones y rupturas entre conocimientos desde el punto de vista conceptual. Esto implica investigar las representaciones y razonamientos que activan los estudiantes al enfrentarse a situaciones problemáticas que involucran las conceptualizaciones de la óptica ondulatoria.

En esta primera etapa de investigación, y a la luz del marco conceptual de la teoría de Vergnaud (1990), nos proponemos iniciar la detección de las características de los esquemas de los estudiantes y las diferencias estructurales con los esquemas que pretendemos construyan durante su educación universitaria en carreras de ciencia y tecnología. Se elige este enfoque teórico en función del objetivo de analizar los aspectos invariantes de la conducta de los estudiantes en la resolución de situaciones de un campo conceptual determinado.

Marco teórico

La teoría de los campos conceptuales (TCC) brinda un marco cognitivista para el desarrollo del aprendizaje de competencias complejas. Brinda un referencial que permite comprender y explicar las continuidades y rupturas entre conocimientos con una visión holística del aprendizaje, donde se integran tanto el “saber hacer” como el “saber expresar, o sea las formas operatoria y la forma predictiva del conocimiento, o sea saber explicar los objetos y sus propiedades (Vergnaud, 1996).

La TCC permite analizar cómo se organizan las ideas que están interconectadas y cómo se generan los conceptos y representaciones a través del tiempo. Considera que el objeto del desarrollo cognitivo es la conceptualización y de allí la importancia que atribuye al contenido del conocimiento en sí mismo y a su análisis conceptual.

De acuerdo a Vergnaud (1990) los campos conceptuales constituyen grandes conjuntos de situaciones y problemas, cuyo análisis y tratamiento requieren diversas clases de conceptos, procedimientos y representaciones simbólicas que están interconectadas entre sí y probablemente entrelazados durante el proceso de adquisición de conocimiento.

Un concepto no puede ser reducido a su definición: es a través de las situaciones y los problemas (teóricos y/o prácticos) que se aprende a resolver, cómo los conceptos adquieren significado (Rodríguez Palmeiro, Moreira 2004). Esto no implica olvidar el papel del lenguaje

y de los simbolismos en la construcción conceptual; ambos son fundamentales. Sólo que la función adaptativa del conocimiento requiere dar un lugar central a las formas que toma en las acciones del sujeto. “*El conocimiento racional es operatorio o no es tal conocimiento*” (Vergnaud, 1990).

En este referencial, el comportamiento ante una situación dada está dirigido por *esquemas*, los cuales generan una secuencia de acciones que dependen de los parámetros de la situación. Vergnaud define al esquema como “la organización invariante de la acción para una determinada clase de situaciones”, o bien como “totalidad organizada que permite generar una clase de comportamientos diferentes en función de las características particulares de la situación”. Supera la visión estereotipada, enfatizando que “no es la conducta lo que es invariante, sino la organización de la conducta”.

El concepto piagetiano de esquema es central en esta teoría: representa los ingredientes que organizan la conducta y en consecuencia, el esquema es una totalidad integrada por:

- *Metas y anticipaciones*, que permiten identificar situaciones.
- *Invariantes operatorios (conceptos en acción y teoremas en acción)* mediante los cuales el sujeto reconoce los elementos pertinentes de la situación y la información relevante y activa proposiciones a partir de las cuales puede hacer inferencias.
- *Reglas de acción* del tipo “si... entonces” que permiten generar una secuencia de acciones
- *Inferencias* o razonamientos que se efectúan durante la actividad del sujeto frente a la situación.

Las inferencias son indispensables para la puesta en funcionamiento del esquema en cada situación particular ya que “un esquema no es un estereotipo sino una función temporalizada de argumentos que permite generar series de diferentes acciones y de recogida de información en función de los valores de las variables de la situación” (Vergnaud, 1990).

Merece aclararse que, ante una situación nueva varios esquemas pueden ser evocados sucesivamente o simultáneamente por el sujeto. Esta consideración del marco teórico daría pistas para investigar acerca de la construcción de respuestas híbridas, donde el sujeto mezcla esquemas precientíficos con científicos, o bien, modelos con diferentes límites de validez y ámbito (Bravo, Pesa 2005).

En referencia al proceso de conceptualización como objeto de desarrollo cognitivo, Vergnaud considera que los conceptos van adquiriendo sentido a través de múltiples situaciones y problemas, cuando el sujeto abstrae paulatinamente propiedades relevantes para conformar los conceptos-en-acción y los teoremas en acción. Cuando pueden expresarse en forma explícita, se convierten en conceptos. En este proceso de explicitación, las expresiones lingüísticas, los símbolos, las representaciones simbólicas ayudan al sujeto a ganar complejidad cognitiva. De allí la importancia de considerar al concepto como un triplete de tres conjuntos:

S: las situaciones que dan sentido al concepto

I: el conjunto de invariantes operatorios que determinan la operacionalidad de los esquemas (significado)

T: las formas lingüísticas y no lingüísticas que permiten representar simbólicamente al concepto y a sus propiedades (significantes).

Por lo tanto, si se quiere investigar el desarrollo conceptual durante el aprendizaje, es necesario considerar estos tres planos simultáneamente.

El estudio exhaustivo del campo de conocimiento por parte del docente brinda un panorama de la totalidad de invariantes operatorios con que se puede abordar una tarea determinada y de

los posibles invariantes operatorios que el alumno podría poner en juego durante el proceso de aprendizaje.

En el Anexo I se expone un diagrama que representa al concepto de onda desde este referencial teórico. Si bien el diagrama no considera el entrelazamiento entre conceptos, representaciones simbólicas y procedimientos, representa una perspectiva de todo lo se podría utilizar en la clase para enseñar el concepto mediante abordajes recursivos y multiplicidad de representaciones, y de los posibles invariantes operatorios con que el alumno podría enfrentar una situación.

El diagrama presentado pone en evidencia además que si bien las leyes físicas que explican las propiedades de las ondas mecánicas son distintas que las leyes que explican las propiedades de las ondas electromagnéticas, en casi todos los aspectos la cinemática de las ondas electromagnéticas es exactamente igual a la de las ondas mecánicas (Eisberg y Lerner, 1985; Hecht 1987; Alonso y Rojo 1981) y en consecuencia hay muchos invariantes operatorios y representaciones simbólicas que son comunes a ambos modelos.

Metodología de la investigación

La investigación se realizó con 60 alumnos de las carreras de ingeniería, durante el desarrollo de los trabajos prácticos de Laboratorio de la asignatura Física III, que tiene a su cargo el tratamiento de los contenidos específicos de Electromagnetismo y Óptica.

Se ha usado una metodología que tiene las características de una investigación-acción: el investigador en este caso actúa como docente, en el contexto del desarrollo de los trabajos prácticos de Laboratorio. Para ello se ha diseñado una serie de actividades (ver Anexo 2) a realizar por los alumnos en forma grupal y con la guía del docente, destinadas a la construcción de los conceptos referidos a interferencia y difracción de la luz y mediante las cuales además se pretende recoger información relevante respecto a la construcción de los conceptos por parte del alumno.

Las actividades se desarrollaron en grupos pequeños con un total de aproximadamente 5 hs. repartidas en dos jornadas. El total de 60 alumnos estaba dividido en 15 grupos de 4 alumnos cada uno y en cada sesión de Laboratorio el docente trabajó solamente con 3 grupos (12 alumnos), de manera tal que emplearon cinco jornadas en la primera semana y cinco jornadas en la segunda semana para que los grupos completaran las actividades.

El conjunto de actividades que se emplearon para estudiar el desarrollo de los conceptos de interferencia y difracción de la luz por parte del alumno en las clases de Laboratorio consiste en:

- 1- una serie de ejercicios de lápiz y papel mediante los cuales los alumnos discuten y razonan en grupos pequeños acerca de la superposición de ondas de la misma amplitud y de la misma frecuencia. Discusión grupal de las respuestas, con la guía y coordinación del docente.
- 2- la introducción y el estudio de una analogía con la interferencia de ondas en el agua para discutir el fenómeno de la interferencia de las ondas luminosas de dos fuentes puntuales que emiten en fase y con la misma frecuencia.
- 3- la predicción de lo que se observaría en la pantalla cuando se dispone de un sistema experimental formado por una fuente luminosa (primero láser y luego lámpara común), una pequeña abertura (del orden de 10^{-1} mm) y una pantalla.

4- la predicción de lo que se observaría en la pantalla cuando se dispone de un sistema experimental formado por una fuente luminosa (láser y fuente común), dos aberturas pequeñas con una separación entre ellas del orden de 10^{-1} mm y una pantalla.

5- La observación de los patrones de difracción e interferencia y la dependencia cualitativa de los mismos con el ancho de las aberturas y la distancia entre ranuras.

6- La discusión sobre el modelo que explica los resultados observados

7- La medición de la longitud de onda del láser utilizando rendijas simples, sistemas de doble rendija y/o redes de difracción.

En cada sesión el docente-investigador realizó un registro escrito de lo ocurrido en el aula durante el desarrollo de las actividades, donde la variable de interés consistía en los distintos tipos de dificultades que manifiestan los alumnos para el desarrollo de cada uno de los ítems. Además, se solicita a los alumnos que escriban sus respuestas y sus resultados a medida que van trabajando con cada uno de los ítems, de manera tal que se cuenta con un registro de respuestas escritas de los alumnos. Una vez terminado el conjunto de actividades, los alumnos responden individualmente a una serie de preguntas cualitativas, a modo de evaluación del trabajo realizado.

El desarrollo de las actividades en distintos días de la semana y con grupos pequeños, permitió ir depurando el instrumento. Se logró precisar el lenguaje y la redacción de las consignas en la medida en que los estudiantes evidenciaban falta de comprensión de las mismas, y se eliminó una actividad introductoria que no aportaba información respecto a nuestras variables de interés.

Análisis de Resultados

Se realizó un análisis interpretativo de los registros escritos del docente-investigador acerca del desarrollo de las actividades, del informe de trabajo de los alumnos. Las interpretaciones realizadas de los materiales mencionados fueron discutidas y consensuadas con un investigador que no había participado en las sesiones de actividades.

Se presenta a continuación una síntesis de los primeros resultados de la investigación, que incluye la interpretación y sistematización de respuestas a las actividades introductorias y las predicciones. Los registros que corresponden al desarrollo de las actividades experimentales y los resultados de la evaluación aún están en proceso de interpretación y sistematización.

Actividades introductorias

Con respecto a la superposición de ondas a partir de un diagrama $E(t)$:

- La mayoría de los alumnos puede definir verbalmente y en forma escrita la interferencia constructiva y la interferencia destructiva en términos de las características de la onda resultante.
- Algunos alumnos manifestaron dificultad para interpretar el gráfico como una representación de lo que sucede con la intensidad del campo eléctrico E en un punto del espacio, a medida que transcurre el tiempo. En la discusión de este aspecto resultó útil su conocimiento previo acerca de la descripción de una onda mecánica y la similitud de las funciones de onda en ambos casos.

Las actividades sobre interferencia de ondas a partir de la analogía con la interferencia de ondas en el agua, se basan en el uso de diagramas que se pueden superponer mediante una transparencia y que representan los frentes de ondas emitidos por una fuente luminosa (ver

Anexo2). Estos diagramas permitieron analizar la formación de líneas de máximos y mínimos de interferencia en el espacio que rodea a dos fuentes que emiten en fase y con la misma frecuencia, y su dependencia con la separación entre las fuentes.

Los alumnos no evidenciaron dificultades para realizar la analogía de los círculos con las “crestas” de agua y el punto medio entre dos círculos con un “valle”. Ello les permitió identificar el cruce de dos frentes de onda con la situación de interferencia constructiva del ítem anterior e identificar en el diagrama de círculos superpuestos las zonas que corresponden a una interferencia destructiva.

En las discusiones grupales (a partir de los registros del investigador) y en los informes realizados por los alumnos se evidencian dificultades de comprensión en los siguientes aspectos:

- la conceptualización del “patrón de interferencia” como la distribución espacial de máximos y mínimos de intensidad luminosa
- la discriminación entre “intensidad de campo eléctrico en un punto” e “intensidad luminosa en un punto”
- la interpretación de la configuración espacial del patrón de interferencia en el caso en que las fuentes estén emitiendo con una diferencia de fase estable en el tiempo o en el espacio
- las condiciones necesarias para que el patrón de interferencia sea estable.

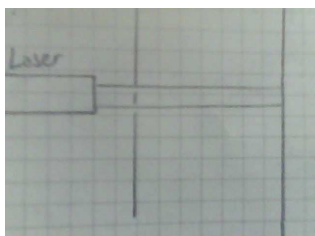
El estudio del propio campo del conocimiento (Anexo 1) puede indicar qué invariantes operatorios no estarían disponibles en los esquemas de los alumnos y que tipos de situaciones y/o representaciones simbólicas pueden ser convenientes para ayudar a la construcción de los mismos. Por ejemplo, usar una configuración de círculos en la transparencia que muestre una diferencia de fase con respecto a la configuración de círculos en papel ayudaría a visualizar y razonar acerca del patrón de interferencia para fuentes que emiten con una diferencia de fase. Puede ser conveniente además, una simulación por computadora que muestre el avance de los frentes de onda para dos ondas que emiten en fase, que emiten con diferencia de fase constante y que emiten con una diferencia de fase aleatoria en el tiempo, para generar la discusión sobre la estabilidad de patrón de interferencia.

Predicciones

Las predicciones realizadas por los alumnos acerca de lo que se observará en el sistema experimental muestran fehacientemente la dificultad para enfrentar la situación desde un nuevo paradigma (óptica ondulatoria). En este aspecto, el análisis de los informes de las actividades permite distinguir tres tipos principales de respuestas, de las cuales se presenta una breve descripción y algunos ejemplos con su respectiva interpretación.

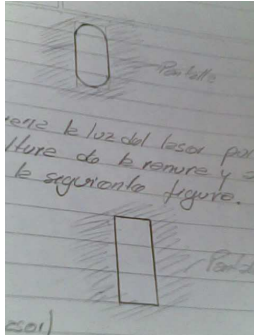
Clase A: Razonamiento basado en la óptica de rayos (60% de las respuestas)

Este tipo de razonamiento de la mayoría de los alumnos responde a un esquema muy arraigado en el que pueden inferir algunos teoremas en acción tales como: “*La luz se propaga en forma rectilínea*” “*la luz del láser es más concentrada*”, “*la luz de una fuente común se dispersa más que la del láser*”. Si bien estos enunciados son correctos, no le sirven para el razonamiento que necesitan generar en esta situación. Se evidencia la ausencia total de los invariantes operatorios que permiten reconocer los aspectos relevantes de la situación, tales como la coherencia espacial y coherencia temporal de las fuentes, el orden de magnitud de las dimensiones involucradas, el orden de magnitud de la radiación involucrada, etc.



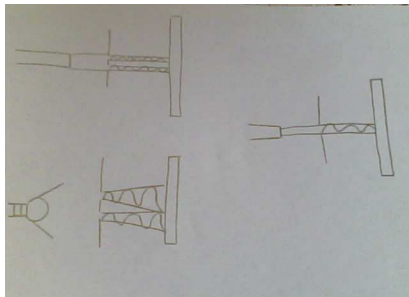
Alumno 1: “*Con luz láser y dos ranuras se observan dos puntos en la pantalla separados aproximadamente 0,1 mm y con luz natural*”

se observan dos franjas”. “Si las aberturas están más separadas aumenta la distancia entre los puntos con el láser, y se hacen más grandes las franjas hasta que se abren”



Alumno 2: “Con láser se ve un punto deformado y con la lámpara la silueta completa de la ranura” “Si se aumenta el tamaño de la abertura, con el láser se ve un punto y con la lámpara se ve la ranura completa” (Respuesta parcialmente correcta, con un razonamiento basado en el modelo de rayo)

Clase B: Diagramas y/o respuestas basados en un razonamiento híbrido que toma, en general en forma acrítica, elementos de ambos modelos. (30% de las respuestas)



Alumno 3: Responde usando solamente gráficos

Este alumno responde a las predicciones desde un esquema basado en un modelo de rayos, pero incorpora en el mismo algunos conceptos que aún están en construcción en su estructura cognitiva. Reconoce que el modelo ondulatorio permite el análisis de la situación pero no dispone de la totalidad de los invariantes operatorios ni de las relaciones entre ellos, que permiten reconocer los aspectos relevantes

de la situación y que guían la construcción de un nuevo esquema.

Alumno 4: “Con láser se ve una línea con máximos y mínimos secundarios alrededor, por la difracción y con lámpara se ven distintos tonos de luminosidad, no se ve “forma” porque la fuente no es puntual” “Si la rendija se hace más ancha, con láser se ve un punto y con lámpara se divide mejor el fenómeno de la difracción”

Este caso es un ejemplo de un razonamiento híbrido donde se mezclan elementos de modelos diferentes. Si bien incorpora más elementos del modelo ondulatorio, se evidencia que aún están en construcción las relaciones entre ellos y el verdadero significado de los mismos. Esta respuesta no evidencia un concepto claro y definido de *difracción*: inicialmente se refiere al mismo como el patrón de máximos y mínimos y luego parece referirse a la zona de iluminación parcial que se explica con la óptica geométrica. Es claro que esta interpretación se puede precisar mejor con una posterior entrevista.

Clase C: Respuestas correctas o parcialmente correctas desde el modelo ondulatorio, pero incompletas en su justificación. (10% de las respuestas)

Este tipo de respuestas corresponden a los alumnos que han logrado desarrollar un esquema que los lleva a enfrentar la situación desde el modelo ondulatorio, pero no pueden explicitar aún su razonamiento y no han logrado construir todas las relaciones entre conceptos.

Alumno 5: “Con el láser se observan franjas de luz de distinta intensidad con una franja central más intensa que las demás y con la lámpara se observa un solo máximo en la posición de la ranura ya que la luz de la lámpara es mucho más dispersa que la luz del láser”, “Si la abertura se agranda el láser no genera interferencia y el caso de la lámpara será parecido al anterior”.

Esta respuesta se basa en un esquema incompleto pero que permite reconocer el rol de las dimensiones de la abertura en la formación de un patrón de interferencia. Sin embargo, no atiende a la cuestión de la coherencia de las fuentes y por lo tanto lleva a una justificación incorrecta en el caso de la lámpara.

Conclusiones

Los resultados parciales de esta investigación muestran que:

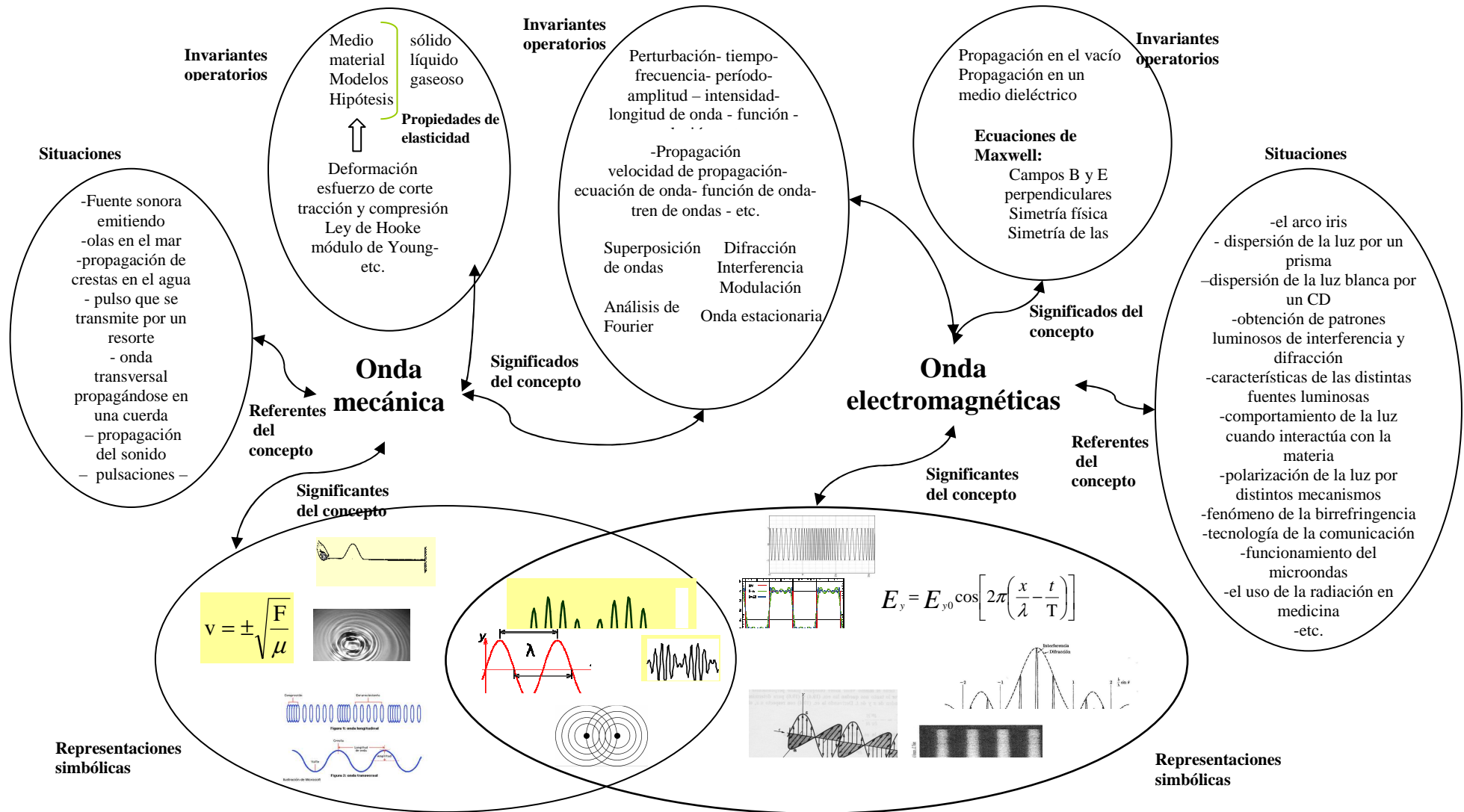
- La construcción de un nuevo paradigma (óptica ondulatoria) es un proceso lento y complejo, tanto por las características de los procesos cognitivos como por la complejidad del propio campo conceptual (Maurines 2010; Colin y Viennot 2002; Ambrose 1999-a, 1999-b; Wosilait et.al. 1999). En efecto, después de haber trabajado con las transparencias que permitieron explicitar todos los conceptos relacionados con la interferencia de ondas luminosas y generar la discusión acerca de las condiciones necesarias para observar un patrón estable, el 60% de los alumnos no logran generar un esquema que les permita reconocer las características relevantes de la situación presentada. Solamente el 10% ha podido realizar este cambio de esquema, aunque todavía incompleto, y el resto mantiene su esquema previo con la incorporación acrítica de invariantes operatorios de un nuevo modelo.
- Si bien la analogía ha resultado útil para discutir aspectos relacionados tanto con las características de la descripción de las ondas como con la superposición de ondas, no ha resultado suficiente para que la mayoría de los alumnos interpreten un sistema de dos ranuras como dos fuentes que están emitiendo simultáneamente. En este aspecto, parece necesario incorporar estrategias y actividades para favorecer el desarrollo de esquemas que permitan a los alumnos atender a las variables que son relevantes para discriminar los límites de validez de los modelos.
- Si bien se pueden inferir algunos invariantes operatorios en el discurso y a partir de los gráficos generados por los alumnos, se necesita profundizar el estudio sobre las dificultades de los alumnos a partir de otros instrumentos como las entrevistas, si queremos avanzar en la investigación acerca del proceso de construcción de los conceptos y de la detección de los invariantes operatorios. Para este objetivo, el cuadro del Anexo 1 sirve como una guía que permite interpretar cómo el alumno va incorporando invariantes operatorios y cómo va construyendo las relaciones entre ellos y el entrelazamiento con las diferentes situaciones y representaciones simbólicas.

Referencias bibliográficas

- ALONSO M., ROJO O. **Campos y Ondas**. Editorial Fondo Educativo Interamericano. México, 1981.
- AMBROSE et. al. (1999-a). Student understanding of light as an electromagnetic wave: Relating the formalism to physical phenomena. **American Journal Physics**, v. 67, n.10.
- AMBROSE et al. (1999-b). An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference. **American Journal Physics**, v. 67, n. 2.
- BRAVO S., PESA M., La construcción de representaciones sobre movimiento ondulatorio. Una interpretación a partir de la integración de la teoría de campos conceptuales de Vergnaud y la teoría de los modelos mentales de Johnson-Laird. **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 18, n.2, p. 25-42, 2005.
- COLIN, P; VIENNOT, L. Géométrie, phase, coherence: question d'optique. **Bulletin de la société française de la physique**. N° 37. 2002.

- EISBERG R., LERNER L., *Física, Vol I y Vol II*. Ed. Mc Graw Hill, México. 1985.
- HECHT, E. (1987). **Optics**. Ney York, Addison Wesley, 1987
- Mc Dermott L. (2001). Oersted Medal Lecture 2001: Physics Education Research—The Key to Student Learning. *American Journal Physics*, 69 (11).
- MAURINES, L. (2010). Geometrical reasoning in wave situations: the case oh light diffraction and coherent illumination optical imaging. **International Journal of Science Education**, v.32, n.14, p.1895-1926.
- RODRIQUEZ PALMEIRO M., MOREIRA M., La Teoría de los Campos Conceptuales de Gérard Vergnaud. Del texto: **La Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud, la Enseñanza de las Ciencias y la Investigación en el Área**. Editor: Marco Antonio Moreira. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil. 2004.
- VERGNAUD, G. **Recherches en Didáctique des Mathématique**, v.10, n.(2,3), p.133-170. 1990.
- Vergnaud G. (1994). Multiplicative conceptual field: what and why? In Ghershon, H. and Confrey, J. (Eds.).*The development of multiplicative reasoning in the learning of mathematics*. Albany, N.Y.: State University of New York press. pp 41– 59.
- VERGNAUD G. Education, the best portion of Piaget’s heritage. **Swiss Journal of Psychology**, vol. 55, n.(2/3), p. 112-118, 1996.
- WOSILAIT, K. et al. Addressing student difficulties in applying a wave model to the interference an diffraction of light, **American Journal Physics suppl.**, v. 67, n. 7, 1999.

ANEXO 1: Estudio del campo conceptual de las ondas mecánicas y ondas electromagnéticas, desde la teoría de Vergnaud. Bosquejo de los principales componentes

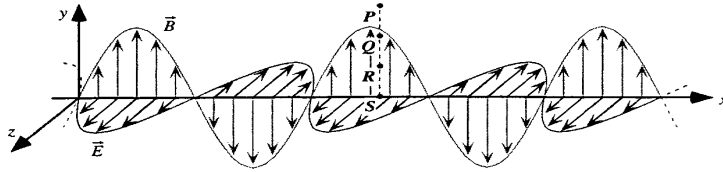


ANEXO 2: Interferencia de ondas luminosas.

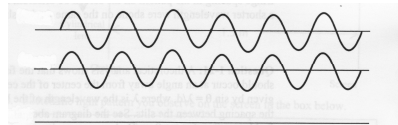
Actividades introductorias

La siguiente figura representa una onda electromagnética plana que se propaga en la dirección del eje x:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = E_0 \sin(kx + \omega t) \hat{z} \quad \vec{B}(x, y, z, t) = B_0 \sin(kx + \omega t) \hat{y}$$



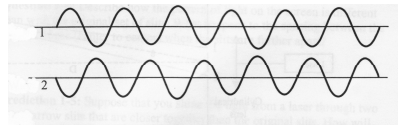
1) Suponga que los gráficos siguientes representan la variación de la intensidad del campo eléctrico E en función del tiempo, de dos ondas luminosas que inciden en un punto P cualquiera en una pantalla.



Si las ondas 1 y 2 se comportan como indica la figura (están en fase en el punto P)

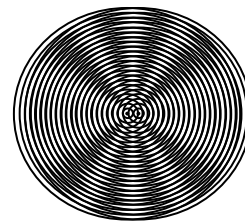
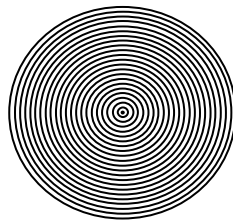
- dibuje la onda que resulta de la adición de estas dos ondas
- ¿Cómo será la intensidad luminosa en ese punto? ¿Se mantiene en el tiempo?

2) Ahora suponga que la variación de la intensidad del campo eléctrico en función del tiempo en otro punto Q es como se indica en la figura siguiente, es decir, las ondas están desfasadas un ángulo π .



- Dibuje el resultado de la superposición de estas dos ondas en el punto P
- ¿Cómo será la intensidad luminosa en ese punto? ¿Se mantiene este valor?

3) Se pueden representar los trenes de onda de una fuente luminosa puntual por medio de círculos concéntricos, de la misma manera que los frentes de ondas de fuentes puntuales que generan ondas en el agua.



Utilice los diagramas que se proporcionaron (en papel y transparencia) para representar dos fuentes luminosas emitiendo, y explique en este caso:

- ¿Qué representan los círculos concéntricos? ¿Qué tipos de diagrama son: E (t), E(x) o algún otro?
- ¿Qué representa la distancia entre un círculo y otro?
- ¿Cómo puede saber si las dos fuentes están emitiendo en fase?
- ¿Qué sucede en aquellos puntos del plano donde se cruzan dos círculos cuando se superponen las ondas generadas por las dos fuentes? Explique.
- ¿Cómo influye la separación entre las fuentes en la formación de las líneas de máximos de interferencia? Explique
- ¿Cómo serían los círculos si la fuente S_1 emite radiación con una diferencia de fase constante con respecto a la fuente S_2 ?

e) ¿Qué condición se necesita para que el patrón de franjas brillantes y oscuras que se ve a un tiempo t_0 sea “estable” en el tiempo?

Predicciones

4) Considere un sistema experimental constituido por: una fuente de luz láser, una pequeña ranura (ancho $\approx 0,1$ mm) y una pantalla.

a) ¿Qué espera observar en la pantalla cuando se encienda la fuente de luz láser? Explique su respuesta

b) ¿Qué espera observar en la pantalla si cambia la fuente láser por una lámpara incandescente común? Explique su respuesta

c) ¿Qué espera observar en la pantalla en las dos situaciones anteriores si se cambia la ranura por otra más ancha (mayor que 1mm)? Explique su respuesta.

5) Ahora considere un sistema experimental formado por: una fuente de luz láser, dos pequeñas ranuras (separadas $\approx 0,1$ mm) y una pantalla.

a) ¿Qué espera observar en la pantalla cuando se encienda la fuente de luz láser? Explique su respuesta.

b) ¿Qué esperaría observar en la pantalla si cambia la fuente láser por una lámpara incandescente común? Explique su respuesta.

c) ¿Qué espera observar en las situaciones anteriores si cambia el espaciado (aumenta o disminuye) entre las rendijas? Explique su respuesta.

Actividades experimentales

6) Controle experimentalmente la validez de sus predicciones en (5) y (6) y explique cuál es el modelo que da cuenta del comportamiento de la luz en estas condiciones.

Interferencia por dos rendijas

7) Mida la posición de los máximos para un patrón de interferencia formado por **dos rendijas**. ¿Se cumplen las previsiones teóricas? Explique

a) Calcule la longitud de onda del láser empleado, conociendo el espaciado entre las rendijas

b) ¿La intensidad de los máximos de interferencia que se observa en la pantalla es igual para todos? Explique

Difracción por una rendija

8) Considere el sistema experimental formado por una rendija simple iluminada con luz láser:

a) ¿Cuáles son las características del patrón observado en la pantalla? ¿Qué diferencia existe con el patrón obtenido con las ranuras dobles? Explique.

b) Mida la posición de los máximos. ¿Se cumplen las previsiones teóricas?

c) Con el patrón obtenido para una determinada posición, calcule el valor acotado del ancho de la rendija con el menor error posible.

d) ¿Cómo se modifica el patrón de difracción si cambia el ancho de la ranura? Justifique cuantitativamente.

Difracción e interferencia por N rendijas. Redes de difracción

9) Considere el sistema experimental formado por una **red de difracción** iluminada con luz láser:

a) ¿Cuáles son las características del patrón observado en la pantalla? ¿Qué diferencia existe con el patrón obtenido con las ranuras dobles? Explique

b) Mida la posición de los máximos y calcule la distancia de separación de las rendijas.

c) Calcule la cantidad de líneas por cm que tiene la red.

10) Cambie la red de difracción por otra con mayor o menor cantidad de líneas por cm y repita las actividades anteriores.

11) Un disco compacto funciona como una red de difracción por reflexión. Utilice el láser para obtener el patrón de difracción y estime la cantidad de líneas por cm para un CD. Explique la dispersión de la luz blanca por un CD o un DVD.