

Experimento de la doble rendija de Young: análisis de libros de texto universitarios

Young double slit experiment: analysis of university textbooks

Norah Giacosa¹, Ramiro Galeano¹, Claudia Zang¹, Jorge Maidana¹, y Alejandro Such¹

¹Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Misiones. Félix de Azara 1552, CP 3300, Posadas, Misiones. Argentina.

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

E-mail: norahgiacosa@gmail.com

Resumen

Se muestran resultados de un estudio descriptivo de casos múltiples. Se examinó el tratamiento dado al experimento de Young en diez libros de texto universitarios de uso frecuente en el ciclo básico de carreras científico-tecnológicas que se ofrecen en Argentina. Se empleó el análisis de contenido para dar cuenta del sistema simbólico y lingüístico empleado. De él se infiere que las expresiones formales que cuantifican el fenómeno de interferencia son disímiles, siendo la ecuación de irradiancia la que presenta mayor diferencia. Algunos supuestos del modelo de onda electromagnética se explicitan con mayor frecuencia que el relativo a la uniformidad de la iluminación en el centro de la pantalla si se obtura una de las rendijas. Ciertas comparaciones entre el tamaño de las rendijas y la longitud de onda, como así también el uso inadecuado de la palabra rayo podrían inducir en los estudiantes algunas concepciones erróneas reportadas por otros investigadores.

Palabras clave: Experimento de Young; Libros de texto; Física; Universidad.

Abstract

Results of a descriptive study of multiple cases are shown. The treatment given to Young's experiment in ten university textbooks frequently used in the basic level of scientific-technological careers offered in Argentina was examined. The content analysis was used to account for the symbolic and linguistic system used. From this it is inferred that the formal expressions that quantify the phenomenon of interference are dissimilar, being the irradiance equation the one which presents the greatest difference. Some assumptions of the electromagnetic wave model are made explicit more often than the related to the uniformity of the illumination in the middle of the screen if one of the slits is clogged. Certain comparisons between the size of the slits and the wavelength, as well as the inadequate use of the word ray could induce in the students some misconceptions reported by other researchers.

Keywords: Young's experiment; Textbooks; Physics; University.

I. INTRODUCCIÓN

Investigaciones anteriores mostraron que los estudiantes universitarios tienen dificultades para el aprendizaje de óptica ondulatoria (Bravo, 2017; Kesonen y otros, 2017; Ambrose y otros, 1999a; Colombo y otros, 1995). Se sostiene que la comprensión conceptual se ve obstaculizada por múltiples factores, entre ellos se resalta la complejidad y la abstracción intrínsecas del concepto de ondas electromagnéticas en el que se basa la teoría ondulatoria clásica de la luz (Ambrose y otros, 1999b). La comprensión de los fenómenos ondulatorios en general; y en particular, los inherentes a óptica ondulatoria requiere que los estudiantes sean capaces de pensar en características espaciales conjuntamente con características temporales pues el estado oscilatorio depende tanto de la coordenada espacial como del tiempo transcurrido. Esta necesidad del procesamiento espacio-temporal simultáneo es un desafío particular para los estudiantes. Otro obstáculo pedagógico es que la comprensión del tema está condicionada por las habilidades y competencias matemáticas que posean los estudiantes (Mešić y otros, 2019, Jiwalak y otros, 2018). Por su parte, Kesonen y colaboradores (2017) afirman que algunas de las confusiones de los estudiantes están asociadas a las características perceptibles de las fuentes de luz y a las presentaciones que se realizan en los libros de texto (LT).

En los LT de Física recomendados frecuentemente en el ciclo básico de carreras científico-tecnológicas, la teoría ondulatoria clásica se emplea para describir el formalismo del fenómeno de interferencia, en particular, el experimento de la doble ranura de Young. El modelo se construye sobre la base de cuatro *supuestos*: a) coherencia espacial y temporal de las ondas luminosas; b) rendija de ancho estrecho, pero mayor que la longitud de onda de la luz; c) distancia de separación de rendija muy pequeña en comparación con la distancia entre el cuerpo opaco que las contiene y la pantalla donde se proyecta el patrón de radiación estacionario o el ángulo de posición angular pequeño para que la aproximación $\text{sen}\theta \approx \text{tg}\theta$ sea válida; y, d) uniformidad de iluminación en el centro del patrón de interferencia si se tapa una de las rendijas.

La descripción del fenómeno suele presentarse, en esos LT, partiendo de esquemas semejantes al mostrado en la Figura 1. El dibujo no está a escala, se supone que $L \gg d$ y que bajo esas condiciones los segmentos S_1P y S_2P son prácticamente paralelos.

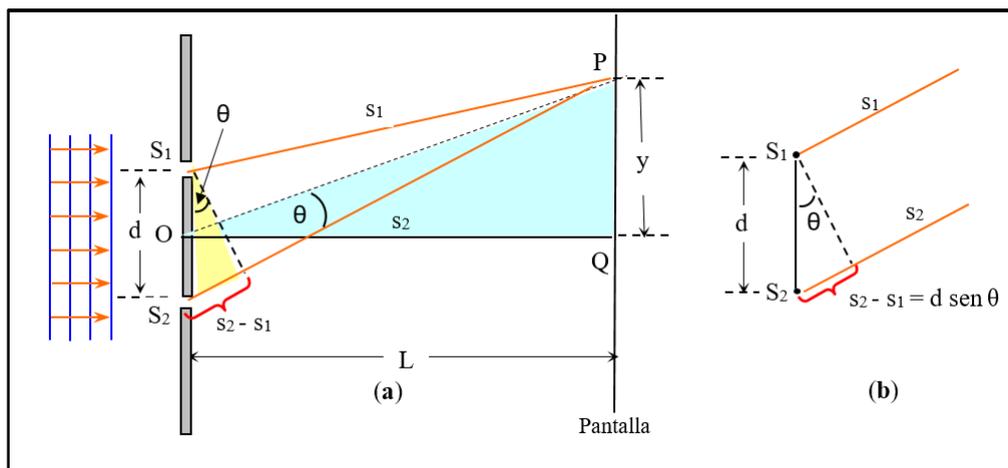


FIGURA 1.(a) Diagrama esquemático del experimento de Young; (b) ampliación de la diferencia de camino óptico.

Las expresiones simbólicas que describen la posición angular de la máxima interferencia constructiva (franja brillante) y la posición angular de la máxima interferencia destructiva (franja oscura) que se derivan a partir de él son semejantes a las indicadas en las ecuaciones (1) y (2) respectivamente. Donde d es la separación entre ranuras, θ es el ángulo POQ, m es el número de orden y λ es la longitud de onda empleada en el experimento.

$$d \text{sen}\theta = m\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{1}$$

$$d \text{sen}\theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{2}$$

Las posiciones lineales de la máxima interferencia constructiva y la máxima interferencia destructiva, si el ángulo θ es suficientemente pequeño como para que la aproximación $\text{sen}\theta \approx \text{tg}\theta = y/L$ sea válida, suelen presentarse mediante las ecuaciones (3) y (4) respectivamente; en ellas, y representa la distancia QP y L la distancia entre el plano que contiene las ranuras y la pantalla.

$$y = \frac{m\lambda L}{d} \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{3}$$

$$y = \frac{\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda L}{d} \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{4}$$

Asimismo, la separación entre dos máximos consecutivos de interferencia constructiva o dos máximos consecutivos de interferencia destructiva del patrón de interferencia se presentan mayoritariamente como indica en la ecuación (5).

$$\Delta y = \frac{\lambda L}{d} \quad (5)$$

Como el patrón de interferencia es equivalente al obtenido para dos ondas esféricas superpuestas, las deducciones parten, generalmente, de la ecuación de la irradiancia ($I = 4I_0 \cos^2(\phi/2)$) donde I_0 es intensidad individual de cada fuente $I_0 = I_{01} = I_{02} = \epsilon_0 c E_0^2 / 2y\Phi$ es la fase constante de ondas electromagnéticas que provienen de S_1 y S_2) para derivar en las ecuaciones de: intensidad del patrón de interferencia en función de la posición angular, (6); e intensidad del patrón de interferencia en función de la posición lineal (válida solo si $\text{sen}\theta \approx \text{tg} = y/L$), (7).

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi d}{\lambda} \text{sen}\theta\right) \quad (6)$$

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi ly}{\lambda L}\right) \quad (7)$$

El propósito de esta investigación es analizar el sistema simbólico y el sistema lingüístico que se usa en los LT seleccionados para describir el experimento de Young.

II. ANTECEDENTES TEÓRICOS

Existe una variada investigación centrada en los LT y en el campo de la óptica. Se pueden hallar publicaciones dedicadas al tratamiento dado a los fenómenos de interferencia y difracción en LT universitarios (Bravo y Pesa, 2016, Bravo y Pesa, 2017) y al principio de Huygens (Araújo y da Silva, 2009, Krapas, 2008, Krapas y otros, 2011). Otras se centran en el impacto visual de las representaciones empleadas en óptica (Maurines, 2009), la comprensión de los fenómenos de interferencia y difracción (Ambrose y otros, 1999a) y a la enseñanza del experimento de Young (Mešić y otros, 2019; Jiwalak y otros, 2018; Bravo, 2017; Jarabo, 2015).

En los últimos reportes es posible identificar algunas ideas erróneas más recurrentes relacionadas con la interferencia de la doble rendija de Young. Así por ejemplo, se han señalado las siguientes equivocaciones: a) el tamaño de las rendijas debe ser menor o igual a la longitud de onda; b) la luz no puede pasar las rendijas si el ancho de ellas es menor que la longitud de onda de la luz, c) entre la pantalla que contiene las ranuras y la pantalla de proyección del patrón de interferencia no hay luz, d) la luz se propaga de forma rectilínea a través del centro de las rendijas, mientras que los efectos de difracción ocurren solo en los bordes de las mismas, e) la diferencia de longitud de la trayectoria óptica se vuelve insignificante en puntos distantes, f) cada una de las dos rendijas es responsable de generar la mitad del patrón de interferencia en la pantalla, g) la intensidad de la luz en un punto arbitrario de la pantalla es igual a la suma de las intensidades originadas por cada una de las fuentes, h) en el patrón solo existen la máxima interferencia constructiva y la máxima interferencia destructiva de las ondas (no perciben las variaciones de la irradiancia entre ellas), i) el ángulo entre los fasores (diferencia de fase) es igual al ángulo usado para ubicar los máximos/mínimos del patrón de interferencia y j) emplean modelos “híbridos” (óptica geométrica y óptica física) para explicar el fenómeno, entre otros (Ambrose y otros, 1999a, Mešić y otros, 2019).

Colombo y otros (1995) sostienen que la difracción y la polarización podrían entenderse bien si el punto de partida fuera una comprensión profunda del concepto de interferencia de la luz y, asociado con esto, el concepto fundamental y nada intuitivo de la coherencia de la luz. Según ellas, la mayoría de los LT frecuentemente empleados para estudiar óptica física, representa la luz con un modelo tan ideal: una onda espacial y temporal infinita, linealmente polarizada, con amplitud y frecuencia constantes y fase inicial determinada, que incluso un láser no tiene tales características.

Por otro lado, en la revisión de Schirmer y Sauerwein (2017) se muestra que en Brasil se publicaron 394 reportes de investigación dedicados a los libros didácticos en siete años (2007-2014); y en la de Ribeiro y Carneiro (2016) se reportan 152 artículos nacionales e internacionales centrados en el fenómeno de refracción de la luz en veinte años (1995-2015). Pese a lo mencionado, según el conocimiento de los autores, no existen publicaciones dedicadas específicamente a investigar el sistema lingüístico (expresiones verbales) y el sistema simbólico (ecuaciones, gráficos, esquemas) (Alexander y Kulicowich, 1994) empleado en LT que abordan el experimento de Young, tal como el que aquí se presenta.

III. METODOLOGÍA

Se planteó investigar, mediante el análisis de contenido (Bardín, 1996), el tratamiento dado al experimento de Young en una muestra intencional de diez LT de Física de uso frecuente en el ciclo básico universitario. En la tabla I se muestran las obras seleccionadas y el código asignado a cada una.

TABLA I. Código asignado a los libros de texto seleccionados.

T1	Alonso, E. y Finn, E. (1976) <i>Física. Vol. II Campos y ondas</i> . Barcelona: Fondo Educativo Interamericano.
T2	Bauer, W. y Westfall, G. (2011) <i>Física para Ingeniería y Ciencias con Física moderna. Volumen 2. (1° ed.)</i> . México: McGraw Hill.
T3	Gettys, E., Keller, F. y Skove, M. (2005) <i>Física para Ciencias e Ingeniería. Tomo II</i> . México: McGraw Hill.
T4	Giancoli, D. (2009) <i>Física para Ciencias e Ingeniería con Física moderna. Volumen II. (4° ed.)</i> . México: Pearson Educación.
T5	Resnick, R., Halliday, D. y Krane, K. (2002). <i>Física. Vol. 2. (5° ed.)</i> . México: Compañía Editorial Continental.
T6	Rex, A. y Wolfson, R. (2011) <i>Fundamentos de Física</i> . España: Pearson Educación.
T7	Serway, R. y Jewett, J. (2009) <i>Física para ciencia e ingeniería con Física Moderna. Vol. 2. (7° ed.)</i> . México: Cengage Learning.
T8	Tipler, P. (1993) <i>Física. Tomo 2. (3° ed.)</i> . España: Reverté.
T9	Wilson, J., Bufa, A. y Lou, B. (2007) <i>Física. (6° ed.)</i> México: Pearson Educación.
T10	Young, H. y Freedman, R. (2009) <i>Física universitaria con Física Moderna. Vol. 2. (12° ed.)</i> . México: Pearson Educación.

Los capítulos o secciones dedicados al estudio del experimento de Young fueron unidades de análisis específicas y los precedentes relacionados al tema, unidades de análisis complementarias. Se examinó tanto el sistema simbólico como el lingüístico para identificar principalmente las expresiones formales que cuantifican el fenómeno y las menciones explícitas que se hacen de los supuestos del modelo citado respectivamente. Se emplearon las variables: *coherencia, tamaño de rendijas, distancia de separación de rendijas, tamaño de ángulo, formas geométricas de las ondas, uniformidad de iluminación en el centro de patrón, amplitud de onda, intensidad de onda, alusión al modelo de óptica geométrica y otras cuestiones*.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la mayoría del los LT examinados (8/10) el experimento de Young se describe mediante: a) la *posición angular* o *posición lineal* de las franjas de interferencia y b) la *intensidad del patrón* de interferencia producido por dos fuentes coherentes. Existen dos ejemplares (T6 y T9) donde se aborda únicamente el primero de los aspectos mencionados. El orden de exposición que predomina, en los LT donde se describen ambos aspectos, es el que muestra primeramente las *posiciones* y luego la *intensidad del patrón* de interferencia (T2, T3, T4, T5, T7, T8, T10), existiendo un solo ejemplar (T1) donde el orden es inverso. En la tabla II se indica con “T” los LT que muestran expresiones “semejantes” a las señaladas en las ecuaciones numeradas del (1) al (7), durante la descripción conceptual del fenómeno, con “P” las que se pueden derivar de los problemas resueltos exhibidos, y con rayas “---” las ausencias.

TABLA II. Libros de texto y presencia de ecuaciones en desarrollo teórico o problemas resueltos.

LT	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Total	%
Ec. (1)	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	10	100
Ec. (2)	---	T	T	T	T	---	T	T	---	T	7	70
Ec. (3)	T	T	---	P	T	T	T	T	T	T	9	90
Ec. (4)	---	T	---	---	---	T	T	---	---	---	3	30
Ec. (5)	T	---	P	---	T	---	P	T	P	---	6	60
Ec. (6)	T	T	T	T	T	---	T	T	---	T	7	70
Ec. (7)	T	T	T	T	---	---	T	T	---	T	6	60

Al analizar las ecuaciones (1) a (5), de la tabla II, que cuantifican el primer aspecto mencionado, se deriva que en la totalidad de los LT de la muestra examinada se prioriza la descripción del experimento mediante ecuaciones que permiten determinar la posición angular de franjas brillantes (100%) y la posición lineal de franjas brillantes (90%). Sigue, en orden decreciente de aparición, posición lineal de franjas oscuras (70%), separación entre franjas (brillantes u oscuras) consecutivas (60%) y posición angular de franjas oscuras (30%). En la tabla III se muestran las notaciones empleadas en cada ejemplar. La ausencia de esa variable es señalada con tres guiones.

TABLA III. Notación de las variables en cada LT.

Variables	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Separación de rendijas	a	d	d	d	d	d	d	d	d	d
Distancia a la pantalla	D	L	L	l	D	L	L	L	L	R
Relación de caminos ópticos	$r_1 > r_2$	$r_2 > r_1$	$r_1 > r_2$	$s_2 > s_1$	$r_1 > r_2$	$r_2 > r_1$	$r_2 > r_1$	$s_2 > s_1$	$r_2 > r_1$	$r_1 > r_2$
Ángulo de franja brillante	θ	θ	θ_m	θ	θ	θ	$\theta_{\text{brillante}}$	θ	θ	θ
Ángulo de franja oscura	---	θ	θ_m	θ	θ	---	θ_{oscuro}	θ	---	θ
Nº de orden de brillante	n	m	m	m	m	n	m	m	n	m
Nº de orden de oscuro	---	m	m'	n	---	---	m	m	---	m
Posición lineal franja brillante	x	y	x	x	y_m	y	$y_{\text{brillante}}$	y_m	y_n	y_m
Posición lineal franja oscura	---	y	---	---	--	y	y_{oscuro}	---	---	---
Diferencia de camino óptico	$r_1 - r_2$	Δx	$r_1 - r_2$	$s_2 - s_1$	$r_1 - r_2$	Δr	δ	$d \sin \theta$	ΔL	$r_2 - r_1$
Diferencia de fase	δ	Φ	Φ	δ	Φ	---	Φ	δ	---	Φ
Separación entre dos bandas brillantes/oscuras consecutivas	Δx	---	Δx	---	$x_2 - x_1$	---	$y_{m+1} - y_m$	Δy	$y_3 - y_2$	---

De ella se deduce que el sistema simbólico es disímil, existiendo nomenclaturas iguales para representar distintas variables. Así, Δx simboliza separación entre franjas brillantes/oscuras consecutivas en T1 y T3, en cambio representa la diferencia de camino óptico en T2. De igual manera, la diferencia de camino óptico se interpreta con δ en T7, pero en T1, T4, y T8 significa diferencia de fase. La notación empleada para el número de orden brillante u oscuro, en algunos ejemplares se indica que admite valores: “0, ± 1 , ± 2 , ± 3 , ...” (T2, T5, T7, T10), “0, 1, 2, 3, ...” (T3, T4, T8, T9) o “es un número entero positivo o negativo” (T1). Existe un solo ejemplar (T6) donde n se restringe a “números impares” porque la ecuación de la posición lineal que se muestra es $y = (n\lambda L)/(2d)$.

Las ecuaciones que se refieren a la intensidad de la radiación del patrón de interferencia en función de ángulo que describe la posición angular [$I=f(\theta)$] y la posición lineal [$I=f(y)$] respectivamente son heterogéneas en la muestra examinada. En algunos ejemplares (T2, T3, T5, T8), se presentan de manera semejante a como se expusieron las ecuaciones (6) y (7) y en otros (T1, T4, T7, T10) no se muestra el factor de multiplicación 4. En los primeros I_0 representa la intensidad máxima de cada fuente individual ($I_0 = I_{01} = I_{02} = \epsilon_0 c E_0^2 / 2$) y las ecuaciones que la cuantifican concuerdan con las definiciones dadas a la intensidad de la onda electromagnética en función de la magnitud media del vector de Poynting en secciones anteriores. En cambio, en los segundos la intensidad máxima de dichas ecuaciones es igual a la cuarta parte de la intensidad máxima de cada fuente ($I_0 = I_{01}/4 = I_{02}/4$). En estos últimos ejemplares, el único LT que formaliza el valor de I_0 es T10, en él se indica que $I_0 = 2\epsilon_0 c E^2$; en el resto se señala: “ I_0 es la intensidad para $\theta=0$ ” (T1, p. 892), “la intensidad máxima en el centro de la pantalla” (T4, p. 908) y “ $I_{\text{máx}}$ es la intensidad máxima en la pantalla” (T7, p. 1058). Del análisis de las definiciones dadas al vector de Poynting se infiere que I_0 implícitamente representa: $I_0 = 2\epsilon_0 c E^2$ en T1 y T4 e $I_{\text{máx}} = 2E_{\text{máx}}^2 / \mu_0 c$ en T7.

En relación al sistema lingüístico, en todos los ejemplares analizados se explicita el supuesto de coherencia como condición necesaria para que se produzca el fenómeno de interferencia. En algunos de ellos la coherencia se presenta como sub-título, definición, con viñetas o resaltado de letras. La mayoría de LT coincide en explicitar que dos fuentes luminosas son coherentes si poseen la misma longitud de onda y mantienen la misma relación de fase mutua en todo momento y todo lugar. En algunos LT se explicita que para visualizar el diagrama de interferencia: “...no es necesario que la diferencia de fase entre las ondas emergentes sea igual a cero; sin embargo, existe un requisito para esta diferencia de fase, y es que esta debe permanecer constante” (T3, p. 900), o, “...si están en fase o tienen una diferencia de fase que se mantiene constante en el tiempo” (T8, p. 1068) y “... con una relación de fase constante (no necesariamente en fase) ...” (T10, p. 1209). En varios ejemplares la luz monocromática se asocia con la luz del láser, no obstante, en algunos se aclara que “...no es necesario usar luz coherente monocromática de

láser para realizar este experimento, pero hacerlo simplifica el análisis siguiente y la explicación de la interferencia de doble rendija” (T2, p. 1001). En otros, se describe la experiencia empleando una bombilla incandescente forrada con papel celofán rojo (T3) y se destacan aspectos históricos del experimento original realizado con luz visible (T5, T6, T9). Así puede leerse: “La interferencia de ondas luminosas (visibles) no se observa con tanta facilidad porque sus longitudes de onda son relativamente cortas ($\approx 10^{-7} \text{ m}$) y porque no son monocromáticas (de una sola frecuencia)” (T9, p. 761) o “En virtud de que no había láseres en la época de Young; él generó una fuente de luz coherente, dejando que el sol incidiera sobre una pequeña abertura...” (T5, p. 944).

En todos los ejemplares se explicita que el tamaño de las rendijas debe ser pequeño, pero solo en determinados LT se proporcionan elementos comparativos. En algunos (T2, T5, T9) se compara con la longitud de onda, en otros se indica que son tan pequeñas que pueden considerarse fuentes puntuales (T5, T8) y solo en uno (T10) se indica un valor aproximado de $1 \mu\text{m}$. Así, en los primeros puede leerse: “...las dos rendijas son muy estrechas de ancho, comparable a la longitud de onda de la luz y están separadas una distancia grande comparada con el ancho de cada una” (T2, 1100), “El ancho es pequeño en comparación con la longitud de onda” (T5, p. 942) y “Se considera que un objeto o una abertura son pequeños si sus dimensiones son del orden de magnitud de la longitud de onda de la luz” (T9, p. 760). Dado que el primer mínimo de difracción, según este modelo, se produce en $b \sin \theta = \lambda$, siendo b el ancho de la rendija, necesariamente b debe ser mayor que λ para que el $\sin \theta$ sea menor a uno, la afirmación de T5 es errónea y la de T9 es confusa.

Algo semejante sucede con el valor de la distancia de separación de las rendijas (d), para la mayoría de los LT (T3, T4, T5, T6, T7, T9) su valor es pequeño en comparación con la distancia entre los planos de incidencia y proyección (L), es grande comparada con el ancho de cada una (T2) y en un solo LT (T10) se indica un valor aproximado de unas decenas o centenas de micrómetros. En todos los LT se señala que el ángulo de la posición angular es pequeño y las comparaciones empleadas refieren mayoritariamente a la aproximación $\sin \theta \approx \theta$ y minoritariamente a $\sin \theta \approx \theta$ si el ángulo se mide en radianes.

En cuatro LT (T4, T5, T6, T7) se puede leer que la onda que incide en la pantalla que contiene las ranuras es plana, en tres ellos se localiza en el texto que describe el tema (T4, T5, T7) y en el restante (T6) se especifica en una figura (22.9, T6). Asimismo, en siete ejemplares se explicitan la forma geométrica de las ondas que se generan cuando la luz atraviesa las dos ranuras, en la mayoría de ellos (T3, T6, T8, T10) se sostiene que son cilíndricas y en el resto (T1, T2, T5), que son esféricas. En algunos casos dicha información hay que extraerla de figuras (22.9, T6) o de epígrafes de figuras (33.8, T8). En el resto de los LT (T4, T7, T9) no se explicita la forma de onda, aunque existen dos ejemplares que proporcionan indicios o remiten a figuras. Así puede leerse: “...como se explicó en el análisis del principio de Huygens [...], las ondas se extienden desde las ranuras como se ve en la figura 37.1b.” (T7, p. 1052) de donde se infiere que las ondas son esféricas. En otro se indica: “Debido a la difracción, las ondas que salen de las dos pequeñas rendijas hacia afuera como se indica” haciendo referencia a la figura 34-6. (T4, p. 903). Dado que figuras semejantes, tales como las 41.3 (T5) y 22.10 (T6), representan ondas esféricas y cilíndricas respectivamente, no se pueden realizar ninguna inferencia en este último LT.

En cuatro LT (T2, T3, T4, T5) es posible identificar el supuesto relativo a la uniformidad de iluminación en el centro del patrón de interferencia. En algunos de ellos se señala que las fuentes son idénticas y que la luz difractada de cada fuente ilumina uniformemente la parte central de la pantalla (T3, T4, T5) o simplemente: “Cubrir una rendija produce una intensidad de $I_{\text{máx}}$ en todos los valores de y ” (T2, p. 1104) o “ I_0 no depende de la posición” (T5, p. 947). Asimismo, existen aclaraciones respecto a estas idealizaciones tales como: “Esto nunca es totalmente cierto, como se verá cuando se estudie la difracción en siguiente capítulo. Veremos que el máximo central es más intenso y que cada máximo sucesivo a cada lado es un poco menos intenso” (T4, p. 909).

En tres ejemplares (T2, T7, T10) se indica la amplitud máxima de onda resultante de la superposición de las ondas individuales de igual amplitud es el doble de la amplitud de las ondas individuales si la interferencia es constructiva. En ellos se explicita: “Las amplitudes de dos ondas se suman, dando una onda con la misma frecuencia, pero el doble de amplitud de las dos ondas originales” (T2, p. 1100),

La amplitud de la onda resultante es $2A_0 \cos \delta/2$. Posee un valor máximo igual a $2A_0$ cuando las ondas se encuentran en fase ($\delta=0$ o un número entero de veces 2π), y es igual a cero cuando están desfasadas 180° ($\delta=\pi$ o un número impar de π). (T7, p. 1069)

Y “Si se promedia la ecuación $I = I_0 \cos^2 \Phi/2$ con respecto a todas las posibles diferencias de fase, el resultado es $I_0/2 = \epsilon_0 c E^2$. Esto es el doble de la intensidad de cada fuente individual” (T10, p. 1216).

En tres LT (T5, T8, T10) se explicita que la intensidad máxima del patrón es cuatro veces mayor que la intensidad individual de cada fuente. En uno ellos, que toma las ecuaciones (6) y (7) como se mostraron anteriormente, se indica:

...la intensidad máxima I_0 que se presenta en los puntos donde la diferencia de fase es igual a cero ($\Phi=0$) es $I_0=2 \epsilon_0 c E^2$. Advierta que la intensidad máxima I_0 es el cuádruple (no el doble) de la intensidad $\frac{1}{2} \epsilon_0 c E^2$. (T10, p. 1215)

Y se reitera: “Para algunos ángulos de fase Φ , la intensidad es I_0 , que es cuatro veces más grande que para una fuente individual de onda, pero para otros ángulos de fase de intensidad es igual a cero” (T10, p. 126). En otros, que toman las mismas ecuaciones multiplicadas por el factor 4 se señala:

Nótese que la intensidad de la onda resultante en un punto P cualquiera fluctúa entre cero (en un punto donde $\Phi (=2\beta) = \pi$, por ejemplo) y cuatro veces la intensidad I_0 de las ondas individuales (en un punto donde $\Phi (=2\beta) = 0$, por ejemplo). (T5, p. 946)

Y “Si las amplitudes son iguales, la intensidad máxima es cuatro veces la de cada foco” (T8, p. 1062), y también “La intensidad máxima es $4I_0$ siendo I_0 la intensidad debida a cada rendija por separado” (T8, p. 1070).

Con relación al *modelo de óptica geométrica* es de hacer notar que en la mitad de los LT (T1, T2, T3, T6, T9) no se menciona la palabra *rayo*, durante la explicación del fenómeno de interferencia de la doble ranura. Existen dos ejemplares (T8, T10) que la emplean una vez, en ambos casos en el epígrafe de figuras que muestran la ampliación de las rendijas [semejantes a la Figura 1 (b)] para indicar: “...los rayos procedentes de estas que van a un punto de la pantalla son casi paralelos” (T8, p. 1069) y “...los rayos son paralelos...” (T10, p. 1211). En T7 se usa tres veces para señalar:

...una sola fuente produce el rayo de luz original y las dos ranuras sirven solo para separar el rayo original en dos partes[...]Cualquier cambio aleatorio en la luz emitida por la fuente se presenta en ambos rayos al mismo tiempo. (T7, p. 1052)

En T4 se emplea en cinco ocasiones para referirse a: rayos solares, haz de rayos paralelos, dirección de avance del frente de la onda y trayectoria desde la ranura a la pantalla. Así, puede leerse: “La interferencia constructiva también ocurre cuando las trayectorias de los dos rayos difieren en una longitud de onda[...]Pero si un rayo recorre una distancia adicional de media longitud de onda...” (T4, p. 904).

En T5 se usa la palabra *rayo* en diez ocasiones para explicar lo que sucede con la luz entre la pantalla que contiene las ranuras y la pantalla de proyección. En ese contexto puede leerse:

Los rayos que llegan a P en la figura 41-5 provenientes de S_1 y S_2 estaban originalmente en fase[...] Como los rayos recorren diversas distancias[...] los dos rayos deben llegar en fase, Los dos rayos procedentes de S_1 y S_2 se combinan en P [...] la fase de dos rayos debe diferir en un múltiplo impar de π [...] los rayos paralelos procedentes de las rendijas[...] los rayos r_1 y r_2 son estrictamente paralelos[...] una diferencia de fase debe existir entre los rayos[...] los rayos paralelos enfocados por una lente[...] y Dos rayos con iguales longitudes de camino óptico contienen el mismo número de longitud de onda... (T5, p. 943-944)

Dado que estos mismos autores, en el primer volumen de su obra, sostienen que: “Una línea normal a los frentes de ondas, que indique la dirección del movimiento de las ondas, se llama rayo” (Resnick, Halliday y Krane, 2001, p. 467), se sostiene que es inadecuado referirse a la “fase” del rayo o a su “combinación”.

Entre otras cuestiones que se mencionan en un único ejemplar de la muestra es de destacar que: a) se explicita que el término *destructiva* no significa que la energía se destruya, sino que se redistribuye y se cumple el principio de conservación de la energía (T9), b) se puede caracterizar la onda de luz por su campo magnético (β) o su campo eléctrico (E), generalmente se emplea E porque los efectos de β en el ojo humano y en varios detectores de luz son extraordinariamente pequeños (T5) y c) al analizar el patrón de interferencia la atención está centrada en la amplitud de la perturbación de onda resultante y no en su variación temporal porque el ojo humano y otros instrumentos de medición no detectan las rápidas variaciones temporales que caracterizan a la luz visible (T5).

V. REFLEXIONES FINALES

Se mostró una manera posible de analizar el tratamiento dado al experimento de Young en los LT frecuentemente recomendados en el ciclo básico universitario. Se infiere que el sistema simbólico es disímil, existiendo notaciones idénticas que representan distintas variables, en algunos casos se tratan de longitudes (Δx); en otros, la misma notación (δ) representa ángulo o longitud dependiendo del libro. La mayor diferencia en las expresiones formales se presenta en la irradiancia, notándose que de cuatro LT (T1, T4, T7, T10) que no emplean el factor cuatro, solo uno (T10) indica explícitamente lo que representa la inten-

sidad máxima. Es imprescindible explicitar estas cuestiones a los estudiantes porque, aunque parezcan triviales, dificultarían el aprendizaje, fundamentalmente si estudian con distintos títulos extraídos de biblioteca.

En el sistema lingüístico es posible identificar con mayor frecuencia los primeros tres supuestos del modelo de onda electromagnética, pero en solo en cuatro de los ejemplares se explicita la uniformidad de iluminación en el centro del patrón de interferencia si se obtura una de las rendijas. En un solo ejemplar, T10, se proporciona un valor comparativo para el tamaño de la rendija y en ninguno se escribe explícitamente que su tamaño debe ser mayor que la longitud de onda. De la afirmación realizada en T5 (ancho pequeño en comparación con λ) y en T9 (idéntico orden de magnitud del ancho de la rendija y λ) se infiere que ciertas presentaciones realizadas en los LT fomentarían algunas de las ideas erróneas detectadas en los estudiantes por Ambrose y otros (1999a) y Maurine (2009). El contexto donde se emplea la palabra rayo en los ejemplares analizados generalmente representa la dirección de avance de la onda, existiendo un uso inadecuado, reiterativo y contradictorio en T5 que podría inducir los modelos “híbridos” reportados en otras investigaciones (Ambrose y otros, 1999a, Bravo, 2017).

Los aspectos no explorados en esta presentación, por falta de espacio, fueron las representaciones visuales y consecuentemente los enfoques de enseñanza privilegiados en los LT. Se estima que es una línea de investigación escasamente explorada en este tema y promisoría para nuevos trabajos. Dadas las características del estudio, los resultados no son generalizables, no obstante, se espera que puedan servir de insumo a docentes-investigadores. Asimismo, se anhela promover más estudios dedicados al análisis de LT, previos a su recomendación.

Nota: Este trabajo se realizó en el marco del Proyecto de investigación Código 16Q-661 registrado en la Secretaría de Investigación y Posgrado de la FCEQyN (UNaM).

REFERENCIAS

- Alexander, P. y Kulikowich, J. (1994). Learning from Physics text: A synthesis of recent research. *Journal of research in science teaching*,31(9),895-911.
- Ambrose, B.; Shaffer, P; Steinberg, R. y Mc Dermott, L. (1999a). An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference. *American Journal of Physics*, 67(2), 146-155.
- Ambrose, B., Heron, P., Vokos, S. y McDermott, L.(1999b). Student understanding of light as an electromagnetic wave: Relating the formalism to physical phenomena. *American Journal of Physics*,67(10), 891-898.
- Araújo, S. y da Silva, F. (2009). A teoria ondulatória de Huygens em livros didáticos para cursos superiores. *Ciência & Educação*, 15(2),323-341.
- Bardín, L. (1996).*El análisis de contenido*. Madrid: Akal.
- Bravo, S. (2017). La experimentación en el aprendizaje de la física: su incidencia en la construcción de conceptos referidos a la óptica ondulatoria. Tesis Doctoral. UNCPB.
- Bravo, S. y Pesa, M. (2017). El tratamiento didáctico de los fenómenos de interferencia y difracción en textos de nivel universitario. *Revista de Enseñanza de la Física*,29, 215-226.
- Bravo, S. y Pesa, M. (2016). Evaluación del aprendizaje de interferencia y difracción de la luz en el laboratorio de física. *Investigações em Ensino de Ciências*,21(2), 68-104.
- Colombo, E., Jaen, M. y Cudmani, L. (1995).The concept of coherence of learning physical optics, *SPIE Proceedings*, 2525(1441), 452-458.
- Jarabo, S. (2015). Young and Fresnel without sodium lamp. *Óptica pura y aplicada*,48(3), 243-247.
- Jiwalak, A., Emarat, N., y Arayathanitkul, K. (2018). An activity sheet for teaching double-slit interference. *Journal of Physics: Conference Series*, 1144(1), 012020.

Kesonen, M., Asikainen, M. y Hirvonen, P. (2017). Light source matters –students’ explanations about the behavior of light when different light sources are used in task assignments of optics. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 13(6), 2777-2803.

Krapas, S. (2008). El Tratado sobre la Luz de Huygens y su transposición didáctica en la enseñanza introductoria de Óptica. *Revista de Enseñanza de la Física*, 21(2), 49-60.

Krapas, S., Pessôa G. y Uzêda, D. (2011). O tratado sobre a luz de Huyguens: comentários. *Caderno Brasileiro de Ensino Física*, 28(1), 123-151.

Mešić, V., Neumann, K., Aviani, I., Hasović, E., Boone, W., Erceg, N., Grubelnic, V., Sušac, A., Glamović, D., Karuza, M., Vidak, A. Alihodžić, A. y Repnik, R. (2019). Measuring students’ conceptual understanding of wave optics: A Rasch modelling approach. *Physical Review Physics Education Research*, 15(1), 010115.

Maurines, L. (2009). Geometrical Reasoning in Wave Situations: The case of light diffraction and coherent illumination optical imaging. *International Journal of Science Education*, 32(14), 1895-1926.

Resnick, R., Halliday, D. y Krane, K. (2001). *Física. Vol. 1.* (4^o ed.). México: Compañía Editorial Continental.

Ribeiro, J. y Carneiro, M. (2016). A reflexão da luz nos periódicos de Ensino de Física: evidenciando tendências e carências de pesquisa a partir de uma revisão bibliográfica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 33(2), 355-398.

Schirmer, S. y Sauerwein, I. (2017). Livros didáticos em publicações na área de ensino: contribuições para análise e escolha. *Investigações em Ensino de Ciências*, 22(1), 23-41.