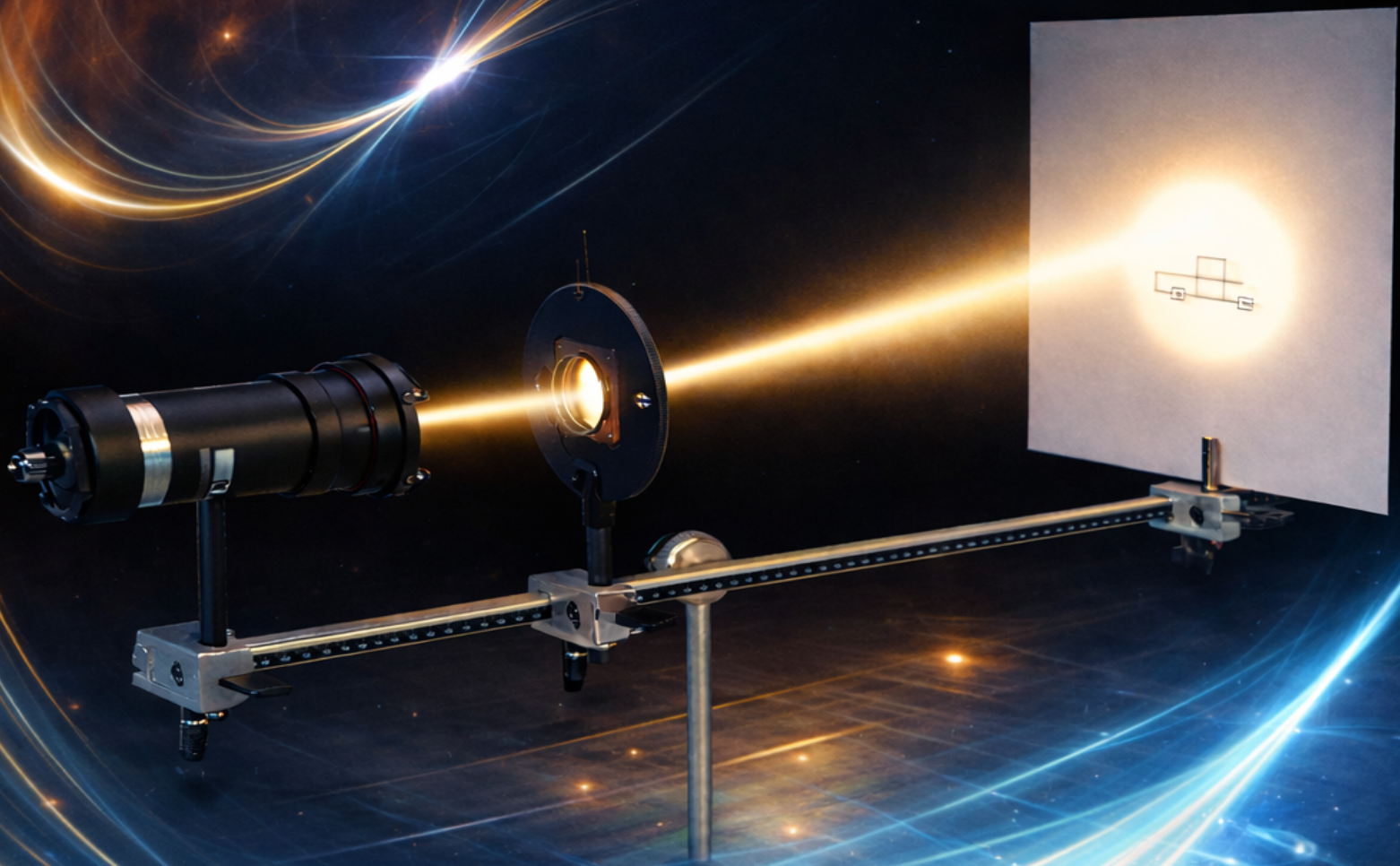


ÓPTICA EXPERIMENTAL



Jorge Enrique Rueda.P



Óptica Experimental: Guía para estudiantes de Física

© 2026, Jorge Enrique Rueda.P

Departamento de Física – Universidad de Pamplona

Grupo Óptica Moderna (GOM)

ISBN: *(por asignar)*

Primera Edición

Queda prohibida la reproducción total o parcial de este material por cualquier medio sin autorización escrita del autor, salvo en los casos permitidos por la legislación vigente.

Índice general

Introducción

Normas de seguridad en el laboratorio de óptica

- 0.1. Normas generales
- 0.2. Seguridad en el uso de láseres
- 0.3. Seguridad eléctrica
- 0.4. Manipulación de componentes ópticos
- 0.5. Uso de sustancias químicas
- 0.6. Comportamiento en caso de accidente

Estructura y redacción del informe

- 0.7. Resumen y Abstract
- 0.8. Introducción
- 0.9. Método y Materiales
- 0.10. Resultados
- 0.11. Discusión de los resultados
- 0.12. Conclusiones
- 0.13. Referencias bibliográficas

Práctica I: Ley de Snell

Práctica II: Focometría usando el método de Badal

Práctica III: Focometría usando el método de Bessel

Práctica IV: Ley de Formación de Imágenes, Lentes

Práctica V: Determinación de la velocidad de la luz en el aire

Práctica VI: Ley de Brewster

Práctica VII: Difracción de la luz en pupilas sintéticas

Práctica VIII: Interferómetro de Michelson

Práctica IX: Polarización la luz, ley de Malus y retardadores

Práctica X: Efecto Pockel's

Introducción

La óptica experimental constituye uno de los pilares fundamentales en la formación del físico y del ingeniero, al proporcionar un espacio privilegiado para la verificación de modelos teóricos, el desarrollo de habilidades instrumentales y la interpretación crítica de fenómenos físicos. En el laboratorio, conceptos que en el aula pueden parecer abstractos adquieren un significado concreto a través de la observación, la medición y el análisis de resultados reales.

A diferencia de otras áreas de la física, la óptica permite acceder de manera directa y visual a una amplia variedad de fenómenos, lo que la convierte en un escenario ideal para introducir al estudiante en el método experimental. La formación de imágenes, la interferencia, la difracción y la polarización no solo ilustran principios fundamentales de la física, sino que también ponen de manifiesto las limitaciones de los modelos ideales cuando se enfrentan a las condiciones reales del laboratorio. Esta guía ha sido diseñada con el objetivo de acompañar de manera progresiva el aprendizaje experimental en óptica. Los primeros capítulos se centran en la óptica geométrica y el estudio de sistemas de lentes e instrumentos ópticos clásicos, estableciendo las bases conceptuales necesarias para comprender fenómenos más complejos. Posteriormente, se abordan prácticas relacionadas con la óptica ondulatoria, en las que la naturaleza ondulatoria de la luz se manifiesta de forma explícita a través de patrones de interferencia y difracción.

A lo largo de todas las prácticas se hace énfasis en el método experimental, el tratamiento adecuado de las incertidumbres y la interpretación física de los resultados. El estudiante es invitado a reflexionar sobre las fuentes de error, las condiciones de validez de los modelos teóricos y la reproducibilidad de las mediciones, entendiendo el laboratorio no como un espacio de verificación mecánica, sino como un entorno de exploración y aprendizaje activo. Finalmente, con este curso de óptica experimental se pretende contribuir a la formación de profesionales capaces de abordar problemas experimentales con rigor, creatividad y sentido crítico. La óptica experimental, más allá de su valor académico, constituye una herramienta esencial en múltiples campos de la ciencia y la tecnología, y su aprendizaje en el laboratorio representa un paso fundamental en la formación integral del estudiante.

Normas de seguridad en el laboratorio de óptica

El trabajo experimental en óptica implica el uso de fuentes luminosas intensas, dispositivos eléctricos, componentes ópticos frágiles y, en algunos casos, sustancias químicas. El cumplimiento estricto de las normas de seguridad es indispensable para prevenir accidentes y garantizar un ambiente de trabajo adecuado para estudiantes y docentes.

Las siguientes normas deben observarse en todas las prácticas descritas en este libro, independientemente del experimento específico que se esté realizando.

0.1. Normas generales

- Está prohibido realizar prácticas de laboratorio sin la supervisión del docente o del responsable del laboratorio.
- Antes de iniciar cualquier experimento, el estudiante debe conocer el objetivo de la práctica y el funcionamiento básico de los equipos a utilizar.
- No se permite el consumo de alimentos o bebidas dentro del laboratorio.
- El área de trabajo debe mantenerse ordenada y libre de objetos ajenos al experimento.
- Cualquier anomalía en el funcionamiento de los equipos debe ser reportada inmediatamente al docente.

0.2. Seguridad en el uso de láseres

El uso de fuentes láser requiere especial atención debido a la alta coherencia y direccionalidad del haz, que pueden causar daños oculares o cutáneos.

- Nunca se debe mirar directamente al haz láser ni a su reflexión especular.
- El haz láser debe mantenerse siempre por debajo o por encima del nivel de los ojos.
- Evite el uso de superficies altamente reflectantes en el trayecto del haz.
- Cuando sea necesario, utilice pantallas difusoras para interceptar el haz.
- No se deben retirar ni modificar las etiquetas de seguridad de las fuentes láser.

Para las prácticas descritas en este libro se emplean principalmente láseres de baja potencia (clases 1, 2 o 3R). Aun así, deben observarse todas las precauciones indicadas.

0.3. Seguridad eléctrica

Muchos montajes experimentales incluyen fuentes de alimentación, controladores electrónicos y dispositivos que operan a tensiones potencialmente peligrosas.

- Verifique que todos los cables y conexiones se encuentren en buen estado antes de energizar el sistema.
- No manipule conexiones eléctricas con las manos húmedas.
- Apague las fuentes de alimentación antes de realizar modificaciones en el montaje experimental.
- No exceda los valores nominales de tensión o corriente especificados por el fabricante.

0.4. Manipulación de componentes ópticos

Los elementos ópticos, como lentes, espejos y polarizadores, son frágiles y pueden dañarse fácilmente si no se manipulan adecuadamente.

- Manipule los componentes ópticos siempre por los bordes.
- Evite tocar las superficies ópticas con los dedos.
- Utilice paños adecuados o aire comprimido para la limpieza de lentes y espejos.
- Coloque los componentes ópticos sobre superficies estables y seguras cuando no estén montados.

0.5. Uso de sustancias químicas

Algunas prácticas pueden requerir el uso de soluciones químicas, por ejemplo en procesos de revelado o limpieza.

- Utilice siempre los elementos de protección personal indicados (guantes, gafas, bata).
- No inhale vapores ni ingiera sustancias químicas.
- Siga las instrucciones del docente para la preparación y disposición de soluciones.
- Deseche los residuos químicos de acuerdo con las normas del laboratorio.

0.6. Comportamiento en caso de accidente

- En caso de accidente, mantenga la calma y notifique inmediatamente al docente o responsable del laboratorio.
- Si ocurre una exposición accidental al haz láser, interrumpa el experimento y solicite atención médica si es necesario.
- Conozca la ubicación de los extintores, botiquines y salidas de emergencia del laboratorio.

El respeto por estas normas no solo protege la integridad física de quienes participan en el laboratorio, sino que también contribuye al desarrollo de una actitud profesional y responsable frente al trabajo experimental en óptica.

Estructura y redacción del informe

La actividad experimental en física no concluye con la obtención de datos. El proceso científico se completa cuando los resultados son analizados, interpretados y comunicados con rigor metodológico. El informe de laboratorio constituye, por tanto, una extensión formal del experimento y debe elaborarse siguiendo criterios académicos y científicos precisos.

El presente capítulo establece la estructura obligatoria del informe correspondiente a las prácticas del Laboratorio de Óptica. Cada sección responde a una función específica dentro del método científico y debe redactarse con claridad, coherencia y objetividad.

0.7. Resumen y Abstract

El **Resumen** sintetiza los principales hallazgos del trabajo experimental. Debe tener una extensión entre 150 y 250 palabras y redactarse en tiempo presente y en tercera persona del singular.

Debe incluir:

- El objetivo del experimento.
- La metodología empleada.
- Los resultados cuantitativos más relevantes.
- La conclusión principal.

El resumen se redacta únicamente después de haber finalizado completamente el informe, garantizando así que refleje con precisión los resultados obtenidos.

El **Abstract** corresponde a la versión en inglés del resumen y debe conservar la misma estructura conceptual y nivel de precisión científica.

Palabras clave: Informe científico; Laboratorio de óptica; Análisis experimental.

Keywords: Scientific report; Optics laboratory; Experimental analysis.

0.8. Introducción

La introducción contextualiza el experimento dentro del marco conceptual de la óptica. Debe justificar la relevancia del estudio y establecer claramente los objetivos.

En esta sección se deben:

- Presentar los fundamentos teóricos esenciales.
- Analizar antecedentes pertinentes.
- Identificar el problema físico abordado.
- Formular los objetivos del experimento.

Se recomienda emplear tiempo pasado y voz activa en tercera persona. La redacción debe ser precisa y evitar explicaciones innecesarias o desarticuladas.

0.9. Método y Materiales

Esta sección describe el diseño experimental y los procedimientos utilizados. Debe proporcionar información suficiente para permitir la reproducibilidad del experimento.

Se deben incluir:

- Descripción del montaje experimental.
- Especificaciones técnicas de los instrumentos.
- Procedimiento seguido para la adquisición de datos.
- Métodos de análisis empleados.
- Condiciones experimentales relevantes.

Cuando se utilicen expresiones matemáticas para modelar o ajustar los datos, las ecuaciones deben numerarse consecutivamente y alinearse al margen izquierdo:

$$f(T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{T - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (0.1)$$

donde T representa la variable independiente, μ la media y σ la desviación estándar.

Todos los parámetros introducidos en una ecuación deben definirse inmediatamente después de su presentación.

0.10. Resultados

En esta sección se presentan los datos experimentales de manera organizada y objetiva. No se deben realizar interpretaciones en este apartado.

Los resultados pueden presentarse mediante tablas y figuras debidamente numeradas y referenciadas en el texto.

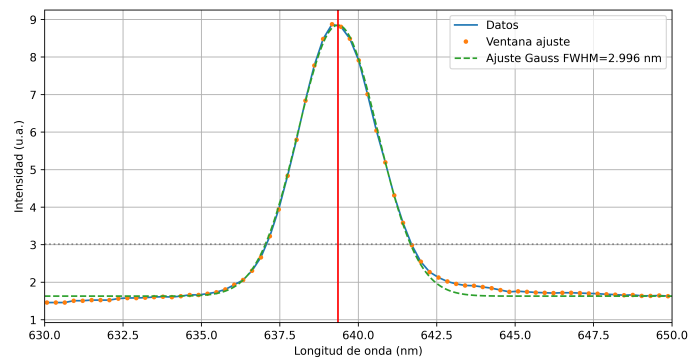


Figura 1: Ejemplo de representación gráfica de resultados experimentales.

Tabla 1: Ejemplo de tabla de datos experimentales.

Material	Temperatura (°C)	Deformación (mm)
Plástico 1	61.08	8.06
Plástico 2	61.93	6.16
-	-	-

Las cifras deben reportarse con el número adecuado de cifras significativas y, cuando corresponda, incluir estimaciones de incertidumbre.

0.11. Discusión de los resultados

En esta sección se interpretan los resultados a la luz del marco teórico presentado en la introducción.

Se deben:

- Analizar tendencias observadas.
- Comparar con valores teóricos o literatura.
- Evaluar fuentes de error sistemático y aleatorio.
- Discutir limitaciones experimentales.

La discusión debe evidenciar comprensión conceptual y capacidad crítica.

0.12. Conclusiones

Las conclusiones sintetizan los hallazgos principales y responden a los objetivos formulados en la introducción.

Deben ser:

- Claras y directas.
- Coherentes con los resultados obtenidos.
- Exentas de información nueva.

Una conclusión bien redactada refleja dominio experimental y solidez conceptual.

Criterio general de redacción

En todas las secciones se debe utilizar un lenguaje técnico, preciso y objetivo. Se recomienda el uso de voz activa en tercera persona y evitar expresiones ambiguas o valorativas. La coherencia interna del documento es un indicador fundamental de madurez científica.

0.13. Referencias bibliográficas

Las referencias constituyen un componente esencial del informe científico. Su inclusión no es un requisito formal aislado, sino una manifestación explícita del contexto académico en el que se desarrolla el trabajo experimental.

Todo informe de laboratorio debe incluir referencias cuando:

- Se utilicen ecuaciones derivadas en textos especializados.
- Se comparen resultados experimentales con valores reportados en la literatura.
- Se empleen modelos teóricos desarrollados por otros autores.
- Se consulten manuales técnicos de instrumentación.
- Se incluyan datos físicos o constantes fundamentales.

Las referencias cumplen múltiples funciones:

- Ubican el experimento dentro del conocimiento científico existente.
- Respaldan afirmaciones teóricas.
- Permiten la verificación independiente de la información.
- Evitan el plagio académico.

Se recomienda utilizar artículos científicos, libros especializados en óptica, manuales técnicos de fabricantes y bases de datos académicas reconocidas. No se deben emplear fuentes no verificables o carentes de rigor científico.

Las referencias deben citarse dentro del texto y listarse al final del informe siguiendo un formato consistente (por ejemplo, estilo IEEE o estilo numérico secuencial adoptado en este libro).

Ejemplo de citación en el texto[goodman2005, 1-19]

Bibliografía

- [1] Michael Alley. *The Craft of Scientific Writing*. 4.^a ed. Springer, 2018.
- [2] Philip R. Bevington y D. Keith Robinson. *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. 3.^a ed. McGraw-Hill, 2003.
- [3] Max Born y Emil Wolf. *Principles of Optics*. 7.^a ed. Cambridge University Press, 1999.
- [4] Mario Bunge. *La ciencia, su método y su filosofía*. Sudamericana, 1998.
- [5] Robert J. Collier, Christoph B. Burckhardt y Lawrence H. Lin. *Optical Holography*. Academic Press, 1971.
- [6] Robert A. Day y Barbara Gastel. *How to Write and Publish a Scientific Paper*. 7.^a ed. Cambridge University Press, 2012.
- [7] Richard P. Feynman. *The Pleasure of Finding Things Out*. Perseus Books, 1999.
- [8] Joseph W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. 4.^a ed. W. H. Freeman, 2015.
- [9] George D. Gopen y Judith A. Swan. “The Science of Scientific Writing”. En: *American Scientist* 78.6 (1990), págs. 550-558.
- [10] P. Hariharan. *Basics of Holography*. Cambridge University Press, 2002.
- [11] Eugene Hecht. *Optics*. 5.^a ed. Pearson, 2017.
- [12] Joint Committee for Guides in Metrology. *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. JCGM, 2008.
- [13] H. H. Ku. “Notes on the Use of Propagation of Error Formulas”. En: *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 70C.4 (1966), págs. 263-273.
- [14] Thomas S. Kuhn. *The Structure of Scientific Revolutions*. 3.^a ed. University of Chicago Press, 1996.
- [15] George Polya. *How to Solve It*. 2.^a ed. Princeton University Press, 1957.
- [16] Bahaa E. A. Saleh y Malvin C. Teich. *Fundamentals of Photonics*. 2.^a ed. Wiley, 2007.

- [17] John R. Taylor. *An Introduction to Error Analysis*. 2.^a ed. University Science Books, 1997.
- [18] Norbert Wiener. *Invention: The Care and Feeding of Ideas*. MIT Press, 1964.
- [19] Amnon Yariv. *Quantum Electronics*. 3.^a ed. Wiley, 1989.

Focometría usando el Método de Badal

El método de Badal permite determinar la longitud focal de lentes convergentes y divergentes. Esta práctica tiene como objetivo implementar y validar el funcionamiento del método.

Principio del método

El método de Badal se fundamenta en el funcionamiento de un arreglo de dos lentes o doblete (Fig.1(b)) de longitud focal $f_d = f_o + D$, la cual podemos variar mediante la separación Z entre las dos lentes. Para efecto de su uso como método de caracterización de lentes, el doblete estará constituido por una lente de referencia **LR** -de longitud focal positiva conocida- y una lente de prueba **LP** -lente a determinar su focal- divergente o convergente. Mediante el uso de la fórmula de Newton para lente delgada, podemos encontrar la siguiente relación:

$$f = \mp \frac{f_o^2}{D} \pm f_o \mp Z \quad (1)$$

Siendo f la longitud focal de la lente de prueba y f_o la longitud focal de la lente de referencia. La primera combinación de signos $(-, +, -)$ en la Ec.(1) corresponde al caso cuando LP es divergente y la segunda combinación en el caso de LP convergente.

Para garantizar el funcionamiento del método, se requiere ajustar las siguientes dos condiciones:

- 1). Si LP es divergente, entonces ajustar $Z > f_o - f$.
- 2). Si LP es convergente, entonces ajustar $Z \geq f_o + f$.

La Fig.1(a) muestra el comportamiento del haz de luz que emerge de la fuente **F** con amplitud constante y luego atraviesa la lente de referencia **LR**. La Fig.1(b) muestra el comportamiento del haz una vez se inserta una lente de prueba divergente entre la fuente y **LR**.

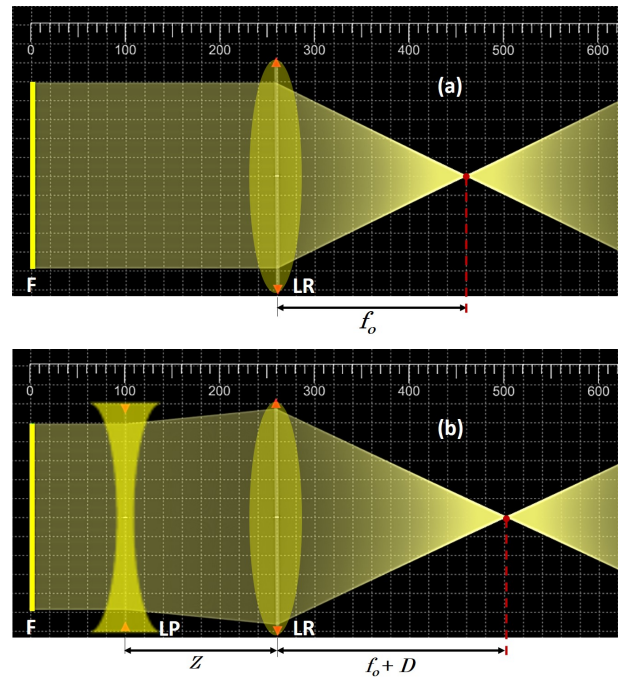


Figura 1: Simulación del comportamiento del frente de onda en un arreglo Badal, con lente LR de focal $f_o = 200\text{cm}$ y lente LP de focal $f = -990\text{cm}$.

Diseño Experimental

El esquema experimental consiste de un arreglo óptico como el de la Fig.2. Para que aplique la Ec.(1) en el método, se debe ajustar la lámpara de tal forma que emita un haz plano. La Fig.2(a) sugiere primero medir la focal de la lente de referencia **LR**; en esta primera parte el frente de onda plano converge en el plano focal de **LR**, plano que podemos encontrar mediante la pantalla; así, la distancia entre la lente **LR** y la pantalla es su distancia focal f_o .

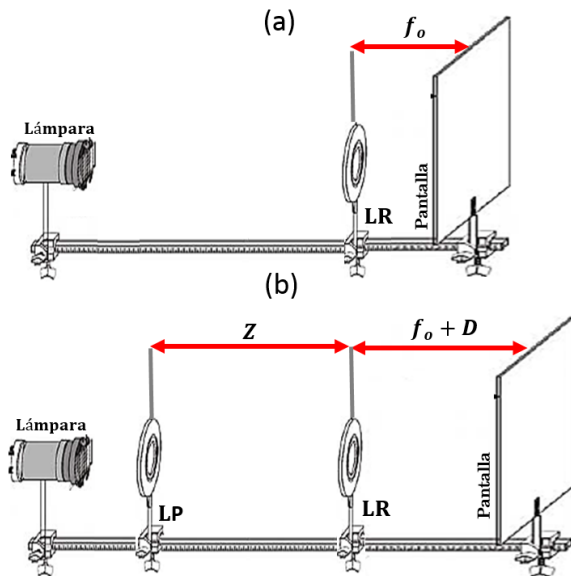


Figura 2: Arreglo experimental

Una vez determinada la focal f_o , se introduce en el arreglo la lente de prueba de focal f desconocida, a una distancia Z de la lente **LR** -ver Fig.2(b)-. Deslizando la pantalla encontramos el nuevo punto de convergencia que corresponde al plano focal del doblete. La distancia entre la pantalla y la lente **LR** es la distancia focal f_d ; de esta manera también queda determinada la distancia D y por ende usando la Ec.(1) la focal de la lente de prueba se puede calcular.

Focometría de lentes

Siguiendo la descripción del diseño experimental del apartado anterior, utilice los aparatos indicados en la Tabla 1 para construir el arreglo de la Fig.2(a). Utilice como lente **LR** la de mayor distancia focal positiva. Deslice la pantalla hasta encontrar el plano focal; mida la distancia f_o y compare el valor encontrado con el informado por el fabricante.

Caracterización de Lente Divergente

Inserte la lente divergente a una distancia $Z = f_o$. Deslice la pantalla hasta encontrar la focal f_d del doblete. Repita el procedimiento para 20 valores de Z . Si el tiempo lo permite, repita las mediciones cuando menos tres veces en cada valor de Z . Explique lo que ocurre cuando $Z < f_o - f$.

Caracterización de Lente Convergente

Inserte la lente convergente de $+5\text{cm}$ a una distancia $Z > f_o + f$. Deslice la pantalla hasta encontrar la focal del doblete f_d . Repita el procedimiento para 20 valores más de Z . Si el tiempo lo permite, repita las mediciones cuando menos tres veces en cada valor de Z . Observe y explique lo que ocurre cuando $Z = f_o + f$.

Aparatos

Para este experimento se requieren los aparatos indicados en la Tabla 1.

Tabla 1: Lista de aparatos

Nombre del dispositivo	Características
Lámpara	Luz blanca, 12 v / 6 W, con lente condensadora y porta objetos
Objetos	planos transparente y translucido
Lentes biconvexas	$f = +5\text{ cm}, +30\text{ cm},$
Lente biconcava	-50 cm
Banco metálico	4 Anclajes
Pantalla	Difusora
Cinta métrica	2 m de longitud, resolución 1 mm

Observaciones Experimentales/Datos

Durante el experimento con cada lente a caracterizar anote las observaciones y tabule los datos en cuadros como el indicado en la Tabla 2. Establezca posibles errores sistemáticos durante la toma de datos.

Análisis del experimento y Discusión de Resultados

En este apartado presente los datos en la forma gráfica de la Fig.3. Incluya en las respectivas curvas las desviaciones estándar (STD) de cada punto experimental y calcule la STD media para cada caso;

calcule la propagación del error. La Fig.3(b) es un procedimiento de linealización de los datos de la Fig.3(a). Determine la focal de cada lente a partir de esta linealización de los datos y compárelo con el valor dado por el fabricante. Grafique f_d contra Z , y mediante ajuste de los datos encuentre la relación matemática entre estos dos parámetros.

Haga la deducción analítica de la Ec.(1). Observe experimentalmente y presente un análisis sobre el no cumplimiento de las dos condiciones para Z . ¿Por qué el método impone esta restricción?. Analice en que caso es útil el método para lentes de prueba convergentes.

Incluya un apartado de conclusiones del experimento en términos del cumplimiento de los resultados obtenidos y de los objetivos propuestos.

f_o (cm)			
Z (cm)	f_d (cm)	D (cm)	$\bar{D}$ (cm)

Tabla 2: Tabulación de datos experimentales

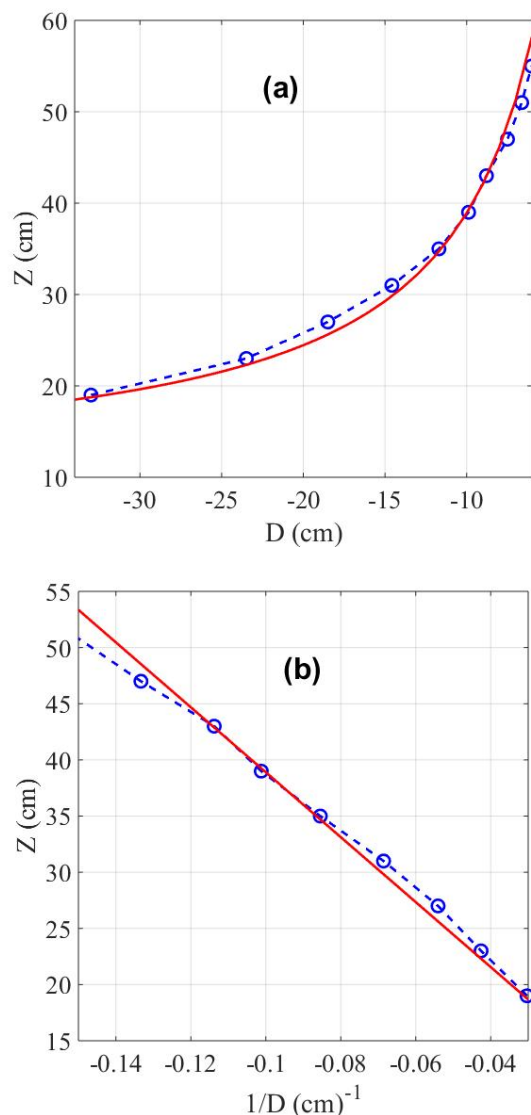


Figura 3: Ejemplo de representación gráfica de los resultados experimentales.

Referencias

- [1] Hecht, E., *Óptica*, Addison-Wesley, 4ta Ed., Madrid (2002).
- [2] Born, M., Wolf, E., *Principles of Optics*, 6th Edition, (1980).
- [3] Malacara, Z., Malacara, D., *Handbook Of Optical Design*, (2004).
- [4] Rossi B., *Fundamentos de Óptica*, (1977).
- [5] <https://phet.colorado.edu/es/>.
- [6] <https://ricktu288.github.io/ray-optics/simulator/>.
- [7] Leybold, <https://www.ld-didactic.de,>

Código - Matlab/Generar Figura 3

```
Z=[19 23 27 ...];
D=[-33 -23.49 -18.5 ...];

figure1 = figure;
axes('Parent',figure1,'FontSize',...
20,'FontName','Times_New_Roman')
grid('on');
box('on');
hold('all');
axis square
plot(D,Z, 'ob','Markersize',10,...
'LineWidth',2,'Color',[0 0 1])
xlabel('D_(cm)');
ylabel('Z_(cm)')

Dp=-34:1:-6;
f=10;
fo=20;
```

```

Zp=-((fo ^ 2)./Dp)+fo-f;
plot(Dp,Zp, 'r', 'LineWidth',2)
xlim([-34 -6])

figure2 = figure;
axes('Parent',figure2,'FontSize',...
20,'FontName','Times_New_Roman')
grid('on');
box('on')
hold('all');
axis square
plot(1./D,Z, '—ob', 'Markersize',10,...
'LineWidth',2,'Color',[0 0 1])
xlabel('1/D_(cm)^{-1}');
ylabel('Z_(cm)')

plot(1./Dp,Zp, 'r', 'LineWidth',2)

```

Focometría Usando el Método de Bessel

Resumen

El objetivo de este experimento es validar el método de Bessel en la determinación de la longitud focal de lentes convergentes, fundamentado en que podemos encontrar dos imágenes reales de un objeto cuando desplazamos la lente entre la posición fija del plano objeto y la pantalla de observación.

Principio del Método

El método de Bessel es una técnica basada en la ley de formación de imágenes a través de una lente, que podemos utilizar para medir la longitud focal de lentes convergentes. El método está fundamentado en el hecho de que entre una posición fija del plano objeto y de la pantalla de observación podemos encontrar la formación de dos imágenes sobre la pantalla cuando desplazamos la lente entre estos dos planos fijos. Mediante la fórmula gaussiana podemos establecer la siguiente relación:

$$f = \frac{D^2 - d^2}{4D}, \quad (1)$$

donde f es la distancia focal de la lente convergente de prueba, D es la distancia entre el plano objeto y la pantalla, y d es la distancia entre la primera y la segunda posición de la lente; en cada una de estas dos posiciones de la lente observaremos una imagen del objeto en la pantalla. Entonces solo debemos medir las distancias D y d , y mediante la Ec.(1) calculamos la distancia focal de la lente.

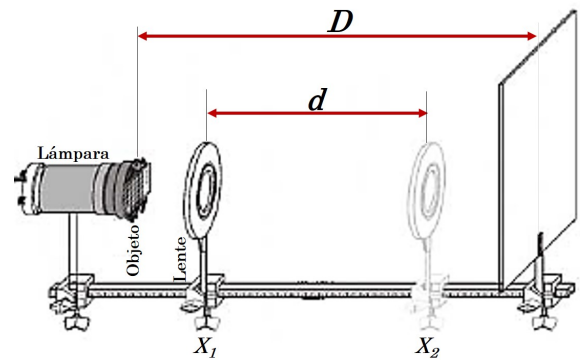


Figura 1: Arreglo experimental del método de Bessel para determinar f . X_1 y X_2 son las dos posiciones en las cuales la lente produce una imagen del objeto sobre la pantalla.

Diseño Experimental

El esquema experimental es un arreglo óptico básico de formación de imágenes usando una lente convergente. La Fig.1 es el esquema del arreglo. La lámpara es de luz blanca, la cual contiene una lente condensadora que permite iluminar un objeto plano translucido ubicado en la salida de la lámpara. Se recomienda iniciar ubicando el objeto y la pantalla en extremos opuestos del banco óptico; la separación entre estos dos elementos es D . Se inserta la lente convergente cerca del objeto y se desplaza hasta la posición X_1 en la cual debemos observar en la pantalla la primera imagen nítida del objeto; se marca esta posición de la lente. Luego procedemos a desplazar la lente en dirección de la pantalla hasta observar la segunda imagen nítida del objeto en ella. La distancia de separación entre la primera y la segunda

posición de la lente corresponde al parámetro d . Un vez medidos D y d los reemplazamos en la Ec.(1) para así calcular la distancia focal de la lente f .

Desarrollo del Experimento

Utilice los elementos relacionados en la Tabla 1 para construir el arreglo de la Fig.1. Para cada lente de prueba elija tres distancias D y complete los datos de la Tabla 2. Como se indicó, se recomienda elegir el primer valor de D ubicando el objeto y la pantalla en extremos opuestos del banco óptico. Mida los respectivos valores de d ; si el tiempo lo permite, puede minimizar los errores sistemáticos en el experimento, para ello amplíe la estadística en la medición de d hasta por tres o más veces.

Aparatos

Para este experimento se requieren los aparatos indicados en la Tabla 1.

Tabla 1: Lista de aparatos

Nombre del dispositivo	Características
Lámpara	Luz blanca, 12 v / 6 W, con lente condensadora y porta objetos
Objetos	planos transparente y translucido
Lentes biconvexas	$f = +5$ cm, $+10$ cm, $+20$ cm, $+30$ cm
Banco metálico	4 Anclajes
Pantalla	Difusora
Cinta métrica	2 m de longitud, resolución 1 mm

Observaciones Experimentales/Datos

Durante el experimento con cada lente anote las observaciones y tabule los datos en cuadros como el indicado en la Tabla 2. Establezca posibles errores sistemáticos durante la toma de datos. Se recomienda que para cada lente se tomen mínimo 10 valores de D . Tome las características de aumento de las dos imágenes para cada valor de D .

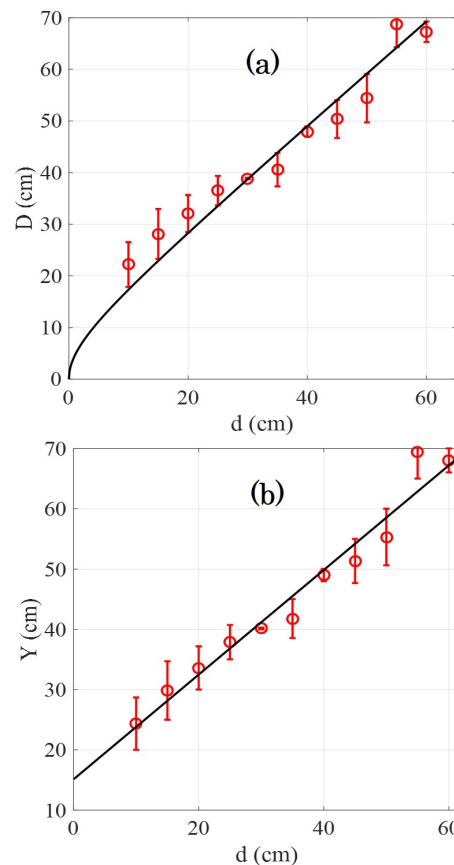


Figura 2: Ejemplo de representación gráfica de los resultados experimentales.

Tabla 2: Tabulación de datos experimentales

D (cm)	d (cm)	$\bar{d}$ (cm)

Análisis del Experimento y Discusión de Resultados

En este apartado presente los datos de cada lente en la manera como indica la Fig.2; incluya en las respectivas curvas las desviaciones estándar (STD) de cada punto experimental y calcule la STD media para cada caso; calcule la propagación del error. La

Fig.2(b) es la linealización de los datos de la Fig.2(a); describa matemáticamente el procedimiento de linealización. Determine la focal de cada lente a partir de esta linealización de los datos y compárelo con el valor dado por el fabricante. ¿Qué representa el parámetro Y ?, ¿Qué representa el corte con el eje Y ? Incluya un apartado de conclusiones del experimento en términos del cumplimiento de los resultados obtenidos y de los objetivos propuestos. Obtenga analíticamente la Ec.1.

axis square

```
Y=? ;
errorbar(d,Y,Er,'o','markersize',10,'LineWidth',2,'Color',
xlabel('d_(cm)');
ylabel('D*D^(1^)-(cm)');
xlim([0 62]) ; ylim([0 70])
```

Referencias

- [1] Hecht, E., *Óptica*, Addison-Wesley, 4ta Ed., Madrid (2002).
- [2] Born, M., Wolf, E., *Principles of Optics*, 6th Edition, (1980).
- [3] Malacara, Z., Malacara, D., *Handbook Of Optical Design*, (2004).
- [4] Rossi B., *Fundamentos de Óptica*, (1977).
- [5] <https://phet.colorado.edu/es/>.
- [6] <https://ricktu288.github.io/ray-optics/simulator/>.
- [7] Leybold, <https://www.ld-didactic.de,.>

Código - Matlab/Generar Figura 2

```
% DATOS:
d = [10 15 20 25 30 ...];
D = [22.19 28.11 32.06...];
Er = [4.34 4.84 3.58 ...]
% .....

figure1 = figure;
axes('Parent',figure1,'FontSize',20,'FontName','Times_New_Roman')
grid('on');
box('on')
hold('all');
axis square

errorbar(d,D,Er,'ok','markersize',10,'LineWidth',2,'Color',[1 0 0])

dt=0:0.1:60;
Dt=sqrt(dt.^2+4*F*dt);

plot(dt,Dt,'LineWidth',2,'Color',...
[0 0 0])
xlabel('d_(cm)'); ...
ylabel('D_(cm)')
xlim([0 62]) ;
ylim([0 70])

figure2 = figure;
axes('Parent',figure2,'FontSize',20,'FontName','Times_New_Roman')
grid('on');
box('on')
hold('all');
```

Ley de Formación de Imágenes; Lentes

Resumen

Utilizando un arreglo óptico básico de lente convergente o divergente se demuestra experimentalmente la ley de formación de imágenes. Se comprueba el alcance de validez de la fórmula gaussiana, aún utilizando lentes gruesas en el experimento.

Principio del Método

De la óptica geométrica se conoce que el comportamiento de la luz a través de cualquier arreglo óptico de lentes obedece a la ley de refracción de la luz ($n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$). Esta misma ley permite obtener analíticamente la denominada fórmula gaussiana, dada por la Ec.(1), relación que rige la formación de imágenes mediante lentes delgadas, considerando aproximación paraxial.

$$\frac{1}{S_o} - \frac{1}{S_i} = \left(\frac{n_t - n_i}{n_i} \right) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \quad (1)$$

S_o es la distancia objeto y S_i la distancia imagen. El término de la derecha de la ecuación es la potencia de la lente ($1/f$), siendo f la distancia focal. n_i es el índice de refracción del medio donde se encuentra inmersa la lente y n_t es el índice de refracción de la lente, siendo R_1 y R_2 sus radios de curvatura.

EL método se puede utilizar para hacer focometría, es decir determinar la distancia focal de la lente a partir de medir los parámetros S_o y S_i . La convención de signos para la Ec.(1) es: S_o y S_i son vectores paralelos al eje óptico que terminan en el centro de

la lente; son de sentido positivo si son paralelos a la dirección de propagación de luz que sale de la lámpara, y negativo si son antiparalelos. El valor de la distancia focal se toma positiva si la lente es convergente y negativa si es divergente.

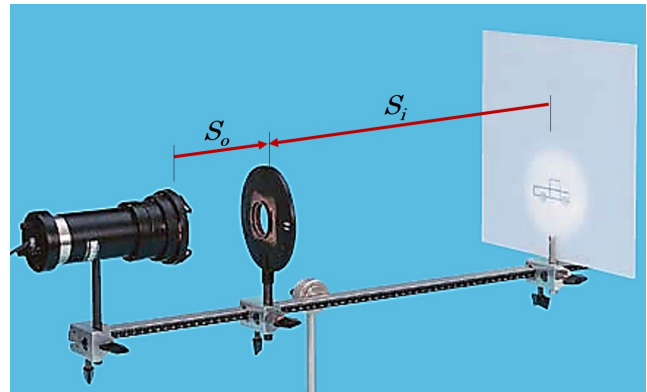


Figura 1: Arreglo experimental.

Diseño Experimental

El esquema experimental consiste de un arreglo óptico como el que se muestra en la Fig.1. La lámpara es una fuente de luz blanca que ilumina un objeto plano; la luz se refracta a través de la lente (convergente o divergente) y de esta manera se observarán imágenes reales sobre la pantalla. El banco de aluminio permite alinear los elementos y deslizarlos sobre el mismo, de esta manera podemos manipular la distancia objeto y mover la pantalla para localizar las imágenes reales. Las imágenes virtuales se observan mirando en contra luz a través de la lente.

Experimentando con lente convergente

Construya el arreglo de la Fig.1 utilizando la lente de $f = +30$ cm de focal. Se recomienda iniciar con una distancia objeto ligeramente superior a la focal de la lente (indicada por el fabricante) y deslice la pantalla hasta encontrar el plano imagen. Mida la distancia imagen, el tamaño de la imagen y anote las características de la imagen. Repita el procedimiento deslizando la lente a intervalos de $f/20$ cm y hasta una distancia objeto $4f$ cm. Colecte la información en el formato de la Tabla 2. Elija dos lentes más y repita el experimento. Si el tiempo lo permite amplíe la estadística en cada toma hasta por tres o más veces.

Experimentando con lente divergente

En el montaje experimental anterior cambie la lente por la lente divergente. Mueva la lente hasta una distancia objeto de $f/20$ cm. Observe las características de la imagen. Repita el procedimiento deslizando la lente a intervalos de $f/20$ cm y hasta una distancia objeto $4f$. Proponga un diseño modificado del arreglo que le permita obtener una imagen real del objeto.

Aparatos

Para este experimento se requieren los aparatos indicados en la Tabla 1.

Tabla 1: Lista de aparatos

Nombre del dispositivo	Características
Lámpara	Luz blanca, 12 v / 6 W, con lente condensadora y porta objetos
Objetos	planos transparente y translucido
Lentes biconvexas	$f = +5$ cm, $+10$ cm, $+20$ cm, $+30$ cm
Banco metálico	4 Anclajes
Pantalla	Difusora
Cinta métrica	2 m de longitud, resolución 1 mm

Observaciones

Experimentales/Datos

Durante el experimento con cada lente anote las observaciones y tabule los datos en cuadros como el indicado en la Tabla 2. Establezca posibles errores sistemáticos durante la toma de datos.

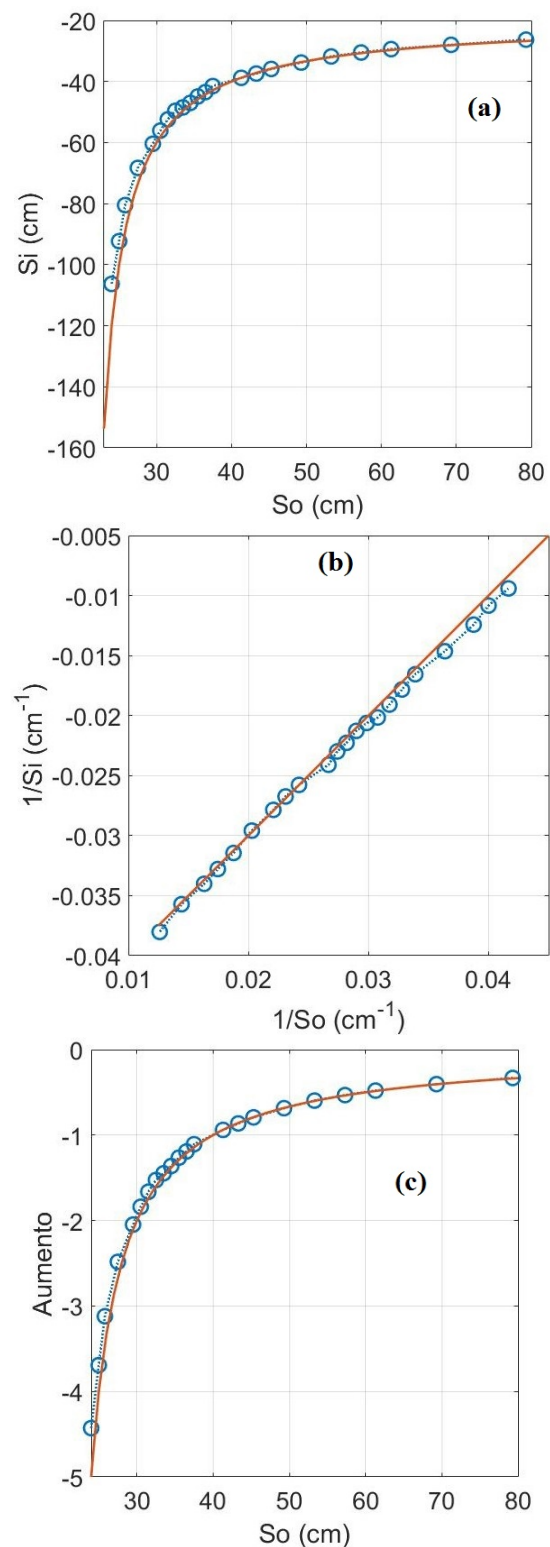


Figura 2: Ejemplo de representación gráfica de los resultados experimentales.

Tabla 2: Tabulación de datos experimentales

Focal (cm)				
S_o cm	S_i cm	y_i (cm)	y_i/y_o	S_i/S_o

Análisis del Experimento y Discusión de Resultados

En este apartado presente los datos de manera gráfica para cada lente de la manera como indica la Fig.2; incluya en las respectivas curvas las desviaciones estándar (STD) de cada punto experimental y calcule la STD media para cada caso; calcule la propagación del error. La Fig.2(b) es un procedimiento de linealización de los datos de la Fig.2(a). Determine la focal de cada lente a partir de esta linealización de los datos y compárelo con el valor dado por el fabricante. De la curva ajustada de la Fig.2(c) establezca la distancia imagen para la cual el objeto y la imagen tienen el mismo tamaño. ¿Qué relación tiene esta distancia imagen con la focal de la lente?. Incluya un apartado de conclusiones del experimento en términos del cumplimiento de los resultados obtenidos y de los objetivos propuestos.

Referencias

- [1] Hecht, E., *Óptica*, Addison-Wesley, 4ta Ed., Madrid (2002).
- [2] Born, M., Wolf, E., *Principles of Optics*, 6th Edition, (1980).
- [3] Malacara, Z., Malacara, D., *Handbook Of Optical Design*, (2004).
- [4] Rossi B., *Fundamentos de Óptica*, (1977).
- [5] <https://phet.colorado.edu/es/>.
- [6] <https://ricktu288.github.io/ray-optics/simulator/>.
- [7] Leybold, <https://www.ld-didactic.de,.>

Código - Matlab/Generar Figura 2

```
% DATOS:
So = [24 25 25.8 27.5 ...];
Si = -[106.3 92.3 80.5 ...];

% .....
figure1 = figure;
axes('Parent',figure1,'FontSize',20,'FontName',...
'Times_New_Roman')
grid('on');
box('on');
hold('all');
axis square

plot(So,Si,'ok','markersize',10,'LineWidth',...
2,'Color',[1 0 0])

Sot=20:80;
Sit=Sot*20./(20-Sot);
plot(Sot,Sit,'LineWidth',2,'Color',[0 0 0])
xlabel('So_(cm)'); ylabel('Si_(cm)')
xlim([25 80])

figure2 = figure;
axes('Parent',figure2,'FontSize',...
20,'FontName','Times_New_Roman')
grid('on');
box('on');
hold('all');
axis square
plot(1./So,1./Si,'o','markersize',10,...
'LineWidth',2,'Color',[1 0 0])

x=1./Sot;
y=x-1/20;
plot(x,y,'LineWidth',2,'Color',[0 0 0])
xlabel('1/So_(cm^-1)');
ylabel('1/Si_(cm^-1)')
xlim([0.02 0.04])

figure3 = figure;
axes('Parent',figure3,'FontSize',20,...
'FontName','Times_New_Roman')
grid('on');
box('on');
hold('all');
axis square

A=Si./So;
plot(So,A,'o','markersize',10,'LineWidth',...
2,'Color',[1 0 0])
plot(Sot,Sit./Sot,'LineWidth',2,...
'Color',[0 0 0])
xlabel('So_(cm)'); ylabel('Aumento')
xlim([25 80])
\end{small}
```

Determinación de la velocidad de la luz en el aire a partir del recorrido y la duración de un pulso corto de luz

Objetivos del experimento

- Medición relativa de la duración t de un pulso corto de luz con un osciloscopio en función de la posición s del espejo de reflexión.
- Determinación de la velocidad de la luz en el aire en base a la pendiente del gráfico $s = f(t)$.
- Medición absoluta de la duración t de un pulso corto de luz con un osciloscopio para un dado recorrido de 2 s marcando el punto cero con un espejo de referencia.
- Determinación de la velocidad de la luz en el aire como cociente del recorrido y la duración.
- Calibrado de la medición de tiempo con una señal de oscilador con cristal de cuarzo.
- Medición absoluta de la duración t de un pulso corto de luz para un dado recorrido de 2 s marcando el punto cero con un espejo de referencia.
- Determinación de la velocidad de la luz en el aire como cociente del recorrido y la duración calibrada.

Fundamentos

El aparato para medir la velocidad de la luz emite, a través de un LED de alta potencia, pulsos muy cortos de luz roja de un ancho de aproximadamente 20 ns. Luego de su recorrido de ida y vuelta, de longitud conocida, los pulsos de luz son convertidos a pulsos de tensión y observados con un osciloscopio.

Recorrido de la luz:

La luz de la fuente luminosa, un LED rojo claro ($\lambda = 615 \text{ nm}$), atraviesa el aparato de medición de la velocidad de la luz por su ventana F_1 y es enfocada por la lente L en el infinito. El triple espejo grande T_1 hace que el haz vuelva nuevamente al LED por el mismo camino que de ida (ver figura 1).

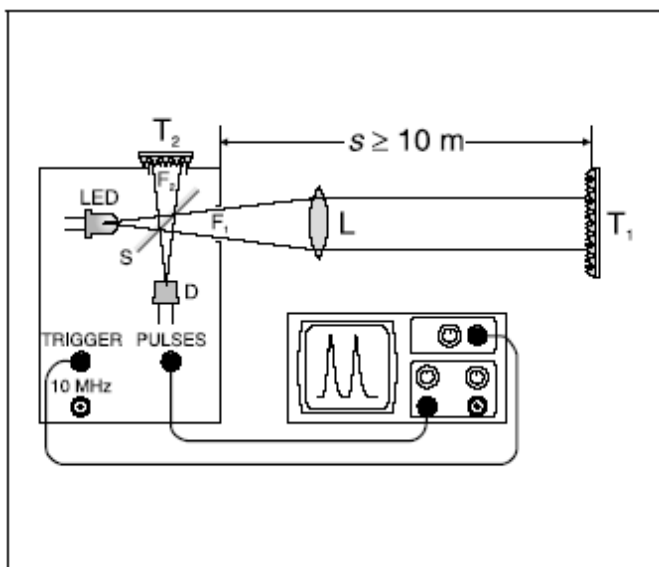
El divisor de haz S que está dentro del aparato de medición refleja hacia abajo la luz que vuelve en dirección al fotodiodo D . Al mismo tiempo refleja hacia arriba la mitad de la luz enviada, que sale por la segunda ventana F_2 . La marcha del haz hacia arriba es equivalente a la del que sale horizontalmente.

El triple espejo pequeño T_2 ubicado directamente sobre F_2 genera un pulso de referencia con un retardo despreciable y no interfiere con el rayo a medir.

Procedimiento de medición

Un pulso luminoso recorre un tramo de 10 m en un tiempo de aproximadamente 60 ns para la ida y la vuelta. La duración del pulso, de aproximadamente 20 ns, es apropiada a ese tiempo. El aparato para medir la velocidad de la luz permite el uso de un osciloscopio relativamente sencillo: Los pulsos de luz son enviados con una alta frecuencia de repetición de 40 KHz. Esto garantiza, también aprovechando la máxima velocidad de deflexión del osciloscopio, una claridad de señal suficiente sobre la pantalla del osciloscopio.

Fig. 1 Bosquejo del montaje para medir la velocidad de la luz con pulsos cortos de luz



Equipo

1 aparato medidor de la velocidad de la luz	476 50
1 fuente de alimentación 230 V/12V~	562 791
1 lente con montura, $f = 200$ mm	460 10
1 banco de óptica con perfil normal	p. ej. 460 32
2 soportes ópticos, H: 90 mm, B: 50 mm ...	460 352
1 osciloscopio de dos canales 303	575 211
3 cables para alta frecuencia, 1 m	501 02
1 escala de madera, 1 m	311 03
1 base de soporte grande en forma de V ..	300 01
1 varilla de soporte, 100 cm	300 44
1 manguito Leybold	301 01

Antes de disparar el pulso en el aparato para medir la velocidad de la luz, se da una señal de trigger para el triggerizado externo del osciloscopio. Es por eso que el pulso de tensión aparece entero en la pantalla del osciloscopio, si la duración del pulso de luz es despreciable, o sea, si el triple espejo se encuentra a mínima distancia delante de F_1 o sobre F_2 . En consecuencia, no se necesita usar un osciloscopio con línea de retardo.

Si se agranda la distancia del triple espejo grande respecto de la ventana de salida, el pulso se desplaza sobre la pantalla del osciloscopio hacia la derecha, como consecuencia de la mayor duración. La variación de la duración puede ser determinada en base a este desplazamiento. La velocidad de la luz se calcula como el cociente de la variación del tramo recorrido y la variación de la duración. Con ayuda del osciloscopio y usando el pulso de referencia con el triple espejo pequeño puede determinarse de manera absoluta la duración total. La velocidad de la luz se calcula en este caso como el cociente entre el tramo recorrido y la duración.

Para calibrar el tiempo de medición puede visualizarse en el osciloscopio, al mismo tiempo que la señal a medir, una señal de un oscilador con cristal de cuarzo. Dado que la señal del oscilador puede correrse más de un período respecto del impulso a medir, sus flancos pueden utilizarse de manera óptima como retículo de medición. Luego, la medición de tiempo es independiente de la base de tiempos del osciloscopio.

Montaje

El montaje del experimento se muestra en la figura 2.

Montaje mecánico y óptico:

- Ubicar el banco óptico sobre una mesa de altura adecuada y montar en él el aparato para medición de la velocidad de la luz, de manera que la ventana F_1 mire a la lente (ver figura 2).
- Ubicar la lente a aproximadamente 20 cm del aparato de medición de la velocidad de la luz con su centro a la altura de la ventana F_1 .

- Asegurar el triple espejo grande sobre la base de soporte (ver figura 2) y ubicarlo a unos metros del aparato. Ajustar los componentes de manera que el centro quede a la altura del eje óptico y la superficie del espejo aproximadamente perpendicular al eje óptico.

- Encender el aparato enchufando la fuente.

En caso de que, echando una mirada cercana al aparato y la lente, el triple espejo no se ilumine o lo haga sólo en sus bordes:

- Modificar levemente la dirección del haz orientando de manera lateral el banco óptico y, eventualmente, variando la altura de la lente hasta que el triple espejo reciba los rayos en su centro.

Conexión del osciloscopio:

- Conectar con el cable para alta frecuencia la salida “Pulsos” con el canal I del osciloscopio, y la salida “Trigger” con la entrada externa de trigger del osciloscopio.

Tabla 1: Configuración del osciloscopio, ejemplo para el osciloscopio de dos canales 303 (Número de catálogo 575 211)

Tipo de funcionamiento:	sólo canal I
Canal I:	CC, 5–100 mV/cm
Línea nula:	en el margen inferior de la pantalla
Triggerizado:	externo, CA, + (flanco creciente)
Nivel de trigger:	automático
Sensibilidad:	0,2 μ s/cm, cal
Atenuación X:	1×
Intensidad:	máxima

- Buscar, con la configuración del osciloscopio de la tabla 1, un pulso de tensión.
- Ubicar el triple espejo grande a la máxima distancia planeada para el experimento y optimizar la amplitud del pulso con pequeñas variaciones del ajuste óptico, en especial deslizando la lente sobre el banco óptico.
- Seleccionar una atenuación en el eje X de 10×

Realización**a) Medición de duración en función de la posición del triple espejo:**

- Ubicar el triple espejo grande a corta distancia del banco óptico y marcar su posición.
- Desplazar el máximo del pulso de tensión llevando la posición X a una línea reticular vertical en la zona izquierda de la pantalla del osciloscopio (ver figura 3, arriba).
- Interponer el triple espejo grande en la marcha del haz, medir el camino de desplazamiento s y anotar.
- Leer sobre la pantalla del osciloscopio el retardo t del pulso de tensión (ver figura 3, abajo) y anotar.
- Repetir las mediciones para otros desplazamientos s (ver tabla 2).

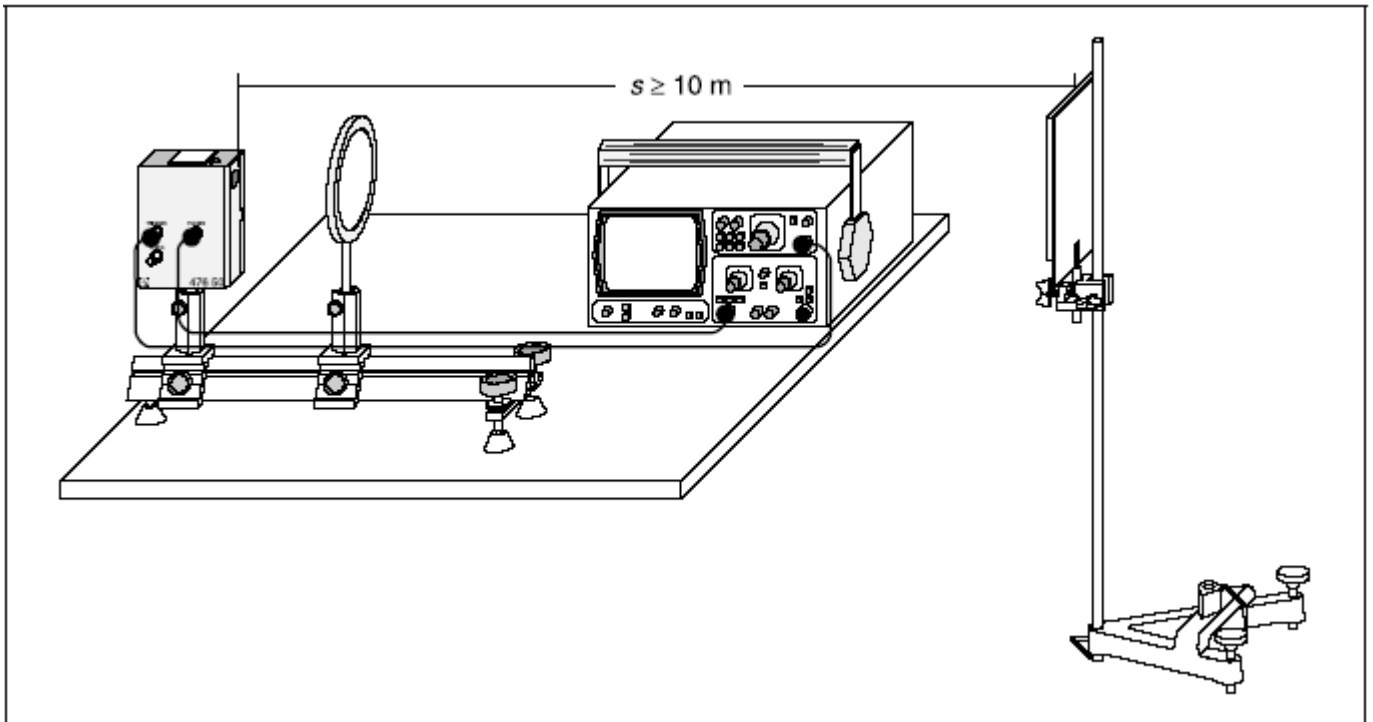


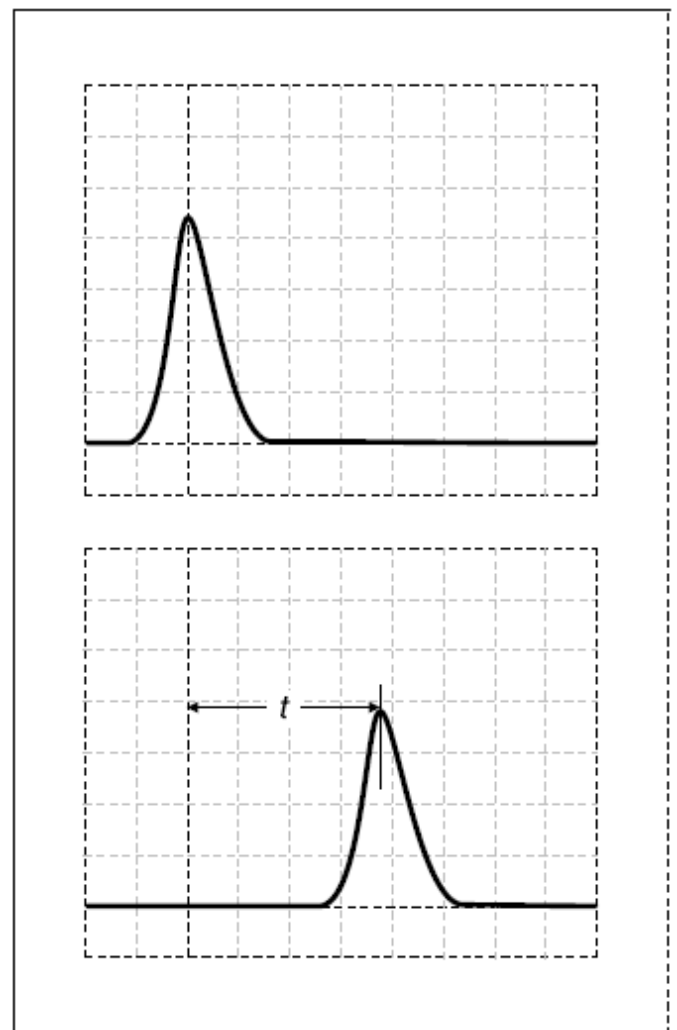
Fig. 2 Montaje del experimento para medir la velocidad de la luz

b) Medición de la duración con un espejo de referencia:

- Desplazar el montaje hacia el borde de la mesa, sondear con un ojo el borde vertical del aparato de medición de la velocidad de la luz y marcar la posición en el piso (ver figura 4).
- Mantener el triple espejo pequeño directamente delante de F_1 y correr el máximo del pulso de tensión llevando la posición X a una línea reticular vertical en la zona izquierda de la pantalla del osciloscopio.
- A continuación, ubicar el triple espejo pequeño en F_2 y cuidar que la posición del pulso de referencia no haya tenido modificaciones (igual camino de la luz).
- Interponer en la marcha del haz el triple espejo grande a, por lo menos, 10 m, de manera que pueda verse en la pantalla claramente distanciado el pulso de referencia del pulso a medir, como segunda señal.
- Desplazando el triple espejo pequeño sobre la abertura de la ventana llevar ambas señales a exactamente igual tamaño. Desplazar el flanco creciente del pulso de referencia de forma que intercepte la línea media en el punto de cruce con una línea vertical de retícula (ver figura 5).
- Leer la duración t en la intersección del segundo pulso con la línea media (ver figura 5) y anotar.

Indicación: La distancia temporal entre el pulso de referencia y el pulso a medir coincide, en la pantalla del osciloscopio, con la distancia entre dos flancos crecientes, si ambos pulsos tienen igual amplitud y la distancia es significativamente mayor al ancho del pulso.

- Marcar en el piso la posición del triple espejo grande, determinar la distancia s a la ventana F_1 y anotar (ver figura 4).

Fig. 3 Medición relativa de la duración t del pulso de luz

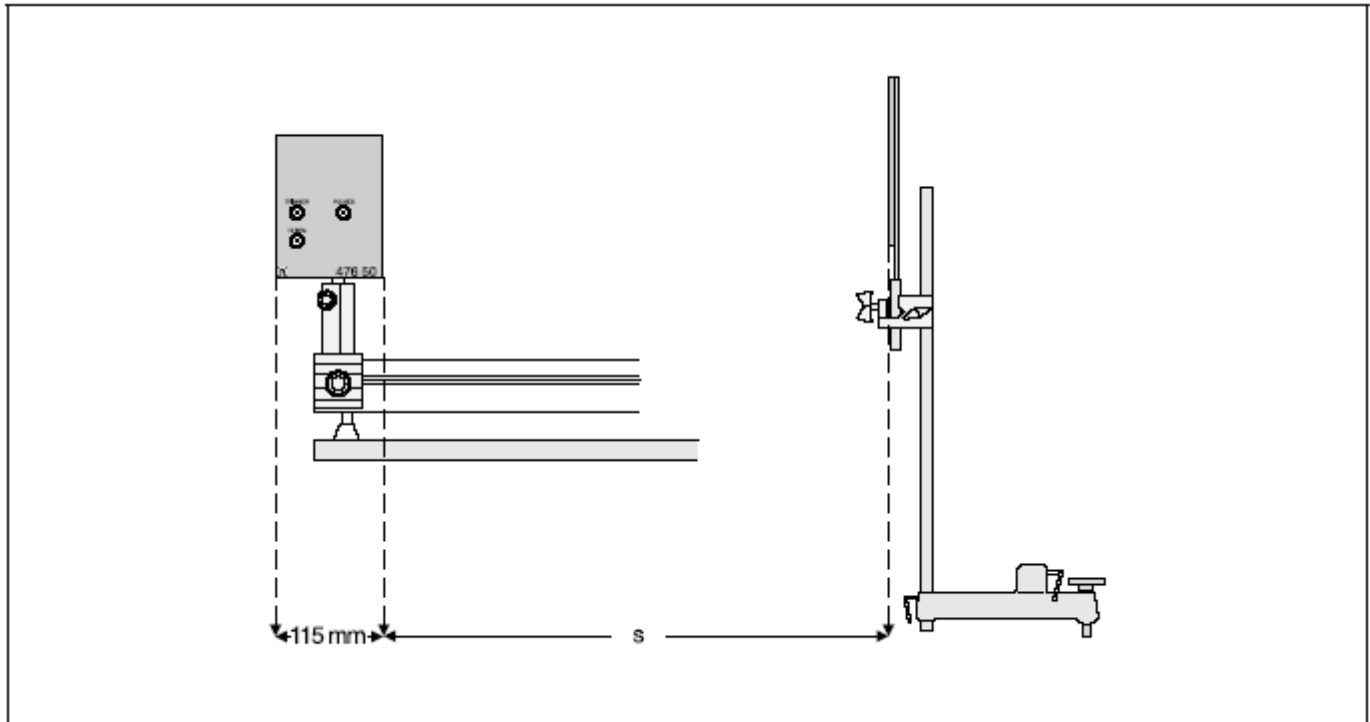


Fig. 4: Bosquejo para determinar la posición del aparato medidor de la velocidad de la luz y del triple espejo grande

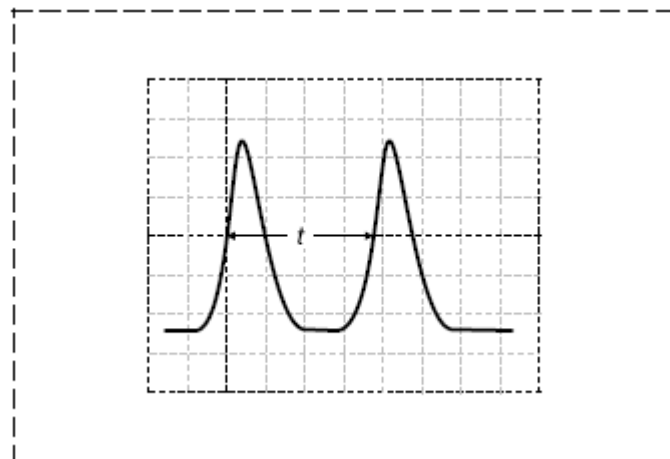


Fig. 5 Medición absoluta de la duración t del pulso de luz.

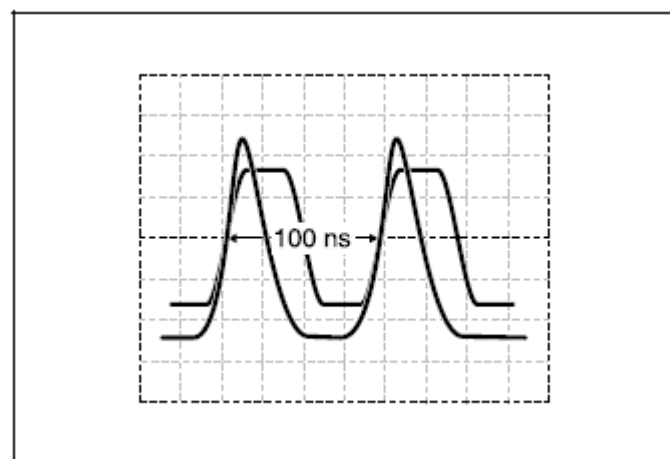


Fig. 6 Medición relativa de la duración t del pulso de luz con una base de tiempos calibrada externamente

c) Medición de la duración con una base de tiempos externa calibrada:

- Ubicar el triple espejo pequeño en F_2 e interponer en la marcha del haz el triple espejo grande a aproximadamente 15 m de distancia, de manera que puedan verse dos pulsos en la pantalla del osciloscopio.
- Seleccionar la máxima distancia posible entre pulsos.
- Igualar exactamente la altura de ambos pulsos desplazando el triple espejo pequeño sobre la ventana de abertura F_2 .
- Conectar con un cable de alta frecuencia la salida de 10 MHz del aparato de medición con el canal II del osciloscopio.
- Seleccionar el modo de dos canales (botón "Dual") y activar el canal II (AC, 0,1 V/cm), de manera que puedan verse al mismo tiempo los pulsos a medir y la señal del oscilador.
- Desplazar con el selector de fase del aparato de medición de velocidad de la luz la señal de 10 MHz hasta lograr que el flanco de subida del primer pulso de tensión se ubique exactamente sobre un flanco de subida de la señal de 10 MHz.
- Ajustar la distancia del triple espejo grande de manera que el flanco de subida del segundo pulso de tensión se ubique exactamente sobre el siguiente flanco de subida de la señal de 10 MHz (ver figura 6).
- Igualar exactamente la altura de los pulsos de tensión de ambos espejos triples ajustándolos o desajustándolos ópticamente. A continuación, volver a ajustar la posición de los flancos de subida.
- Marcar en el piso la posición del aparato de medición y del triple espejo grande (para ello, controlar con un ojo el borde vertical del aparato), medir la distancia s del triple espejo grande respecto de la ventana F_1 y anotar (ver figura 4).

Ejemplo de medición**a) Medición de la duración en función de la posición del triple espejo:**

Tabla 2: Camino de desplazamiento s del triple espejo grande y duración del recorrido del pulso de luz.

$\frac{s}{m}$	$\frac{t}{ns}$
0,0	0
3,0	20
6,0	41
9,0	60
12,0	81
15,0	101
18,0	122

b) Medición de la duración con un espejo de referencia:

$s = 15,00 \text{ m}$, $t = 99 \text{ ns}$

c) Medición de la duración con una base de tiempos externa calibrada:

$s = 15,05 \text{ m}$

Análisis**a) Medición de la duración en función de la posición del triple espejo:**

En la figura 6 se visualizan los valores de medición s en función de t . En base a la pendiente a de la recta que pasa por los valores de medición, se obtiene para la velocidad de la luz en el aire:

$$c = 2 \cdot a = 2,98 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

b) Medición de la duración con un espejo de referencia:

Del cociente de la distancia s y la duración t se obtiene, para la velocidad de la luz en el aire:

$$c = 2 \cdot \frac{s}{t} = 3,03 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

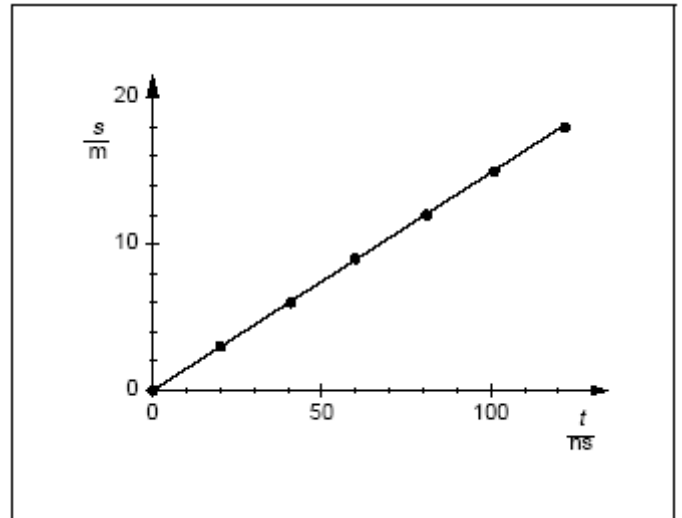


Fig. 7 Camino de desplazamiento s del triple espejo grande en función de la duración t del recorrido del pulso de luz

c) Medición de la duración con una base de tiempos externa calibrada:

La distancia s fue elegida precisamente con el fin de obtener una duración de recorrido del pulso de luz de 100 ns .

$$c = 2 \cdot \frac{s}{100 \text{ ns}} = 3,01 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

d) Comparación de los métodos:

Además de los errores de lectura que aparecen en todas las mediciones de tiempo, deberá tenerse en cuenta para a) y b) la precisión de la calibración de la sensibilidad del osciloscopio. Para el osciloscopio de este trabajo, dicha precisión ronda el 3 %.

e) Valores de tabla:

Velocidad de la luz en el vacío:

$$c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

Velocidad de la luz en el aire (velocidad de fase):

$$c = \frac{c_0}{n} = 2,997 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

(índice de refracción $n = 1,003$ en condiciones normales)

La velocidad de propagación de los pulsos de luz cortos en el aire corresponde exactamente a la velocidad de grupo de un paquete de ondas. No obstante, debido a la precisión de medición que se puede obtener, puede aquí no hacerse la diferencia entre velocidad de fase y velocidad de grupo.

Ley de Brewster y refractometría

El objetivo de esta práctica es verificar la ley de Brewster y aplicarla en la medición del índice de refracción de materiales transparentes, no conductores. Además, se determinará la relación entre la energía de las ondas reflejada y transmitida en función del ángulo de la onda incidente.

Principio del método

David Brewster, en 1812 observó que un haz de luz reflejado de una superficie no conductora se polarizaba linealmente, esto justo cuando el haz transmitido y reflejado forman un ángulo de 90° , a este fenómeno se conoce como la ley de Brewster. Un modelo electrodinámico para este fenómeno de propagación permite establecer las denominadas ecuaciones de Fresnel; de ellas se interpreta que en el ángulo θ_p (ver Fig.1), la componente del haz reflejado paralela al plano de incidencia se extingue, quedando el campo polarizado linealmente, vibrando perpendicularmente al plano de incidencia. De estas mismas ecuaciones se puede establecer la Ec.(1).

$$\tan \theta_p = \frac{n_t}{n_i} \quad (1)$$

En la Ec (1) θ_B es el ángulo de Brewster o de polarización, n_i es el índice de refracción del medio desde el cual proviene el haz que incide en la interfaz, y n_t es el índice del medio al que se transmite. También la ley de Brewster puede deducirse fácilmente de la ley de Snell. Esta relación sencilla entre los índices de refracción y el ángulo

de polarización la hace útil como método de refractometría, con tal solo medir el ángulo de polarización.

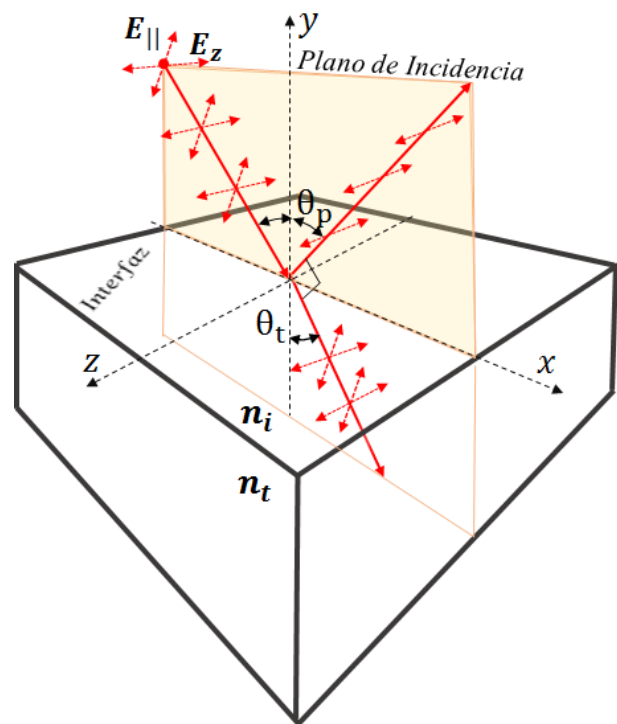


Figura 1: Ilustración de la polarización del haz en el ángulo de Brewster. $E_{\parallel}$ es la componente del campo paralela al plano de incidencia. E_z es la componente del campo perpendicular al plano de incidencia.

Investigar las ecuaciones de Fresnel en términos de la reflectancia y transmitancia de materiales no conductores, homogéneos e isotrópicos.

Diseño Experimental

La Fig 2. es una imagen del arreglo experimental. Consta de dos brazos, en el brazo estático se ubica la lámpara de luz blanca, un filtro frecuencial, un diafragma, una lente convergente colimadora y un polarizador lineal. En el brazo móvil se ubica una lente convergente colectora y el sensor de intensidad del haz reflejado de la muestra. En el eje de los brazos está ubicada una cubeta porta muestras de líquidos transparentes.

Girando el polarizador lineal podemos elegir la orientación del plano de vibración del campo con respecto al plano de incidencia. La Tabla 1 contiene la relación de los aparatos a utilizar en la construcción del arreglo experimental.



Figura 2: Esquema experimental

Construya el arreglo experimental, iniciando con la alineación de la lámpara de luz blanca, luego colimar el haz de luz mediante el procedimiento de: enfoque de la lente condensadora sobre una apertura del diafragma de 1 a 2 mm, luego poner una distancia entre el diafragma y la lente convergente igual a la longitud focal de esta lente. Se debe garantizar que el haz se propague paralelo al riel, pasando por la muestra hasta llegar al sensor de luz, luego ubique el filtro frecuencial rojo o verde. Luego se debe girar el eje óptico del polarizador hasta una ubicación paralela al plano de incidencia, es decir que el campo estará entonces vibrando paralelo a este plano. Ubique el sensor de luz sobre el brazo fijo, justo antes de la cubeta y registre la intensidad de la haz incidente I_o ; ubique de nuevo el sensor el brazo móvil.

Gire el brazo móvil hasta detectar el mínimo de intensidad y registre el valor del ángulo. Haga registros de intensidad del haz reflejado I_R , a intervalos de 2° , 20 por encima y 20 por debajo del ángulo de mínima intensidad. Tabule los datos en el modelo de Tabla 1. Repita este procedimiento con cada filtro y muestra.

Tabla 1: Lista y características de los aparatos.

Nombre del dispositivo	Características
Lámpara	Luz blanca, 12 v / 6 W, con lente condensadora y porta objetos
Polarizador lineal	
Sensor	
Banco metálico	4 Anclajes
Porta muestras para líquidos	Cubeta de caras paralelas
Muestras	Agua, Glicerina, Alcohol

Observaciones Experimentales/Datos

Durante el experimento con cada muestra anote las observaciones y tabule los datos en cuadros como el indicado en la Tabla 2. Establezca posibles errores sistemáticos durante la toma de datos.

Muestra		
$\theta_i (^\circ)$	$I_R (V)$	$R = \overline{I_R}/I_o$

Tabla 2: Tabulación de datos experimentales

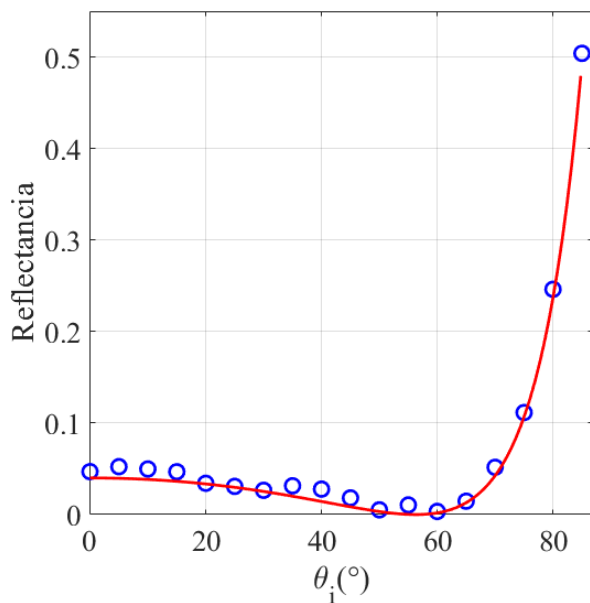


Figura 3: Esquema experimental

Código-Lenguaje Matlab/Generación de la Figura 2

```

Irpaprom=[0.0516    0.0525    0.0402
0.0494    0.0425    0.0311    ...];

theta2=10:5:77;

plot(theta2,Irpaprom)

figure1 = figure;
axes('Parent',figure1,'FontSize',...
20,'FontName','Times_New_Roman')
grid('on');
box('on');
hold('all');
axis square
plot(theta2,Irpaprom,'-ob','Markersize',10,...
'LineWidth',2,'Color',[0 0 1])
xlabel('\theta_{}^{\circ}');
ylabel('Intensidad_reflejada_{}');
xlim([20 77])

```

Análisis del experimento y Discusión de Resultados

Grafique los datos como muestra la Fig.3. Ajuste los datos y de ella determine el ángulo de polarización y el respectivo índice de refracción de cada muestra. Utilice los datos para obtener la curva de transmitancia contra el ángulo de incidencia. Analice lo que develan las curvas respecto a las leyes de reflexión, de Snell y de Brewster.

Incluya un apartado de conclusiones del experimento en términos del cumplimiento de los resultados obtenidos y cumplimiento de los objetivos propuestos.

Referencias

- [1] Hecht, E., *Óptica*, Addison-Wesley, 4ta Ed., Madrid (2002).
- [2] Born, M., Wolf, E., *Principles of Optics*, 6th Edition, (1980).
- [3] Malacara, Z., Malacara, D., *Handbook Of Optical Design*, (2004).
- [4] Rossi B., *Fundamentos de Óptica*, (1977).
- [5] <https://phet.colorado.edu/es/>.
- [6] <https://ricktu288.github.io/ray-optics/simulator/>.
- [7] Leybold, <https://www.ld-didactic.de,.>

Diffraction at a double slit and at multiple slits

Objects of the experiments

- Investigating diffraction at a double slit for various slit spacings.
- Investigating diffraction at a double slit for various slit widths.
- Investigating diffraction at multiple slits for various slit numbers.

Principles

The nature of light was a controversial issue for a long time. In 1690, Christiaan Huygens interpreted light as a wave phenomenon; in 1704, Isaac Newton described the light beam as a current of particles. This contradiction was resolved by quantum mechanics, and the idea of wave-particle duality came up.

Diffraction at a double slit:

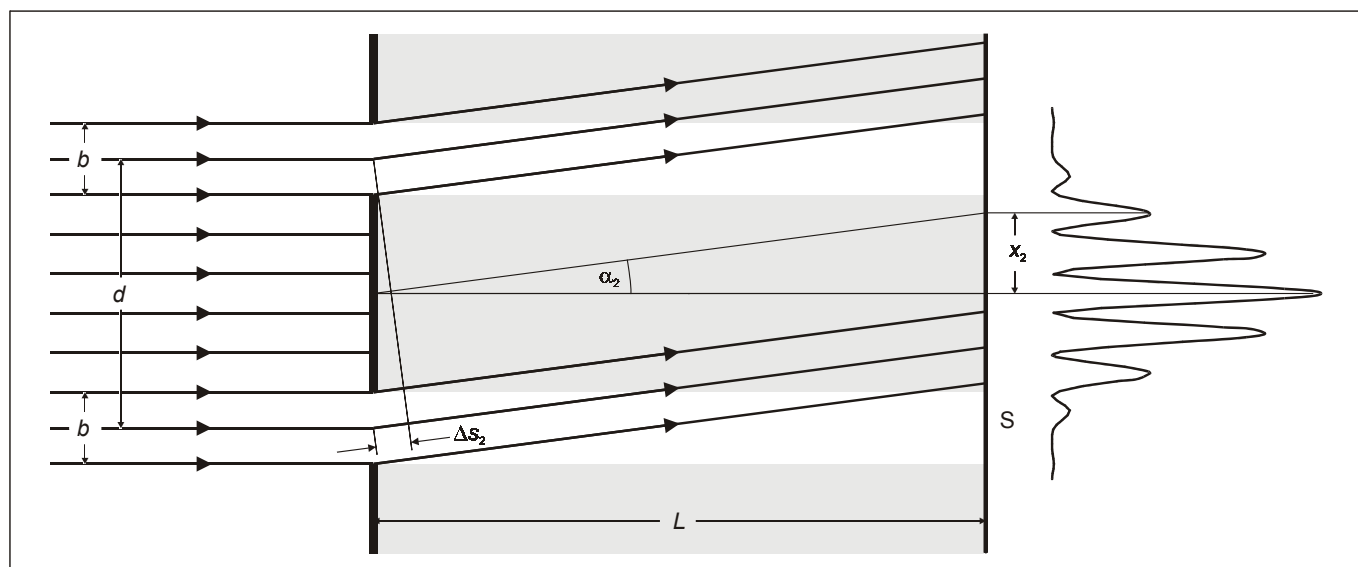
A particularly clear indication of the wave character of light was provided by the experiment on diffraction at a double slit

by *T. Young*. Today this experiment can easily be reproduced with the intensive and coherent light of an He-Ne laser:

Due to diffraction of the parallel incoming light at two closely spaced slits of equal aperture, the light propagates also in the geometric shadow of the slit diaphragms (grey area in Fig. 1). Moreover, a system of bright and dark fringes is observed on a screen behind the double slit. This cannot be explained with the laws of geometrical optics.

An explanation is possible if wave properties are assigned to the light and if the slits are considered to be two coherent light sources whose light bundles superimpose. The superposition leads to destructive and constructive interference in certain directions. In a simple approach, the light bundles coming from the slits are first subdivided into (infinitely) many partial bundles. Then it can be made clear with the aid of Fig. 1 that maximum intensity occurs in directions in which there is exactly one partial bundle from the second slit which corresponds to any partial bundle from the first slit so that both interfere constructively. For light bundles

Fig. 1 Schematic illustration of diffraction at a double slit
 b : slit width, d : slit spacing
 L : distance between the screen and the double slit
 x_2 : distance of the second maximum from the centre
 α_2 : direction of observation for the second maximum
 Δs_2 : path difference of the principal rays
 S : screen



Apparatus

1 diaphragm with 3 double slits	469 84
1 diaphragm with 4 double slits	469 85
1 diaphragm with 5 multiple slits	469 86
1 He-Ne laser, linearly polarised	471 830
1 holder with spring clips	460 22
1 lens in frame, $f = +5$ mm	460 01
1 lens in frame, $f = +50$ mm	460 02
1 precision optical bench, 1 m	460 32
4 optics riders, $H = 60$ mm/ $B = 36$ mm	460 370
1 translucent screen	441 53
1 saddle base	300 11

that emerge under the angle α_n this is true each time when the path difference Δs_n between the principal rays (drawn in the figure) is an integer multiple of the wavelength λ of the light:

$$\Delta s_n = n \cdot \lambda \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (\text{I})$$

For small diffraction angles the following relation holds approximately:

$$\frac{\Delta s_n}{d} \approx \alpha_n \approx \frac{x_n}{L} \quad (\text{II}).$$

Hence, the intensity maxima are located on the screen at the positions (measured from the centre of the diffraction pattern)

$$x_n = n \cdot L \cdot \frac{\lambda}{d} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (\text{III});$$

i.e. they are spaced at the distance

$$a = x_{n+1} - x_n = L \cdot \lambda \cdot \frac{1}{d} \quad (\text{IV}).$$

Exactly in the middle between two intensity maxima there is an intensity minimum. Therefore the distance between a minimum and the next one is also given by Eq. (IV).

It should be mentioned explicitly that the present considerations are based on *Fraunhofer's* point of view, which means that parallel wave fronts of the light before and after the diffraction object are investigated. On the one hand this corresponds to a light source that is at an infinite distance

from the diffraction object, and on the other hand it corresponds to a screen that is at an infinite distance from the diffraction object. In the case of *Fresnel's* point of view, the light source and the screen are at a finite distance from the diffraction object. However, the diffraction patterns are more easily calculated for *Fraunhofer* diffraction.

The intensity would be the same for all maxima, i.e. the bright fringes would exhibit the same brightness if the diffraction of light at the individual slits occurred with the same intensity in all directions. However, diffraction at a single slit depends on the angle of observation α . Therefore the diffraction pattern observed behind the double slit is modulated by diffraction at a single slit. For an exact calculation of the diffraction pattern, the oscillation states of all partial bundles that come from the slits are added up with their phase differences being taken into account. As a result the amplitude A of the field strength of the diffracted light is obtained at an arbitrary position x on the screen. From the amplitude distribution $A(x)$ calculated this way, the intensity distribution $I(x) = A^2(x)$ is derived immediately.

On the left of Fig. 2, the diffraction pattern of a double slit is shown for various slit spacings d with the same slit width b . It is clearly seen that the distance between the maxima decreases with increasing slit spacing. Their intensity is not constant because it is influenced by diffraction at single slits. Therefore it is sensible to determine the distance a on the screen defined in Eq. (IV) from the distance between the minima instead of the distance between the maxima.

On the right of the same figure, the diffraction pattern of a double slit is shown for various slit widths b with the same slit spacing d . The distance between the maxima is now the same in all three cases; however, the intensities are different because the influence of diffraction at single slits varies.

Diffraction at multiple slits:

The consideration regarding the determination of the maxima in diffraction at a double slit can be applied immediately to the diffraction at multiple slits with N equally spaced slits having the same aperture. If Eq. (I) is fulfilled, the light bundles of all N slits interfere constructively. Eqs. (III) and (IV) also hold for multiple slits.

Mathematically the determination of the intensity minima is more involved: a minimum between the n -th and the $(n+1)$ -th maximum is found if the path difference between the principal rays of neighbouring slits fulfils the condition

$$\Delta s = n \cdot \lambda + m \cdot \frac{\lambda}{N} \quad m = 1, \dots, N-1 \quad (\text{V}).$$

For this path difference, the partial bundles from the N slits interfere such that the total intensity is zero. This is illustrated in Fig. 3 with the aid of so-called pointer representations, in which the phase differences between the partial bundles coming from different slits are taken into account.

There are $N - 1$ minima between every pair of maxima. In between there are $N - 2$ so-called secondary maxima, whose intensity is weaker than that of the principal maxima. However, the latter is only true as long as the influence of diffraction at single slits can be neglected. In Fig. 4, the dependence of the diffraction pattern on the number of slits N is shown. As the slits are equally spaced, the distances between the principal maxima are equal for all slit numbers. With increasing slit number N , the intensity of the secondary maxima becomes weaker as compared with the principal maxima.

Safety notes

The He-Ne laser meets the "Safety Requirements for Teaching and Training Equipment - Laser, DIN 58126, Part 6" for lasers class 2. If the corresponding notes of the instruction sheet are observed, experimenting with the He-Ne laser is safe.

- Never look into the direct or reflected laser beam.
- No observer must feel dazzled.

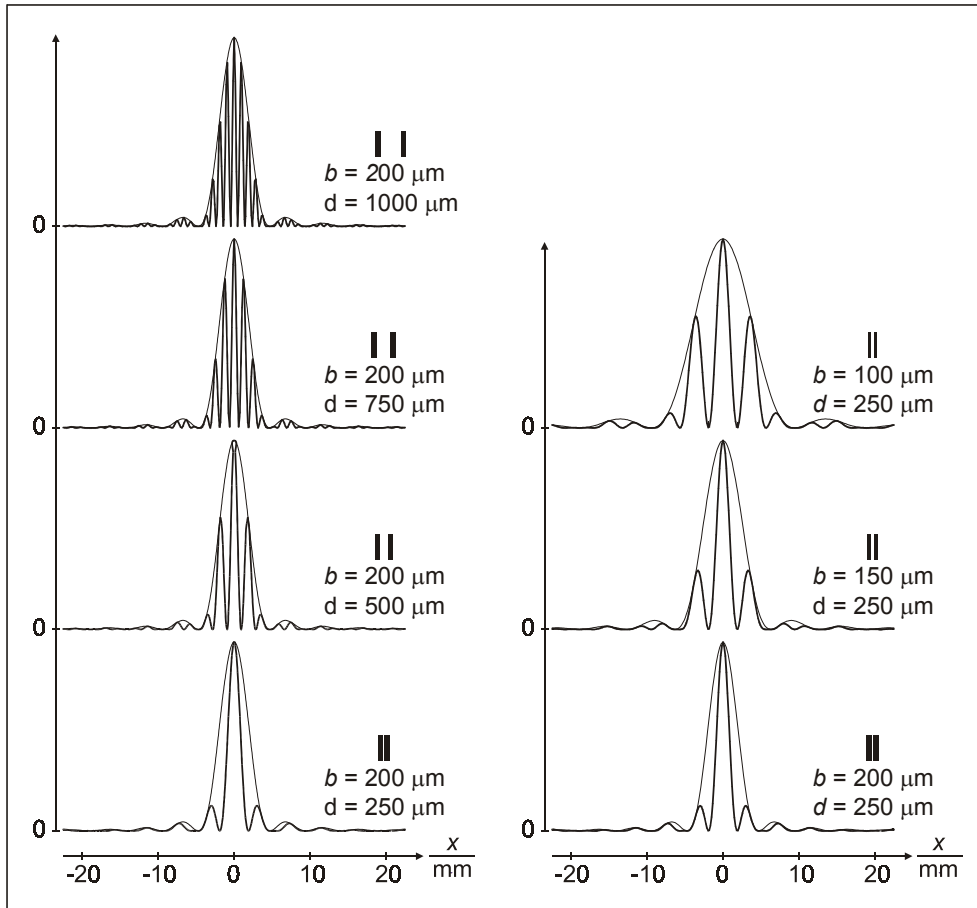


Fig. 2 Dependence of the diffraction pattern of a double slit on the slit spacing d (left) and the slit width b (right).

In each case, the diffraction pattern of a single slit with the corresponding slit width is drawn in the diagram with a smaller line width.

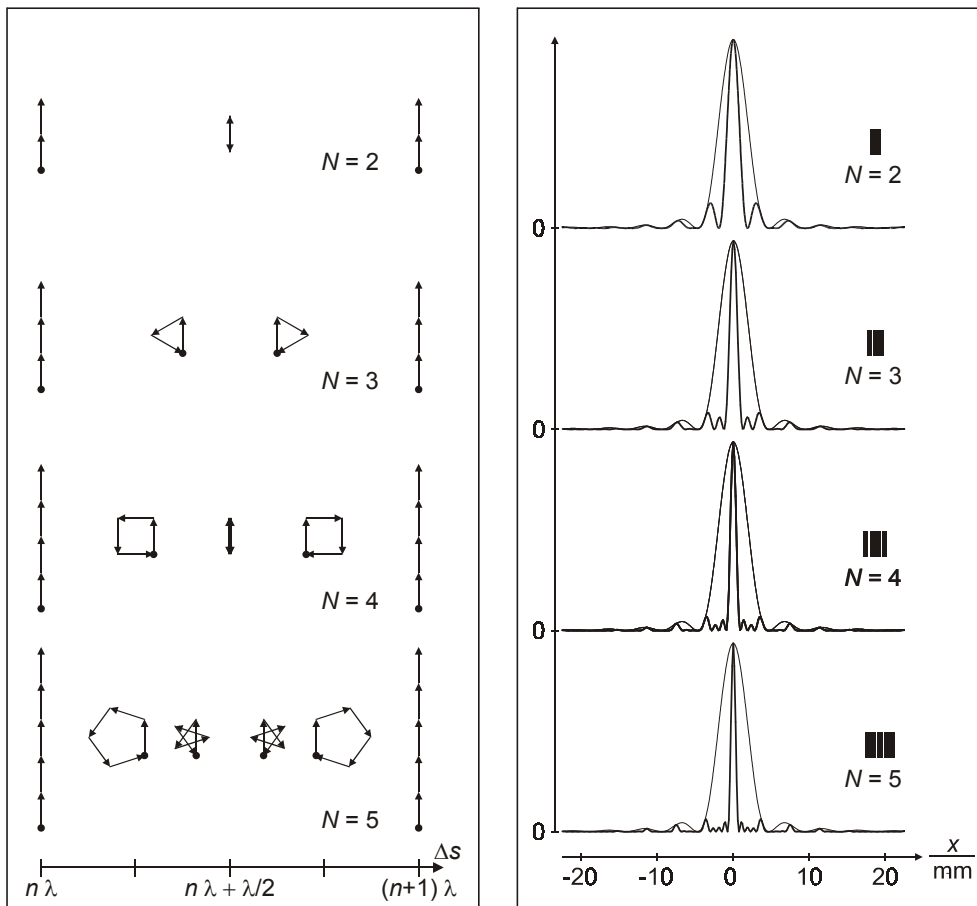
Fig. 3 Pointer representation of the addition of the oscillation amplitudes of N slits with the phase difference being taken into account.

If the path difference Δs between two neighbouring slits is an integer multiple of λ , the maximum diffraction amplitude is obtained.

If the path difference Δs is given by Eq. (V), the diffraction amplitude is zero.

Fig. 4 Dependence of the diffraction pattern of multiple slits on the slit number N for equal slit spacing d and equal slit width b .

The diffraction pattern of a single slit with equal slit width is drawn in the diagrams with a smaller line width.



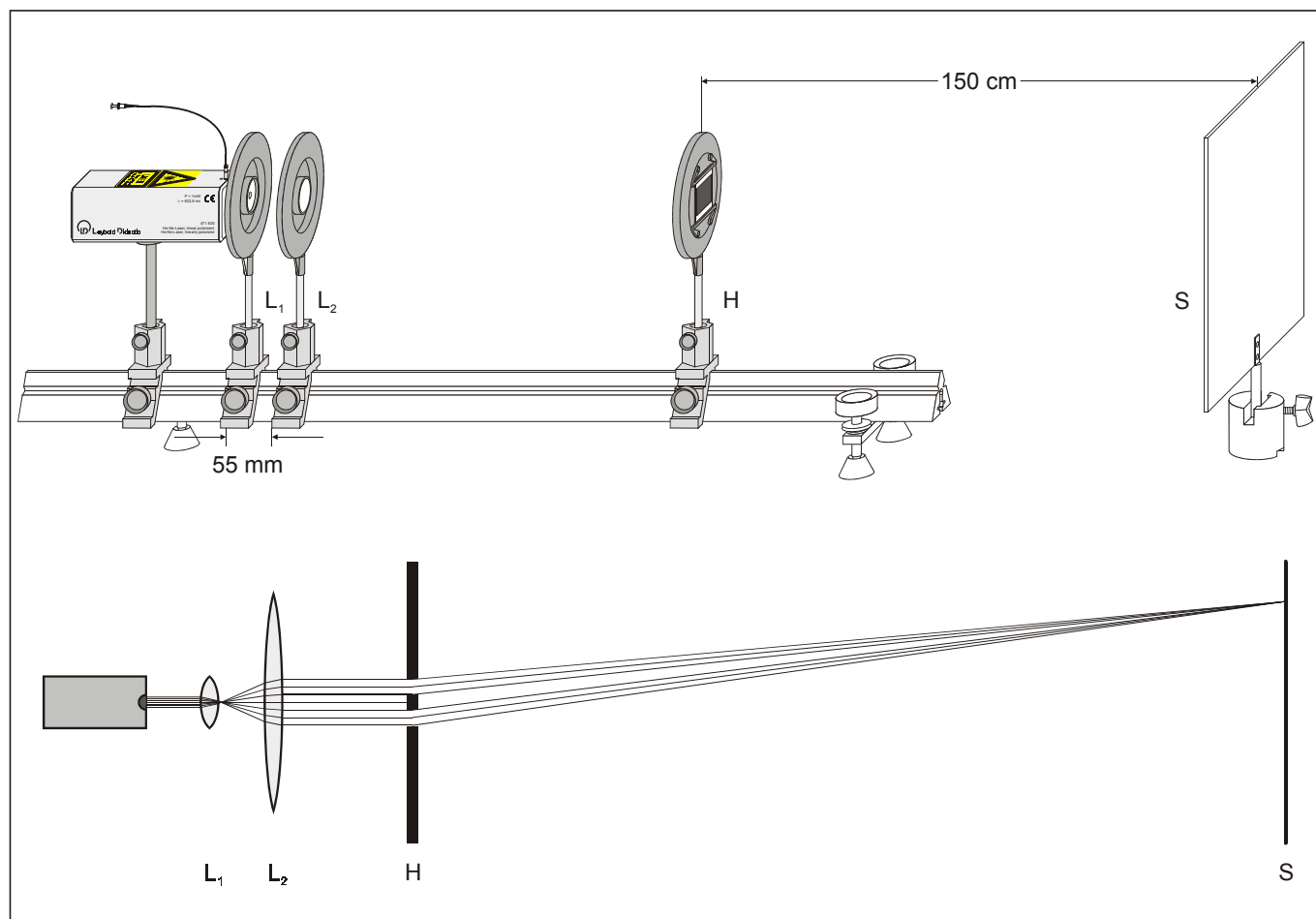


Fig. 5 Experimental setup (above) and schematic ray path (below) for the observation of diffraction at a double slit and at multiple slits.

L_1 : lens $f = +5$ mm

L_2 : lens $f = +50$ mm

H: holder for diffraction objects

S: screen

Setup

Remark: adjustments should be made in a slightly darkened room.

The total experimental setup is illustrated in Fig. 5. First the spherical lens L_1 with the focal length $f = +5$ mm expands the laser beam. The following converging lens L_2 with the focal length $f = +50$ mm is positioned so that its focus is located somewhat below the focus of the spherical lens. In this way the laser beam is slightly expanded and runs approximately parallel along the optical axis.

- Using an optics rider, attach the He-Ne laser to the optical bench as shown in Fig. 5.
- Set up the screen at a distance of approx. 1.90 m from the laser.
- Direct the laser towards the screen, and switch it on.
- Put the holder for diffraction objects H with the diaphragm with 4 double slits (469 85) on the optical bench at a distance of approx. 50 cm from the laser.

- Adjust the height of the laser so that the laser beam impinges on the centre of the diaphragm.
- Place the spherical lens L_1 with the focal length $f = +5$ mm at a distance of approx. 1 cm from the laser (the laser should illuminate the diaphragm evenly.)
- Remove the holder for diffraction objects H.
- Place the converging lens L_2 with the focal length $f = +50$ mm at a distance of approx. 55 mm behind the spherical lens L_1 and slide it along the optical bench towards the spherical lens L_1 until the image of the laser beam on the screen is sharp.
- Advance the converging lens L_2 on the optical bench somewhat further towards the spherical lens L_1 until the diameter of the laser beam on the screen has expanded to approx. 6 mm (the laser beam should now have a constant circular cross section along the optical axis).
- In order to check whether the beam diameter is constant between the lens and the screen, hold a sheet of paper in the ray path and observe the cross section of the beam along the optical axis.
- Put the holder for diffraction objects back into the ray path and shift it so that the distance between the screen and the diffraction object is 1.50 m.
- If necessary, slightly shift the lens L_2 until the diffraction pattern is sharp.

Carrying out the experiment

a) Dependence of diffraction at a double slit on the slit spacing d :

- Insert the diaphragm with 4 double slits (469 85) in the ray path, and observe the diffraction patterns of the double slits with the slit spacings $d = 1.00$ mm, 0.75 mm, 0.50 mm and 0.25 mm one after another.
- For each slit spacing draw conclusions on the influence of diffraction at a single slit from the intensities of the maxima.
- Hold a sheet of paper on the screen in each case, and mark the locations of the intensity minima (dark fringes!) within the central maximum of the single slit function with a soft pencil.
- Determine the (averaged) distance a between the intensity minima in each case.

b) Dependence of diffraction at a double slit on the slit width b :

- Insert the diaphragm with 3 double slits (469 84) in the ray path, and observe the diffraction patterns of the double slits with the slit widths $b = 0.20$ mm, 0.15 mm and 0.10 mm one after another.
- For each slit width draw conclusions on the influence of diffraction at a single slit from the intensities of the maxima.
- Hold a sheet of paper on the screen in each case, and mark the locations of the intensity minima (dark fringes!) within the central maximum of the single slit function with a soft pencil.
- Determine the (averaged) distance a between the intensity minima in each case.

c) Dependence of diffraction at multiple slits on the slit number N :

- Insert the diaphragm with 5 multiple slits (469 86) in the ray path, and observe the diffraction patterns of 2, 3, 4, 5 and 40 slits one after another.
- Identify the influence of diffraction at a single slit, the principal maxima and, for $N = 3, 4$ and 5 , the secondary maxima.
- Hold a sheet of paper on the screen in each case, and mark the locations of the principal maxima (bright fringes!) with a soft pencil.
- Determine the (averaged) distance a between the intensity maxima in each case.

Measuring example

a) Dependence of diffraction at a double slit on the slit spacing d :

Table 1: distances a between the intensity minima for different slit spacings d

$\frac{d}{\text{mm}}$	$\frac{a}{\text{mm}}$
0.25	3.87
0.50	1.84
0.75	1.27
1.00	0.94

b) Dependence of diffraction at a double slit on the slit width b :

The distances between the maxima are equal for all slit widths. With decreasing slit width, the intensity is increasingly distributed to the maxima near the centre.

Table 2: distances a between the intensity minima for different slit widths b

$\frac{b}{\text{mm}}$	$\frac{a}{\text{mm}}$
0.10	3.75
0.15	3.36
0.20	3.67

c) Dependence of diffraction at multiple slits on the slit number N :

The distances between the principal maxima are equal for all slit numbers. The principal maxima themselves become narrower with increasing slit number N . For $N = 3$ to 5 , there are $N - 2$ secondary maxima between two neighbouring principal maxima. The intensity of the secondary maxima becomes weaker with increasing N .

Table 3: distances a between the principal maxima for different slit numbers N

N	$\frac{a}{\text{mm}}$
2	3.81
3	3.78
4	3.81
5	3.73
40	3.79

Evaluation

a) Dependence of diffraction at a double slit on the slit spacing d :

Table 4: Distances a between the intensity minima and reciprocal slit distances d^{-1} (see Table 1)

$\frac{d^{-1}}{\text{mm}^{-1}}$	$\frac{a}{\text{mm}}$
4.00	3.87
2.00	1.84
1.33	1.27
1.00	0.94

In Fig. 6 the measured values from Table 1 are shown as a diagram. The distance a is plotted against the reciprocal of the slit spacing d . Within the accuracy of measurement, the measured values lie on the straight line through the origin drawn in the diagram. The slope of the straight line was calculated with the aid of Eq. (IV) from $L = 150 \text{ cm}$ and $\lambda = 633 \text{ nm}$.

b) Dependence of diffraction at a double slit on the slit width b :

Mean value of the distances a from Table 2: $a = 3.59 \text{ mm}$.

As $\lambda = 633 \text{ nm}$ and $L = 150 \text{ cm}$ are known, the slit spacing d can be calculated with the aid of the transformed Eq. (IV):

$$d = 0.26 \text{ } \mu\text{m}$$

c) Dependence of diffraction at multiple slits on the slit number N :

Mean value of the distances a from Table 3: $a = 3.78 \text{ mm}$.

As $\lambda = 633 \text{ nm}$ and $L = 150 \text{ cm}$ are known, the slit spacing d can be calculated with the aid of the transformed Eq. (IV):

$$d = 0.25 \text{ } \mu\text{m}$$

Results

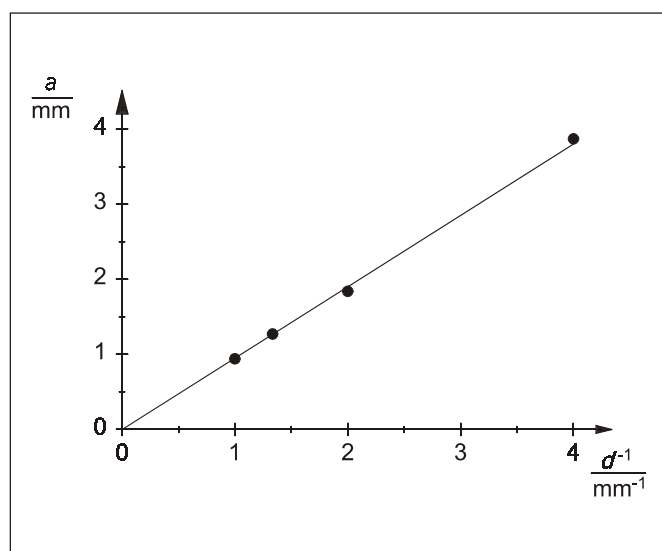
The diffraction pattern of diffraction at a double slit or at multiple slits, respectively, is determined by the slit spacing d , the slit number N and the slit width b .

The distance a between the principal maxima is inversely proportional to the slit spacing d and independent of N and b .

With increasing slit number N , the width of the principal maxima decreases because the number of minima (and of secondary maxima) increases.

The slit width b determines the influence of diffraction at a single slit on the diffraction pattern.

Fig. 6 Distance a between the intensity minima for diffraction at a double slit as a function the reciprocal of the slit spacing.



Determination of the temporal coherence and line width of spectral lines by means of the Michelson interferometer

Objects of the experiments

- Determination of the wavelength of the green spectral line for an Hg spectral lamp by means of a Michelson interferometer
- Determination of the coherence length of the green spectral line for an Hg spectral lamp by means of a Michelson interferometer
- Determination of the coherence time and line width of the green spectral line

Principles

Coherence is the ability of various waves to create stationary interference effects. A temporally stationary interference structure can only be observed when the phase differences between any partial waves around a fixed point change during the observation time by less than 2π . Then the partial waves are called temporally coherent. The maximum time span Δt , during which the phase differences between all parts of the waves change by a maximum of 2π is called the coherence time.

The coherence time Δt_c is directly associated with the spectral width $\Delta \nu$ of the light source. The following applies:

$\Delta t_c = \frac{1}{\Delta \nu}$. By determination of the coherence time Δt_c the spectral width $\Delta \nu$ or $\Delta \lambda$ of a light source, e.g. of individual spectral lines, is determined from the relationships

$$\Delta \nu = \frac{1}{\Delta t_c} \quad \text{or} \quad \Delta \lambda = \frac{1}{c} \frac{\lambda_0^2}{\Delta t_c}. \quad (\text{I})$$

Often the coherence length is used instead of the coherence time. This describes the distance

$$\Delta s_c = \frac{c}{n} \Delta t_c \quad (\text{II})$$

the light travels in a medium with a refractive index n during the coherence time.

Natural line widths for spectral lines in the visible spectral range are approx. $\Delta \lambda \approx 10^{-14} \text{ m}$. This corresponds to a coherence time of approx. 10^{-8} s or a coherence length of 30 m. In commercial spectral lamps the temperature and pressure situation will, however, lead to a noticeable broadening of the spectral lines.

The dominant effect of the line broadening in spectral lamps is pressure broadening. If during the light emission, impact with a further atom occurs, this leads to a change in the photon energy and/or the phase of the emitted wave and therefore to a change in the line width. This effect is linearly associated with the gas pressure and leads to additional shifting of the spectral lines.

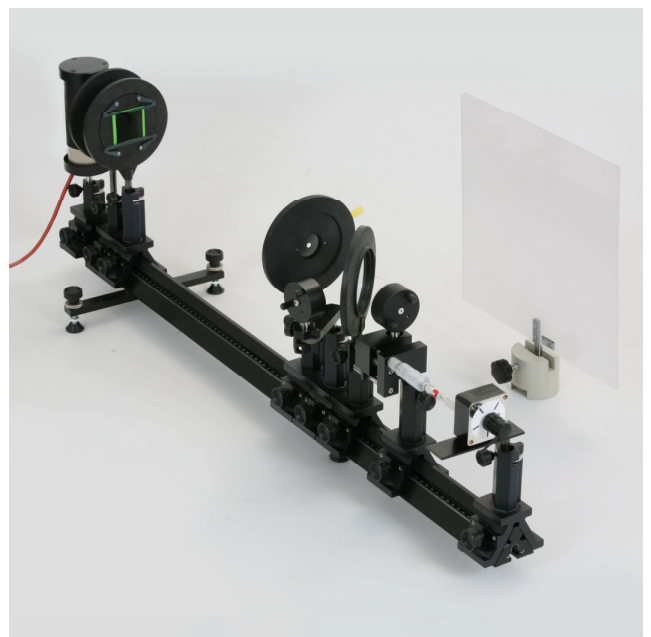


Fig. 1: Experimental setup

A further part of line broadening is based on the Doppler effect because the atoms move statistically in space during the emission. This broadening mechanism increases linearly with the translation speed of the atoms and therefore with increasing temperatures in proportion to $\sqrt{T}$.

In the visible spectral range the Doppler broadening exceeds the natural line width by approximately two orders of magnitude. Typical coherence lengths are several metres for lasers, several centimetres for spectral lines and a few micrometres for white light sources. They can e.g. be measured by means of the Michelson interferometer. The Michelson interferometer is one of the family of two beam interferometers. Interferometer measurements based on this interferometer type are founded on the principle described below:

The beam from a light source is split by a semi-transparent mirror into two parts. The partial beams passing along different paths are reflected back along the same path and are finally recombined and superimposed. The superimposition of the light waves creates the interference image.

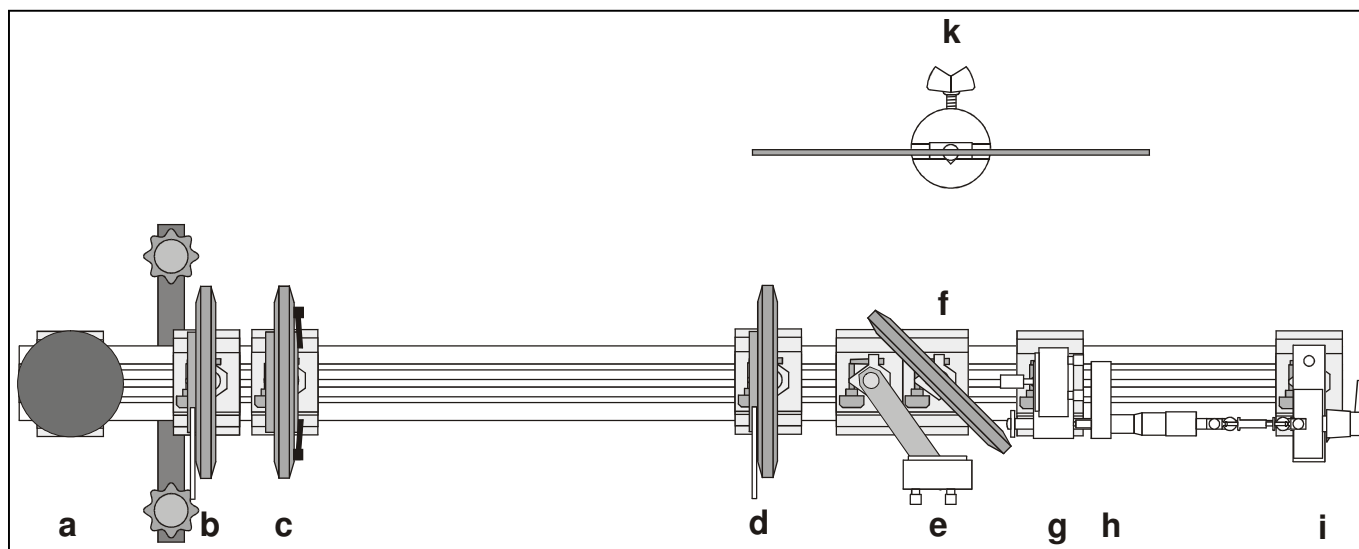


Fig. 2: The setup of the Michelson interferometer on the optical bench seen from above

- a** spectral lamp Hg 100
- b, d** iris diaphragm
- c** monochromatic filter, yellow-green
- e, g** planar mirror with fine adjustment
- f** beam splitter
- h** fine adjustment drive
- i** reduction gears of the fine adjustment drive
- k** translucent screen

If the light source emits a slightly divergent beam, the phase differences at different locations on the screen differ. For this reason a homogeneous intensity distribution is not obtained but a system made up from light and dark interference rings, or a system made up from light and dark lines if only a part of the ring system is visible.

In the experiment initially only the wavelength λ of the green spectral line of an Hg spectral lamp is determined by shifting one of the planar mirrors of the Michelson interferometer, by means of the fine adjustment drive, by a precise distance Δs which causes the optical path length of the affected partial beam to be altered. During this shift the interference lines on the observation screen drift. For the evaluation, either the intensity maxima or the intensity minima are counted passing a specific point on the observation screen while the planar mirror is being shifted.

For determination of the coherence lengths, the positions of an adjustable planar mirror are determined for where interference can still just be observed. From the difference in the path lengths the coherence length Δs_C can be directly derived, and from this the coherence time Δt_C and the line width $\Delta \nu$ of the spectral line can be determined.

Apparatus

1 spectral lamp Hg 100	451 062
1 housing for spectral lamps	451 16
1 universal choke 230 V, 50 Hz.....	451 30
1 optical bench with standard profile, 1 m	460 32
1 optics rider 60/50.....	460 373
7 optics riders 90/50	460 374
2 planar mirrors with fine adjustment.....	473 461
1 fine adjustment drive	473 48
1 cantilever arm.....	460 380
1 beam splitter.....	471 88
2 iris diaphragms	460 26
1 monochromatic filter, yellow-green.....	468 07
1 holder with spring clips	460 22
1 translucent screen	441 53
1 saddle base	300 11

Note:

This experiment can also be carried out for individual lines from other spectral lamps with the appropriate filter. Suitable are e.g. the following combinations:

- Spectral lamp He (451 031) with dark red (468 01) or yellow (468 05) monochromatic light filter.
- Spectral lamp Cd (451 041) with dark red (468 03) monochromatic light filter

A experimental setup applying the cross connector (460 342) is shown at the end of the leaflet.

Safety notes:

Connect spectral lamp (451 062) in housing (451 16) only via the universal choke (451 30) to the mains.

Between the light opening and the optical element (e.g. diaphragm, lens) a minimum distance of 3 cm has to be adhered to in order to prevent overheating.

Setup

Note: Carry out the measurements in a room as completely dark as possible.

Optical components with damaged or dirty surfaces can lead to errors in the interference pattern.

Treat the planar mirror and the beam splitter with great care, store them protected from dust and never touch with the bare hands.

The experimental setup is shown in figure 2. For setting up, the steps described below are required:

Installation on the optical bench:

- Mount the Hg 100 spectral lamp (**a**) in the optics rider 60/50 at one end of the optical bench.
- Mount the reduction gears for the fine adjustment drive (**i**) with the magnetic base on the gear base and mount it on the other end of the optical bench.
- Clamp a planar mirror (**g**) at the top end of the fine adjustment drive (**h**) and mount it in front of the reduction gears (**i**) on the bench.
- Carefully clamp the universal coupling in the joint head of the micrometer screw of the fine adjustment drive (**h**).
- Shift the optics rider with the fine adjustment drive (**h**) and the height of the gear base of the reduction gears (**i**) in such a way that the coupling rods are neither fully stretched out nor compressed. Otherwise the measurement might become falsified because of shifting of the fine adjustment drive.
- Keep the angle between the individual elements of the couplings as small as possible (and under no circumstance larger than 45°).
- Mount one of the iris diaphragms (**b**) approx. 5 cm behind the spectral lamp Hg 100, the second iris diaphragm (**d**) approx. 25 cm in front of the planar mirror, in such a way that the centres of the diaphragms are at the same height.
- Connect the universal choke to the spectral lamp and switch on; wait for several minutes for the lamp to warm up.

Adjustment of the planar mirror (**g**)

After the adjustment of the planar mirror (**g**) it should reflect the light from the spectral lamp back onto its own path. Only in this case shifting of the planar mirror (**g**) by means of the fine adjustment drive will not lead to a beam movement.

- Close the iris diaphragms (**b**, **d**) as much as possible.
- Align the planar mirror (**g**) by adjusting the screws on the back so that the reflected beam hits both iris diaphragm (**d**) and iris diaphragm (**b**) centrally.

After this the adjustment screws on the planar mirror (**g**) must not be touched again! A change to the adjustment of the planar mirror (**g**) would mean that any shifting of the planar mirror (**g**) with the fine adjustment drive would result in a movement of the reflected beam and therefore the partial beams would no longer superimpose properly.

Beam splitter (**f**) and the second planar mirror (**e**)

- Place the beam splitter (**f**) as close as possible to the front of the planar mirror (**g**) so that the complete travel of the fine adjustment drive can be utilised. The mirror side of the beam splitter points in the direction of the spectral lamp.

- Turn the beam splitter (**f**) in such a way that the beam reflected from the planar mirror (**g**) is deflected by 90° .
- Fix the translucent screen (**k**) in the base and place it next to the optical bench so that it is hit at its centre.
- Then clamp the second planar mirror (**e**) in the cantilever arm and mount it on the optical bench in such a way that the planar mirror is hit at its centre by the partial beam reflected from the beam splitter. The distances the planar mirror (**e**) and planar mirror (**g**) are from the beam splitter (**f**) should be approximately equal. On account of the relatively small coherence length of the spectral lamp of a few millimetres, the optical wavelength of the two interferometer arms may be only very slightly different. If necessary adjust the positions of the planar mirror (**e**) and/or the beam splitter (**f**).

Superimposition of the partial beams

For the superimposition adjust only the planar mirror (**e**) (on the cantilever arm)!

- Align the planar mirror (**e**) by adjusting the screws on the back so that the beam is nearly reflected along its own path and after transmission through the beam splitter combines with the first partial beam.
- By fine adjustment of the planar mirror (**e**) the beams of the two interferometer arms can be fully superimposed. For doing this it is useful to cover the beam reflected from the planar mirror (**e**) directly in front of the planar mirror (**e**) partially with a piece of firm paper (e.g. a calling card). The position of the partial beam allowed to pass can now easily be compared to the position of the beam reflected by the planar mirror (**g**).
- Fully open iris diaphragm (**d**).

Now interference lines or rings should become visible on the screen (see fig. 3).

- Carefully adjust the planar mirror (**e**) in such a way that on the screen a system of concentric rings becomes visible in the centre of the lit area.
- Open the iris diaphragm (**b**) sufficiently that the contrast in the interference pattern is not affected.

Carrying out the experiment

During the experiment:

- Avoid mechanical vibration of the optical bench (e.g. do not wobble the table).
- Avoid air flow through the setup (because of flow marks) e.g. from draughts.
- Mark a location on the transparent screen (**k**) where the drifting interference lines can be counted.
- Because of the play in the gearbox, adjust the gearbox button slowly and uniformly by gently placing the finger onto the lever of the reduction gears (**i**) and in this way until, if necessary with more turns, the interference lines start moving.
- Then give the gearbox knob at least one further turn before starting with the measurement.

Note: if the planar mirror and therefore the interference pattern moves jerkily, the slide bush of the fine adjustment drive needs to be lubricated.

Determination of the wavelength of the green Hg spectral line

- Clamp the monochrome filter, yellow-green, in the holder with spring clips and mount it behind the iris diaphragm (b) on the optical bench.
- Rotate the gearbox knob and at the same time count the interference lines (approx. 100) drifting past and the turn of the reduction gears.

Determination of the coherence length of the green Hg spectral line

- Continue rotating the gearbox knob until the interference pattern is only just visible. Read the setting from the micrometer screw of the fine adjustment drive.
- Rotate the gearbox knob in the other direction to make the interference pattern reappear. Continue rotating until the interference pattern is again only just visible and read the setting from the micrometer screw of the fine adjustment screw.

Measuring examples and evaluation**Determination of the wavelength of the green Hg spectral line**

The number N of rotations of the reduction gears, the total shift Δs of the planar mirror, the wavelength λ of the spectral line and the number of rotations Z of the intensity maxima are given by the relationship below:

$$Z \cdot \lambda = 2 \cdot \Delta s \text{ with } \Delta s = N \cdot 5 \mu\text{m}$$

The factor 2 in this equation takes into account that the geometric path is changed for both the direct and the reflected beam by Δs .

Therefore for λ

$$\lambda = 2 \cdot \frac{\Delta s}{Z} = 2 \cdot \frac{N \cdot 5 \mu\text{m}}{Z}$$

In an example, the number of intensity maxima counted was $Z = 73$ and the number of turns $N = 4$. From this the wavelength for the green spectral line of the Hg spectral lamp is determined: $\lambda = 548 \text{ nm}$.

The value given in the literature is $\lambda_{\text{theo}} = 546.01 \text{ nm}$.

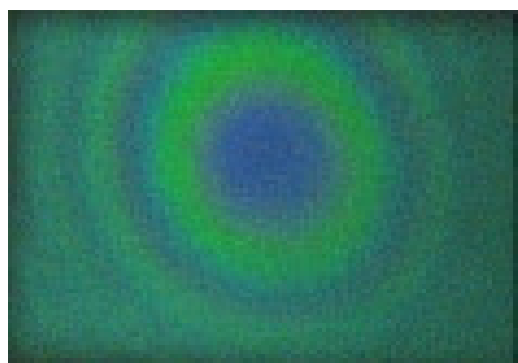


Fig. 3: Interference pattern on the screen without filter

Determination of the coherence length of the green Hg spectral line

The coherence length Δs_C corresponds to the difference between the two optical path lengths and therefore the two mirror positions x_1 and x_2 where interference can still just be observed:

$$\Delta s_C = 2 (x_2 - x_1)$$

The example resulted in $x_1 = 12.5 \text{ mm}$, $x_2 = 18.7 \text{ mm}$ and therefore $\Delta s_C = 12.4 \text{ mm}$.

Calculation of the coherence time and line width of the green spectral line

The coherence time results from formula (II)

$$\Delta t_C = \frac{n}{c} \Delta s_C$$

With $\Delta s_C = 12.4 \text{ mm}$ one obtains with $n = 1.0$ and $c = 3.0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ for the coherence time $\Delta t_C = 4.1 \cdot 10^{-11} \text{ s}$.

The line width of the green Hg spectral line is found from

$$\text{the formula (I): } \Delta \nu = \frac{1}{\Delta t_C} \text{ or } \Delta \lambda = \frac{1}{c} \frac{\lambda_0^2}{\Delta t_C}$$

For $\Delta t_C = 4.1 \cdot 10^{-11} \text{ s}$ and $\lambda = 548 \text{ nm}$ this gives $\Delta \nu = 2.4 \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{s}}$ or $\Delta \lambda = 2.4 \cdot 10^{-11} \text{ m}$.

Discussion

By means of the interferometric measurement the wavelength of the green spectral line of the Hg spectral lamp can be determined precisely. The measuring precision is the higher the larger the total shift Δs and therefore the number of turns and the number of counted intensity maxima.

The observed coherence length of 12.5 mm shows, as described in Principles, that the temperature and pressure situation inside the Hg spectral lamp is sufficient to lead to a marked broadening of the spectral line.

The influence of different pressure and temperature conditions on the coherence length is therefore investigated in more detail in experiment P5.3.4.5.

Notes:

If the monochromatic filter, yellow-green, is removed from the path of the beam and the planar mirror (g) is shifted carefully by rotating the gear button, it is apparent that in certain regions interference images are obtained with a strong light-dark contrast while in other positions a coloured ring system is obtained.

In the case of double lines the superposition in the Michelson interferometer leads to further variations in intensity. This effect can be utilised in order to determine the line separation in the case of double lines (see experiment P5.3.4.6).

Alternative Setup with cross connector (460 342)

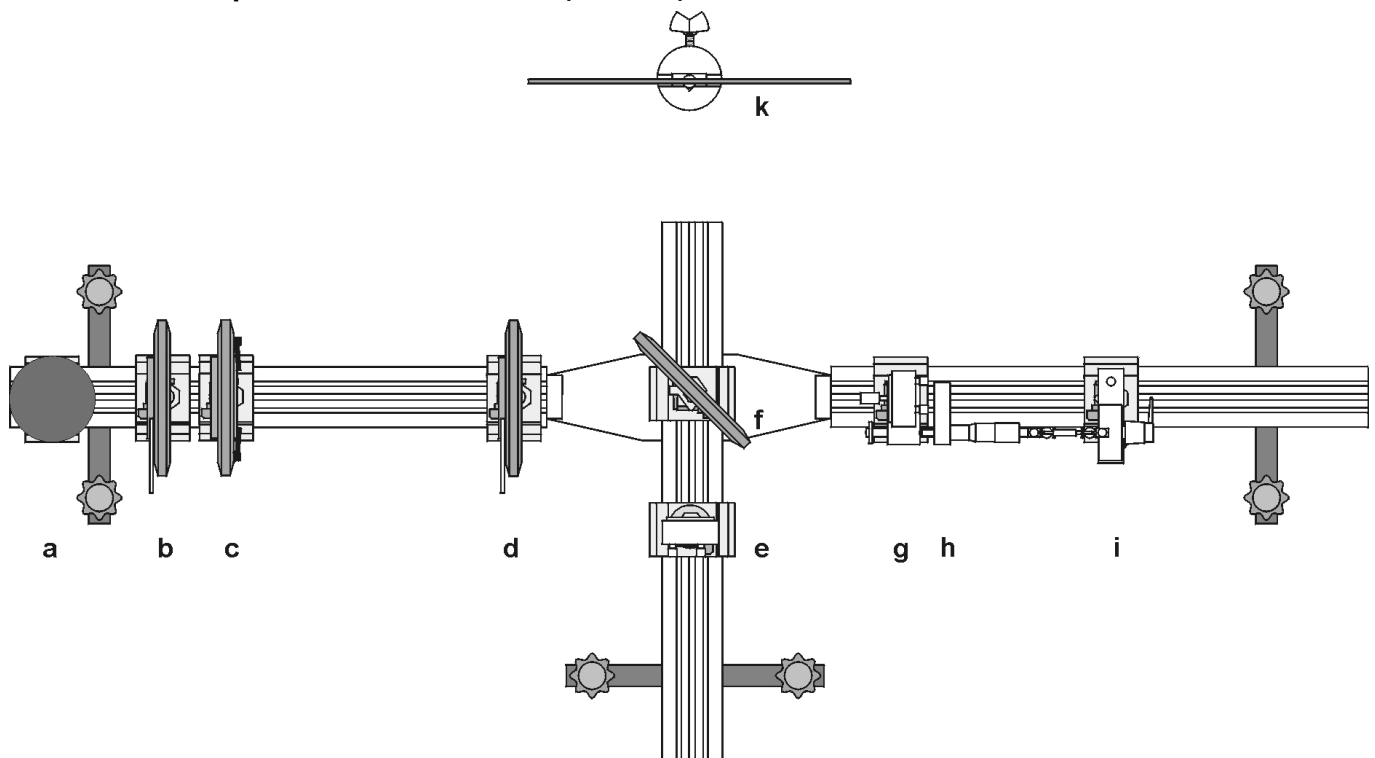


Fig. 4: The setup of the Michelson interferometer on the optical bench seen from above

- a spectral lamp Hg 100
- b, d iris diaphragm
- c monochromatic filter, yellow-green
- e planar mirror with fine adjustment in extension rod
- f beam splitter
- g planar mirror with fine adjustment
- h fine adjustment drive
- i reduction gears of the fine adjustment drive
- k translucent screen

Connect the optical benches with the cross connector as shown in Fig. 4. Then, the setup of the optical components is similar to the setup on a single optical bench.

Apparatus

1 spectral lamp Hg 100	451 062
1 housing for spectral lamps	451 16
1 universal choke 230 V, 50 Hz.....	451 30
3 optical bench with standard profile, 0.5 m	460 335
1 cross connector.....	460 342
1 optics rider 60/50.....	460 373
7 optics riders 90/50.....	460 374
1 extension rod.....	460 385
2 planar mirrors with fine adjustment	473 461
1 fine adjustment drive	473 48
1 beam splitter.....	471 88
2 iris diaphragms.....	460 26
1 monochromatic filter, yellow-green.....	468 07
1 holder with spring clips.....	460 22
1 translucent screen.....	441 53
1 saddle base.....	300 11

Quarter-wavelength and half-wavelength plate

Objects of the experiment

- Measuring the light intensity as function of the analyzer position.
- Using the quarter wave plate to produce circularly polarized light.

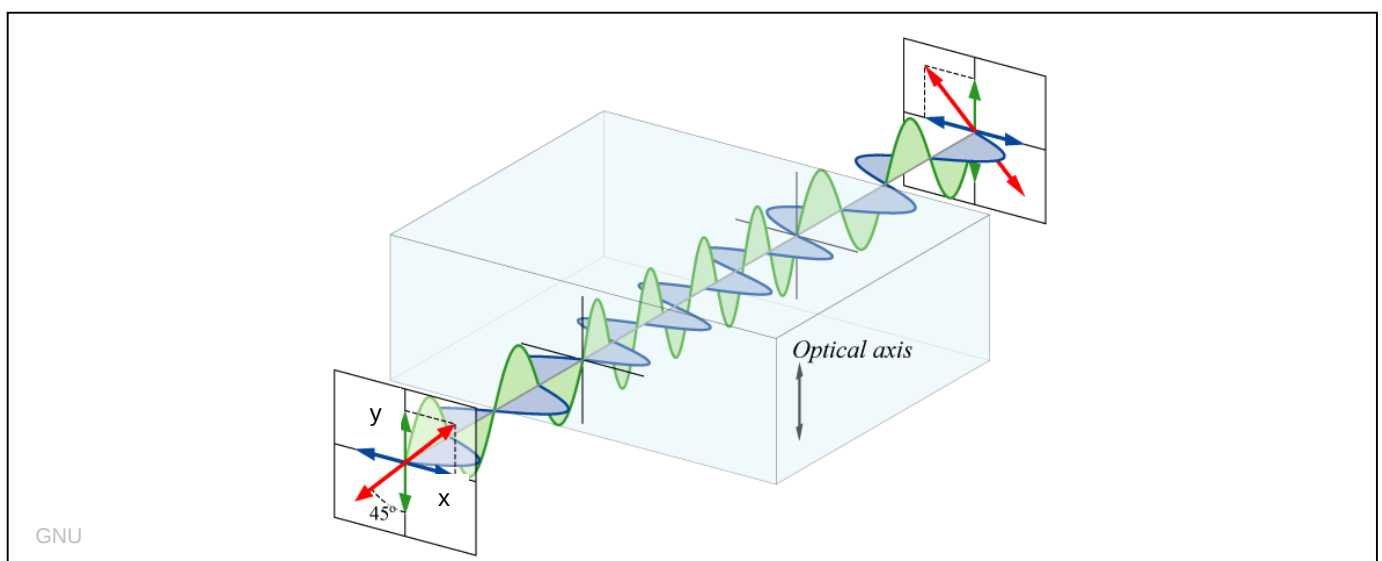
Principles

A wave plate or retarder is an optical device that alters the polarization state of a light beam travelling through it. A typical wave plate is simply a birefringent crystal or a double refracting plastic foil with a carefully chosen thickness.

If a beam of parallel light strikes perpendicularly a wave plate the light beam is splitted into two components due to its double refracting properties. The two components have planes of oscillation perpendicular to each other and slightly different phase velocities. For a quarter-wave plate the thickness of the foil is chosen in such a manner that the light component whose electric field vector oscillates in parallel to the rotation lever lags by a $\lambda/4$ behind other perpendicular oscillating light component. For a half-wave plate the thickness is chosen so that the created phase difference has the amount of $\lambda/2$.

In this experiment monochromatic light falls on a quarter-wave and half-wave plate. The polarization of the emergent light is investigated at different angles between the optic axis of the wave plates and the direction of the incident light.

Fig. 1: A half-wave plate schematically. Linearly polarized light entering a wave plate can be resolved into two waves, parallel (shown as green) and perpendicular (blue) to the optical axis of the wave plate. In the plate the parallel wave propagates slightly slower than the perpendicular one. At the far side of the plate the parallel wave is exactly half of a wavelength delayed relative to the perpendicular wave.



Apparatus

2 Quarter-wave plate	472 601
1 Half-wavelength plate	472 59
2 Polarization filter	472 401
1 Light filter yellow	468 30
1 Si Photocell STE 2/19	578 62
1 Holder for plug-in elements	460 21
1 Multimeter METRAHit Pro	531 282
1 Translucent screen	441 53
1 Optical bench, standard cross section 1 m	460 32
7 Optics rider 60/34	460 370
1 Halogen lamp housing 12 V, 50/90 W	450 64
1 Halogen lamp, 12 V / 90 W	450 63
1 Picture slider	450 66
1 Transformer 2 to 12 V, 120 W	521 25
2 Pair cables 100 cm, red/blue	501 46

Setup

The experimental setup is shown in Fig. 2 schematically.

Note: For the optical setup alternatively the small optical bench (460 43) or the optical bench S1 profile (460 310) can be used.

Notes on the beam path:

- The light supplied by the Halogen lamp (a) is concentrated by the condenser (b) and passes through a heat resistance filter to protect the optical components against heating up.
- Additionally, a heat protection filter filled with water might be used (in Fig. 2 indicated in dotted lines) to reduce the infrared radiation leading to a large background signal detected with the photo cell.

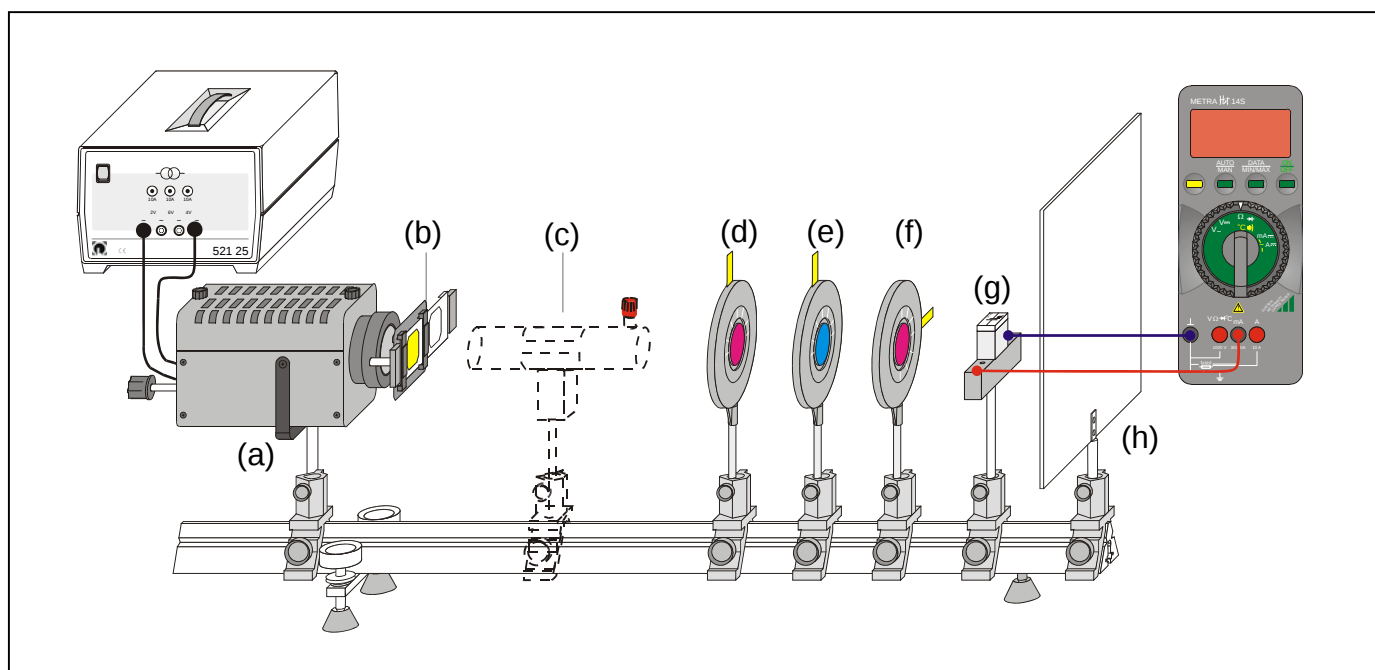
Optical adjustment:

- Set up the Halogen lamp (a) with the reflecting mirror and fit the condenser and picture slider in to the lamp housing.
- Insert the light filter yellow in front of the heat filter in the picture slider.
- Setup the polarizer, the $\lambda/4$ -wave plate and the analyzer like shown in Fig. 2 on the optical bench. The distance between the polarizer and the halogen lamp is about 20 cm to 30 cm.
- Setup the Si-photo cell behind the analyzer and adjust the path of the light ray that the photo cell is well illuminated.
- By turning the lamp insert in the halogen lamp housing the illumination can be adjusted. Produce a sharp image of the lamp coil on a small sheet of paper positioned at the center of the Si photo cell (g).

Note: The translucent screen depicted in Fig. 2 is used to perform the experiment qualitatively.

Fig. 2: Experimental setup for investigating the type of polarization of the emergent light (schematically).

- | | | |
|---------------------------------|---|------------------------|
| (a) halogen lamp | (d) polarizer | (g) Si photo cell |
| (b) picture slider with filters | (e) $\lambda/4$ or $\lambda/2$ wave plate | (h) translucent screen |
| (c) heat protection filter | (f) analyzer | |



Safety notes

Care should taken that the various filters are not damaged by overheating.

- Don't place the *polarization filter* directly in front of the light source. Use a heat protection filter to prevent damage of the diachronic plastic foil from overheating.
- Don't place *quarter wave plate* or a *half wave plate* directly in front of a hot light source to prevent the double refracting foil from overheating.

- For measuring the photo current connect the Si-photo cell via the pair of cables red/blue to the multimeter.

Note: The photo current is proportional to the light intensity. The light intensity is proportional to the electric field vector to the square: $I \sim E^2$

Carrying out the experiment

a) Quarter wave plate

- Remove the quarter wave plate and set the polarizer to the zero position.
- Measure the light intensity as function of the analyzer position over the range -90° to 90° .
- Clamp the quarter wave plate into the optic rider between the polarizer and analyzer.
- Measure the light intensity as function of the position of the analyzer (i.e. angles 0° , 30° , 45° and 60°) over the range -90° to 90° .

b) Half wave plate

- Set the polarizer to the zero position.
- Clamp the half wave plate into the optic rider between the polarizer and analyzer.
- Measure the light intensity as function of the position of the analyzer (i.e. angles 0° , 30° , 45°) over the range -90° to 90° .

Note: The half wave plate can be replaced also by two quarter wave plates with same orientation.

Measuring example

Table 1 and Table 2 summarizes the results. The inevitable background signal due to the infrared component have been baseline corrected.

a) Quarter wave plate

Table. 1: Measured current as a function of the analyzer position α for different quarter wave plate positions φ . (Note: second column – measured without quarter wave plate).

position φ	–	0°	30°	45°	60°
$\frac{\alpha}{\text{deg}}$	$\frac{I}{\mu\text{A}}$	$\frac{I}{\mu\text{A}}$	$\frac{I}{\mu\text{A}}$	$\frac{I}{\mu\text{A}}$	$\frac{I}{\mu\text{A}}$
-90	0.2	0.0	29.0	39.4	31.2
-80	4.0	3.2	24.2	39.4	37.7
-70	11.9	11.2	20.8	39.7	44.2
-60	24.0	21.7	19.5	39.7	49.7
-50	37.1	35.2	20.7	39.7	54.4
-40	51.2	48.9	24.2	39.4	57.4
-30	64.5	61.2	29.2	39.2	58.0
-20	74.2	70.9	35.4	38.5	56.2
-10	80.5	76.7	41.7	38.2	52.0
0	83.2	78.2	47.8	37.7	46.4
10	81.4	75.7	53.2	37.2	39.7
20	74.0	68.5	56.2	37.2	33.3
30	62.5	57.4	57.2	37.2	27.1
40	49.2	43.9	56.2	37.7	22.4
50	34.2	33.2	52.7	38.2	19.6
60	21.2	18.4	47.4	38.2	19.2
70	9.7	8.4	41.2	38.4	20.9
80	3.0	1.7	34.7	39.0	25.1
90	0.7	0.0	28.7	39.2	30.5

b) Half wave plate

Table. 2: Measured current as a function of the analyzer position α for different half wave plate positions φ .

position φ	30°	45°	60°
$\frac{\alpha}{\text{deg}}$	$\frac{I}{\mu\text{A}}$	$\frac{I}{\mu\text{A}}$	$\frac{I}{\mu\text{A}}$
-90	0.0	71.9	56.1
-80	3.5	69.1	43.9
-70	11.7	63	31.7
-60	23.4	52.9	19.3
-50	35.6	42.1	9.5
-40	48.6	29.4	2.4
-30	60.3	17.7	0
-20	69.6	8.0	2.0
-10	74.5	1.9	8.4
0	75.0	0.0	18.8
10	72.0	2.8	30.8
20	64.6	9.9	43.2
30	53.5	19.4	55.3
40	40.8	31.4	64.4
50	28.6	43.9	70.9
60	16.5	54.9	72.8
70	6.8	63.8	70.6
80	1.3	69.7	64.6
90	0.2	71.3	54.8

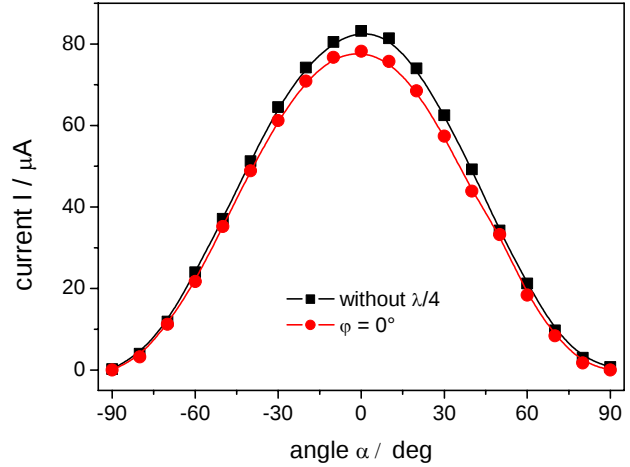


Fig. 3: Current I as a function of the analyzer position α : without quarter wave plate (black) and with quarter wave plate at position $\varphi = 0^\circ$ (red). The solid lines are guides to the eyes only.

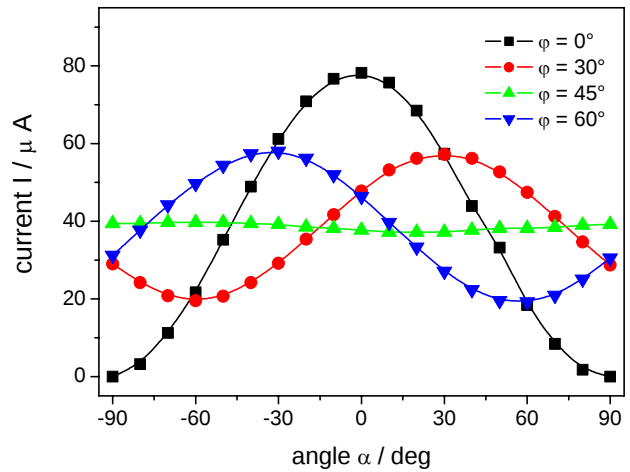


Fig. 4: Current I as a function of the analyzer position α for various quarter wave plate positions φ . The solid lines are guides to the eyes only.

Evaluation and results

a) Quarter wave plate

E_0 is the amplitude of the electric field vector emerging from the polarizer and φ the angle between the polarizer and the quarter wave plate. At a time t the state of vibration of the two component rays is described by:

$$E_1(t) = E_0(t) \cdot \sin\varphi \cdot \sin\omega \cdot t$$

$$E_2(t) = E_0(t) \cdot \cos\varphi \cdot \sin\omega \cdot t$$

In the case of the double refracting quarter wave plates the thickness causes a path difference of $\lambda/4$ (i.e. a phase difference of $\pi/2$) between the two rays. When emerging the quarter wave plate they combine to a resultant ray which can be described by the parametric equations:

$$E_1(t) = E_0 \cdot \sin\varphi \cdot \sin\omega \cdot t$$

$$E_2(t) = E_0 \cdot \cos\varphi \cdot \sin\omega \cdot t$$

These equations describe a rotating E vector in the direction of propagation, i.e. perpendicular to the x- and y-axis about a fixed axis (Fig. 1).

For the angles $\varphi = 0^\circ$ and $\varphi = 90^\circ$ we obtain plane polarized light intensity after the quarter wave plate:

$$I = I_0 \sim E_0^2$$

This is in agreement with the experimental results shown in Fig. 3, i.e. $I \sim \cos^2 \alpha$.

For an angle $\varphi = 45^\circ$ $\sin \varphi = \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{2}}$ and the amount of the rotating E vector is given by:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \frac{E_0}{\sqrt{2}}$$

The light is circularly polarized and the intensity is given by:

$$I = \frac{I_0}{2} \sim \frac{E_0^2}{2}$$

The light is transmitted without loss of intensity in all analyzer positions α . This is in agreement with the experimental results shown in Fig. 4.

At all other angles φ other than 0° , 45° and 90° the transmitted light is elliptically polarized. The tip of the E vector rotating about the axis parallel to the direction of propagation describes an ellipse with the semi axes a and b:

$$E_1(t) = E_a \cdot \sin \varphi \cdot \sin \omega \cdot t$$

$$E_2(t) = E_b \cdot \cos \varphi \cdot \sin \omega \cdot t$$

In agreement with the experimental results depicted in Fig. 4 the intensity for any angle φ between analyzer and quarter wave plate (here e.g. $\varphi = 30^\circ$ and 60°) is given by:

$$I \sim E_0^2 \cos^2 \varphi \cos^2 \alpha + E_0^2 \sin^2 \varphi \sin^2 \alpha$$

b) Half wave plate

The experimental result for the half wave plate (or two quarter wave plates with same orientation) is summarized in Fig. 5.

The half wave plate produces plane polarized light. For different positions φ of the half wave plate only the polarization plane changes. For example, if the position of the half wave plate is changed about 45° the polarization plane changes about 90° .

The maximum and minimum values are not changed. This is in contrast to the experimental results of the quarter wave plate.

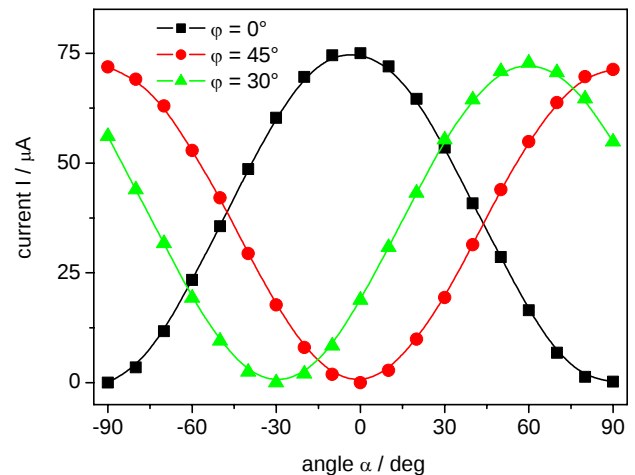


Fig. 5: Current I as a function of the analyzer position α for various half wave plate positions φ . The solid lines are guides to the eyes only.

Supplementary information

Because of dispersion a wave plate will impart a phase difference that depends on the wavelength of the light. Wave plates are thus manufactured to work for a particular range of wavelengths. For the wave plates used here the phase difference produced is best for yellow light. Due to a moderate dispersion in the visible spectrum the deviations are slight.

Wave plates will give the intended effect only when the light penetrates perpendicularly. A slight convergence of the light ray does not affect the experimental results.

Further information about using the polarizer and quarter wave plates can be found in the instruction sheet 472 60.

Demonstrating the Pockels effect in a conoscopic beam path

Objects of the experiment

- To identify the optical axis of the birefringent crystal of the Pockels cell in a conoscopic beam path.
- To demonstrate the *Pockels* effect in a conoscopic beam path.
- To measure the half-wave voltage of the Pockels cell.

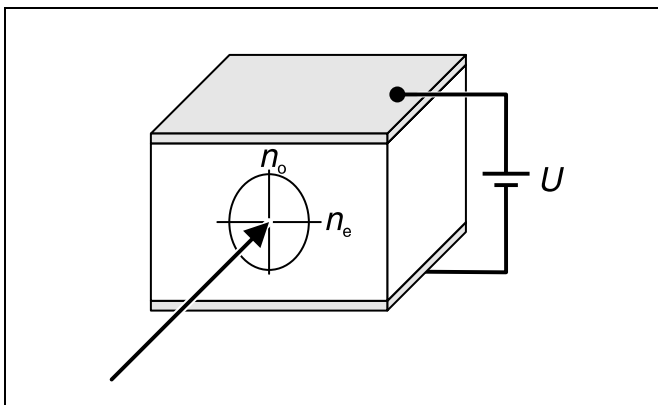
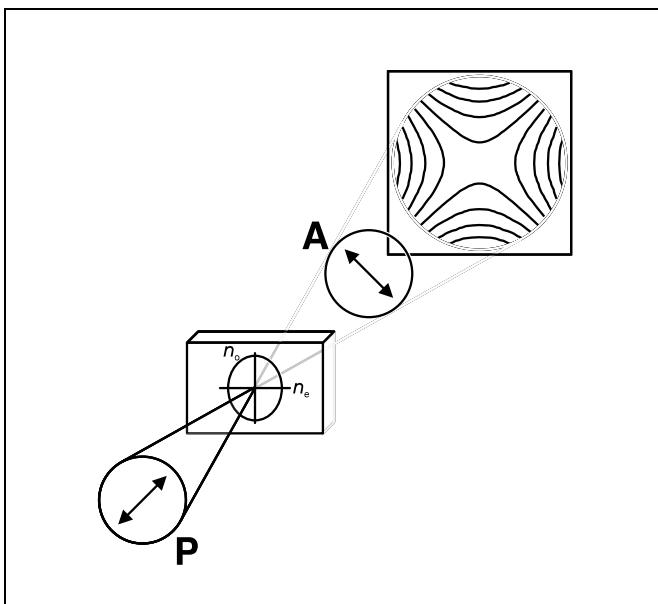


Fig. 1: Schematic diagram of a Pockels cell in transverse configuration

Fig. 2: Diagram of a conoscopic beam path for demonstrating birefringence



Principles

The Pockels effect

The *Pockels* effect is the name given to the occurrence of birefringence and to the change in existing birefringence phenomena in an electric field linearly proportional to the electric field strength. It is related to the *Kerr* effect, although in the latter case the birefringence increases exponentially with the electric field strength. For reasons of symmetry, the Pockels effect can only occur in crystals with no inversion center, whereas the Kerr effect can occur in all substances.

When the direction of the light beam and the optical axis of birefringence are perpendicular to each other, we call this a “transverse configuration” (see Fig. 1). The electric field is applied in the direction of the optical axis. For Pockels cells in the transverse configuration, lithium niobate (LiNbO_3) is most often used.

Lithium niobate crystals are optically uniaxial, negatively birefringent and have the main refractive indexes $n_o = 2.29$ for the ordinary beam, and $n_e = 2.20$ for the extraordinary beam (measured using the wavelength of the He-Ne laser, $\lambda = 632.8$ nm).

Birefringence in a conoscopic beam path

The proof of birefringence in a conoscopic beam path is described in numerous optics textbooks. A crystal with plane-parallel cut faces is illuminated with a divergent, linearly polarized light beam, and the light passing through it is observed behind a perpendicularly aligned analyzer (see Fig. 2). The optical axis of the birefringence is clearly apparent in the interference image, as it is indicated by the symmetry in its vicinity. In this experiment, the optical axis is parallel to the entrance and exit surfaces; this is why the interference pattern consists of two sets of hyperbolas [1] which are rotated by 90° with respect to one another. The real axis of the first hyperbola set is parallel to the optical axis, while that of the second set is perpendicular to the optical axis.

Apparatus

1 Pockels cell	472 90
1 High-voltage power supply, 10 kV	521 70
1 He-Ne laser, linearly polarized	471 480
1 Lens in holder, $f = 5$ mm	460 01
1 Lens in holder, $f = 50$ mm	460 02
1 Polarization filter from	472 40
1 Optical bench, 1 m, standard cross-section	460 32
5 Optics riders, $H = 60$ mm, $W = 36$ mm . . .	460 353
1 Translucent screen	441 53
1 Saddle base	300 11
1 Safety connection lead, red	500 641
1 Safety connection lead, blue	500 642
1 Safety connection lead, 10 cm	500 604

The dark lines of the interference image are caused by light rays for which the difference between the optical paths of the extraordinary and the ordinary partial beam in the crystal is an integral multiple of the wavelength. These light rays retain their original linear polarization after passage through the crystal, and are extinguished in the analyzer. The light rays reaching the center of the interference image are normally incident on the surface of the crystal. For these rays, the path difference between the extraordinary and the ordinary partial beam is

$$\Delta = d \cdot (n_o - n_e), \quad (I)$$

where $d = 20$ is the thickness of the crystal in the direction of the beam. The path difference corresponds to approximately 2800 wavelengths of the laser light used. However, Δ is not usually precisely a whole multiple of λ , but rather lies between two values, $\Delta_m = m \cdot \lambda$ and $\Delta_{m+1} = (m + 1) \cdot \lambda$. The dark lines in the first hyperbola set thus correspond to the path differences Δ_{m+1} , Δ_{m+2} , Δ_{m+3} , etc., and those of the second set to Δ_m , Δ_{m-1} , Δ_{m-2} , etc. (Fig. 3). The position of the dark lines, or better their distance from the center, depends on the magnitude of the difference between Δ and $m \cdot \lambda$.

Safety note

The He-Ne laser fulfills the German technical standard "Safety Requirements for Teaching and Training Equipment – Laser, DIN 58126, Part 6" for class 2 lasers. When the precautions described in the Instruction Sheet are observed, experimenting with the He-Ne laser is not dangerous.

- Never look directly into the direct or reflected laser beam.
- Do not exceed the glare limit (i.e. no observer should feel dazzled).

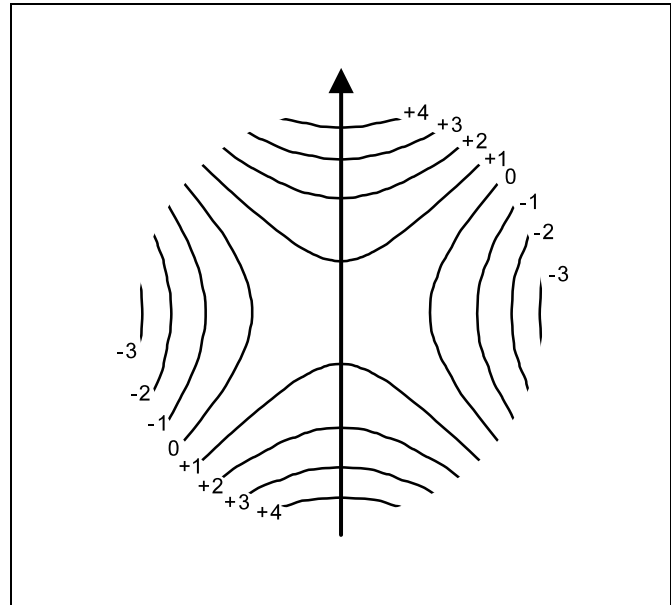


Fig. 3: Interference pattern in the conoscopic beam path with the optical axis of the crystal in the direction of the arrow. The numbers represent the path difference between the ordinary and the extraordinary partial beam. Thus for example the lines with the value +1(–1) have the path difference Δ_{m+1} (Δ_{m-1})

The Pockels effect magnifies or reduces the difference of the main refractive indices $n_o - n_e$, depending on the sign of the applied voltage. This in turn alters the difference $\Delta - m \cdot \lambda$, and thus the position of the dark interference lines. If the so-called half-wave voltage U_π is applied, the value of Δ is changed by one-half wavelength. The dark interference lines shift to the positions of the bright lines, and vice versa. This process repeats itself each time the voltage is increased by U_π .

Setup

Notes:

Carry out all measurements in a darkened room.

Do not insert the rods of the optical components all the way in the optics riders, so that subsequent fine adjustment of the height can be carried out.

Fig. 4 shows the experiment setup; the position of the left edge of each optics rider is given in cm.

Setting up the optical components:

- Mount the He-Ne laser, the 5-mm lens **(a)** and the 50-mm lens **(b)**. Carefully turn the laser and the 5-mm lens and adjust their heights so that optimum illumination of the 50-mm lens is achieved.
- Set up the translucent screen at a suitable distance, and attach a piece of white paper to the screen.

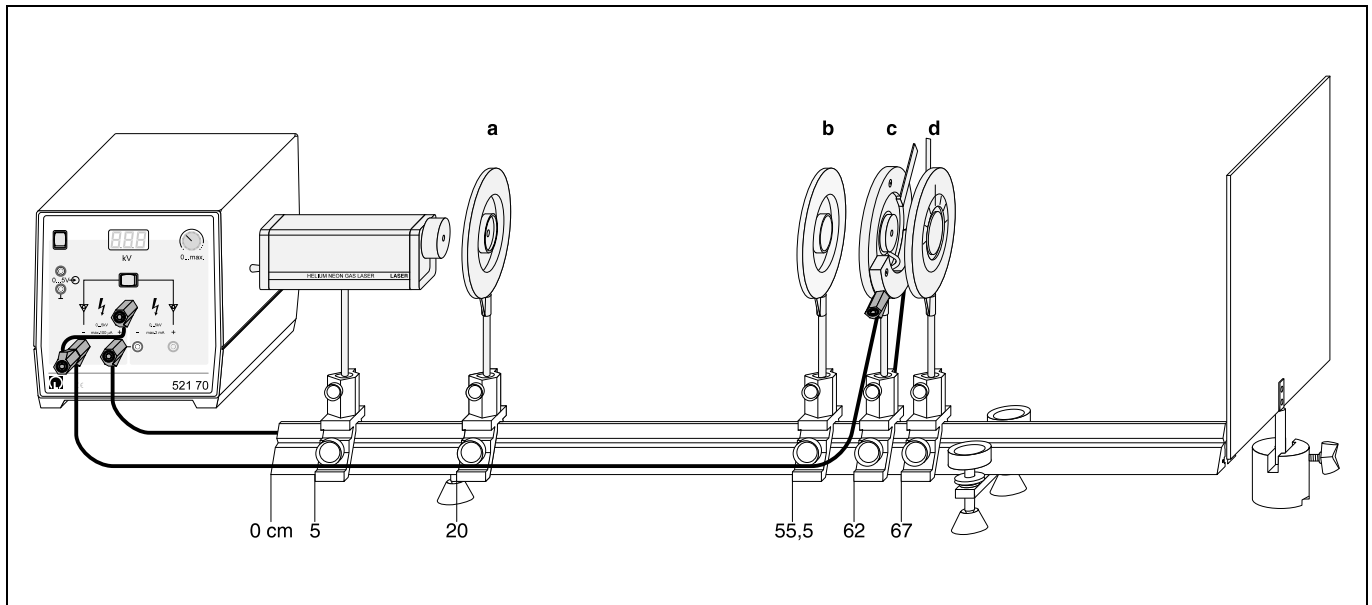


Fig. 4: Experiment setup for demonstrating the Pockels effect

- (a) Lens, $f = 5$ mm
- (b) Lens, $f = 50$ mm
- (c) Pockels cell
(pointer position: $\pm 45^\circ$ with respect to analyzer)
- (d) Polarization filter as analyzer
(pointer position: $\pm 90^\circ$ to polarization direction of laser)

- Set up the polarization filter as the analyzer and vary the direction of polarization until you obtain the minimum intensity on the screen.
- Add the Pockels cell to the assembly and slide it into the exact position of the minimum beam cross-section. Observe the screen and make sure that light reflections on the interior surfaces of the crystal and the plate capacitor in the Pockels cell are avoided.
- Turn the pointer by either $+45^\circ$ or -45° with respect to the analyzer.

Fine adjustment:

- Adjust the height of the laser, the 5-mm lens and, if necessary, the Pockels cell as well until the center of the hyperbola sets in the interference pattern is in the center of the field of view.
- If necessary, turn the Pockels cell on the rod axis.

Electrical connections:

- Connect the Pockels cell to the left output of the high-voltage power supply (max. short-circuit current $100 \mu\text{A}$); be sure to connect the minus-socket to the ground socket.
- Turn the potentiometer of the power supply all the way to the left; then switch on the high-voltage power supply and activate the left-hand output with the selector button.

Carrying out the experiment

a) Demonstrating birefringence:

- Compare the position of the hyperbola set in the interference pattern with the position of the pointer on the Pockels cell.
- Slowly vary the position of the pointer on the Pockels cell and note the changes in the interference pattern.

b) Demonstrating the Pockels effect:

- Return the pointer on the Pockels cell to the initial position ($+45^\circ$ or -45° with respect to the analyzer).
- Slowly increase the voltage U (do not exceed 2 kV!) and observe the changes in the interference pattern.
- Reduce the voltage to 0 V, connect the plus-socket of the high-voltage power supply to the ground socket and reverse the connections on the Pockels cell.
- Once again, increase the voltage U (do not exceed 2 kV!) and observe the changes in the interference pattern.

c) Determining the half-wave voltage:

- Set the voltage to $U = 0$ V and mark the dark lines of the interference pattern on the piece of paper using a green pen.
- Slowly increase the voltage U and record each value at which the bright and dark interference lines are exactly congruent with the markings on the piece of paper.

Measuring example and evaluation

a) Demonstrating birefringence:

When the Pockels cell is rotated around the axis of the light beam, the interference image turns as well. In this case, the real axis of the first hyperbola set is always parallel to the optical axis of the crystal (indicated by the direction of the pointer).

Maximum bright-dark contrast is achieved when the angle between the optical axis and the analyzer is $\pm 45^\circ$. The screen is dark when the optical axis is parallel or perpendicular to the analyzer.

b) Demonstrating the Pockels effect:

When the voltage has the correct polarity, the dark interference lines of the first hyperbola set (real axis of the hyperbolas parallel to the optical axis of the crystal) move toward the center as the voltage increases, while those of the second hyperbola set move away from the center.

The two hyperbolas with the path difference $\Delta_{m+1} = (m + 1) \cdot \lambda$ move to the center at a voltage U_1 (see Fig. 5); thus, the center is dark. When the voltage is increased further, the two hyperbolas change over to the second hyperbola set and there become continuously larger. At a voltage U_2 the next two hyperbolas move across the center to the other hyperbola set, the following two at a voltage U_3 and so on. The interval between the voltages U_1 , U_2 and U_3 corresponds to twice the half-wave voltage (see below).

When the polarity of the voltage is reversed, the hyperbolas move in the opposite direction. Thus, the difference of the main refractive indexes $n_o - n_e$ increases or decreases due to the Pockels effect, depending on the polarity of the voltage.

c) Determining the half-wave voltage:

Table 1: Measurement results for determination of the half-wave voltage

$\frac{U}{\text{kV}}$	Brightness on translucent screen at the marked location
0.0	Dark
0.52	Bright
1.01	Dark
1.52	Bright
1.91	Dark

At the values for the voltage U given in Table 1, the intensity of the lines at the marked points in the interference pattern change from bright to dark, as the path difference between the ordinary and the extraordinary partial beam changes by one-half the wavelength. The difference between these voltages is the half-wave voltage U_π . This has a value of approx. 0.5 V.

The change in the birefringence $\delta n_o - \delta n_e$ after applying the half-wave voltage is very small. Using equation (I), we can calculate

$$\frac{\lambda}{2} = d \cdot (\delta n_o - \delta n_e), \quad (\text{II})$$

and obtain

$$\delta n_o - \delta n_e = 16 \cdot 10^{-16}$$

Bibliography

- [1] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon Press

Fig. 5: Changes in the conoscopic interference image due to the Pockels effect; the respective hyperbola of the interference order $m + 1$ are emphasized with bold lines

