

Metrologías basadas en las propiedades de la luz

6º seminario intercongresos metroología 2015: Tecnologías ópticas en la metroología

Eusebio Bernabeu; Luis Miguel Sánchez Brea

Grupo Complutense de Óptica Aplicada
Departamento de Óptica
Universidad Complutense de Madrid

9 de junio de 2015



Índice

1 Modelos y propiedades de la luz

- Modelos
- Propiedades
- Realidad
- Detección
- Características

2 Metrologías basadas en las propiedades de la luz

- Dirección de propagación
- Amplitud
- Velocidad de propagación
- Frecuencia
- Fase
- Estado de polarización

3 Referencias



El año internacional de la luz



- Las tecnologías basadas en la luz que promueven el desarrollo sostenible y ofrecen soluciones a los problemas generales.
- Al ser una disciplina transversal clave de la ciencia y la ingeniería en el siglo XXI, es esencial se aprecie la importancia del estudio científico de la luz y la aplicación de las tecnologías basadas en la luz.
- Una aplicación esencial de la luz es la **metrología** pues, por sus características, siempre ha estado ligada al proceso de medida.



El año internacional de la luz



- Las tecnologías basadas en la luz que promueven el desarrollo sostenible y ofrecen soluciones a los problemas generales.
- Al ser una disciplina transversal clave de la ciencia y la ingeniería en el siglo XXI, es esencial se aprecie la importancia del estudio científico de la luz y la aplicación de las tecnologías basadas en la luz.
- Una aplicación esencial de la luz es la metroología pues, por sus características, siempre ha estado ligada al proceso de medida.



El año internacional de la luz



- Las tecnologías basadas en la luz que promueven el desarrollo sostenible y ofrecen soluciones a los problemas generales.
- Al ser una disciplina transversal clave de la ciencia y la ingeniería en el siglo XXI, es esencial se aprecie la importancia del estudio científico de la luz y la aplicación de las tecnologías basadas en la luz.
- Una aplicación esencial de la luz es la **metroología** pues, por sus características, siempre ha estado ligada al proceso de medida.



Modelos de la luz

- **Modelo geométrico:** Luz como rayo → dirección de propagación
- **Modelo ondulatorio / electromagnético:** No se suma la intensidad, se suman los campos
- **Modelo cuántico:** Luz como corpúsculo: interacción radiación-materia



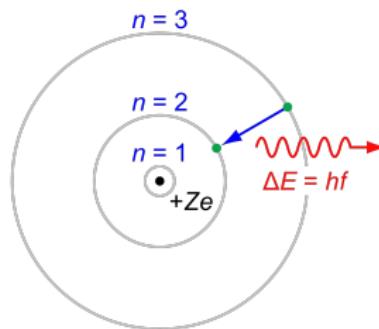
Modelos de la luz

- Modelo **geométrico**: Luz como rayo → dirección de propagación
- Modelo **ondulatorio / electromagnético**: No se suma la intensidad, se suman los campos
- Modelo **cuántico**: Luz como corpúsculo: interacción radiación-materia



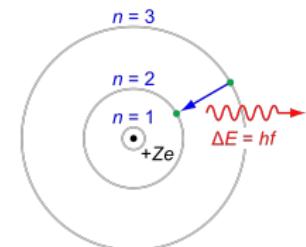
Modelos de la luz

- **Modelo geométrico:** Luz como rayo → dirección de propagación
- **Modelo ondulatorio / electromagnético:** No se suma la intensidad, se suman los campos
- **Modelo cuántico:** Luz como corpúsculo: interacción radiación-materia



Modelos de la luz

- **Modelo geométrico:** Luz como rayo → dirección de propagación
- **Modelo ondulatorio / electromagnético:** No se suma la intensidad, se suman los campos
- **Modelo cuántico:** Luz como corpúsculo: interacción radiación-materia



Existe interconexión entre los diversos modelos de la luz



Propiedades de la luz

- Dirección de propagación
- Amplitud - energía
- Velocidad de propagación
- Frecuencia
- Fase
- Estado de polarización



Propiedades de la luz

- Dirección de propagación
- Amplitud - energía
- Velocidad de propagación
- Frecuencia
- Fase
- Estado de polarización



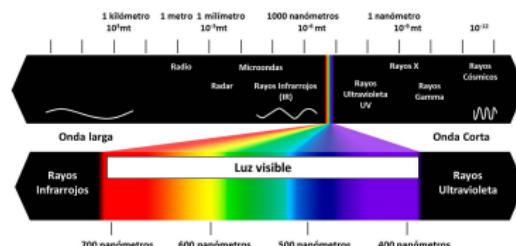
Propiedades de la luz

- Dirección de propagación
- Amplitud - energía
- Velocidad de propagación
- Frecuencia
- Fase
- Estado de polarización



Propiedades de la luz

- Dirección de propagación
- Amplitud - energía
- Velocidad de propagación
- Frecuencia
- Fase
- Estado de polarización



$$g(\lambda)$$



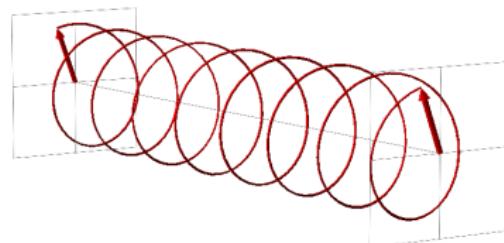
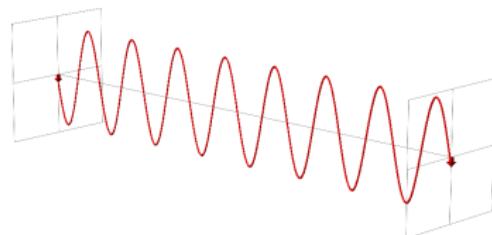
Propiedades de la luz

- Dirección de propagación
- Amplitud - energía
- Velocidad de propagación
- Frecuencia
- Fase
- Estado de polarización



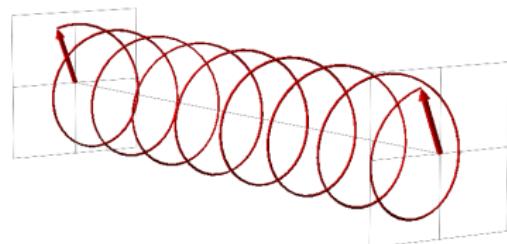
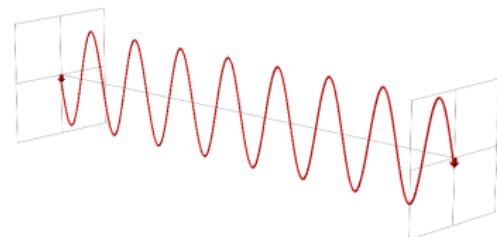
Propiedades de la luz

- Dirección de propagación
- Amplitud - energía
- Velocidad de propagación
- Frecuencia
- Fase
- Estado de polarización



Propiedades de la luz

- Dirección de propagación
- Amplitud - energía
- Velocidad de propagación
- Frecuencia
- Fase
- Estado de polarización



Modelo de onda armónica plana: $\mathbf{E}(r, t) = A \mathbf{v} e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$



La realidad es más compleja

- No existe la onda armónica plana.
- No existe una única dirección de propagación.
- No está bien definido el estado de polarización.
- Las ondas no son completamente monocromáticas.
- Experimentos imperfectos.
- Algoritmos para obtención de resultados.

Modelos

Los modelos no se adaptan de forma exacta a la realidad: incertidumbres



La realidad es más compleja

- No existe la onda armónica plana.
- No existe una única dirección de propagación.
- No está bien definido el estado de polarización.
- Las ondas no son completamente monocromáticas.
- Experimentos imperfectos.
- Algoritmos para obtención de resultados.

Modelos

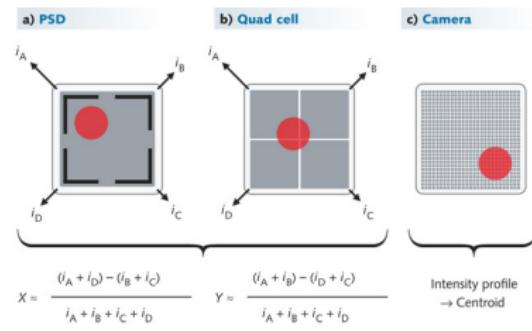
Los modelos no se adaptan de forma exacta a la realidad: incertidumbres



Sistemas de detección

- Finalmente es necesario la interacción con la materia para poder detectar la señal.
- Cualquier propiedad luminosa acaba pasando a variaciones en la intensidad.
- Fotodetectores esenciales para el desarrollo de la óptica:

- 1 Fotodetectores monolíticos
- 2 Position sensor devices
- 3 Detectores de cuadrantes
- 4 CCD, CMOS como arrays lineales o bidimensionales de fotodetectores



Características generales de la metroología óptica

Las técnicas ópticas de medida presentan ventajas fundamentales:

- Técnicas muy **precisas**:
 - La velocidad de la luz es la mayor posible: $300,000 \text{ km/s}$.
 - En el rango visible, la longitud de onda es muy pequeña: $400 - 700 \text{ nm}$.
- Técnicas **no destructivas**, de no contacto: las muestras no se ven modificadas en el proceso de medida.
- **Inmunidad electromagnética**: la luz no interactúa con los campos electromagnéticos estáticos.
- La luz interacciona con la **materia** de forma muy compleja, se puede utilizar para la medida de multitud de parámetros físicos, dimensionales, ópticos, eléctricos, magnéticos, etc...
- Tecnología de dispositivos **madura**: Desarrollo de gran cantidad de elementos opto-electrónicos para generar y modular la luz.



Características generales de la metroología óptica

Las técnicas ópticas de medida presentan ventajas fundamentales:

- Técnicas muy **precisas**:
 - La velocidad de la luz es la mayor posible: $300,000 \text{ km/s}$.
 - En el rango visible, la longitud de onda es muy pequeña: $400 - 700 \text{ nm}$.
- Técnicas **no destructivas**, de no contacto: las muestras no se ven modificadas en el proceso de medida.
- **Inmunidad electromagnética**: la luz no interactúa con los campos electromagnéticos estáticos.
- La luz interacciona con la **materia** de forma muy compleja, se puede utilizar para la medida de multitud de parámetros físicos, dimensionales, ópticos, eléctricos, magnéticos, etc...
- Tecnología de dispositivos **madura**: Desarrollo de gran cantidad de elementos opto-electrónicos para generar y modular la luz.



Características generales de la metroología óptica

Las técnicas ópticas de medida presentan ventajas fundamentales:

- Técnicas muy **precisas**:
 - La velocidad de la luz es la mayor posible: $300,000 \text{ km/s}$.
 - En el rango visible, la longitud de onda es muy pequeña: $400 - 700 \text{ nm}$.
- Técnicas **no destructivas**, de no contacto: las muestras no se ven modificadas en el proceso de medida.
- **Inmunidad electromagnética**: la luz no interactúa con los campos electromagnéticos estáticos.
- La luz interacciona con la **materia** de forma muy compleja, se puede utilizar para la medida de multitud de parámetros físicos, dimensionales, ópticos, eléctricos, magnéticos, etc...
- Tecnología de dispositivos **madura**: Desarrollo de gran cantidad de elementos opto-electrónicos para generar y modular la luz.



Características generales de la metroología óptica

Las técnicas ópticas de medida presentan ventajas fundamentales:

- Técnicas muy **precisas**:
 - La velocidad de la luz es la mayor posible: $300,000 \text{ km/s}$.
 - En el rango visible, la longitud de onda es muy pequeña: $400 - 700 \text{ nm}$.
- Técnicas **no destructivas**, de no contacto: las muestras no se ven modificadas en el proceso de medida.
- **Inmunidad electromagnética**: la luz no interactúa con los campos electromagnéticos estáticos.
- La luz interacciona con la **materia** de forma muy compleja, se puede utilizar para la medida de multitud de parámetros físicos, dimensionales, ópticos, eléctricos, magnéticos, etc...
- Tecnología de dispositivos **madura**: Desarrollo de gran cantidad de elementos opto-electrónicos para generar y modular la luz.



Características generales de la metroología óptica

Las técnicas ópticas de medida presentan ventajas fundamentales:

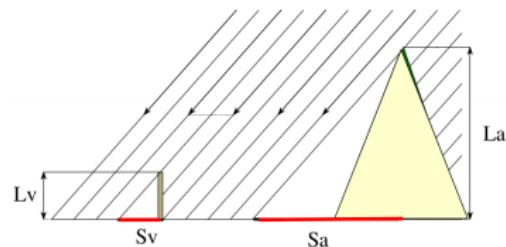
- Técnicas muy **precisas**:
 - La velocidad de la luz es la mayor posible: $300,000 \text{ km/s}$.
 - En el rango visible, la longitud de onda es muy pequeña: $400 - 700 \text{ nm}$.
- Técnicas **no destructivas**, de no contacto: las muestras no se ven modificadas en el proceso de medida.
- **Inmunidad** electromagnética: la luz no interactúa con los campos electromagnéticos estáticos.
- La luz interacciona con la **materia** de forma muy compleja, se puede utilizar para la medida de multitud de parámetros físicos, dimensionales, ópticos, eléctricos, magnéticos, etc...
- Tecnología de dispositivos **madura**: Desarrollo de gran cantidad de elementos opto-electrónicos para generar y modular la luz.



Dirección de la propagación I

Con el simple hecho de asumir la propagación rectilínea de la luz, ésta se puede utilizar como un elemento metrológico de primer orden:

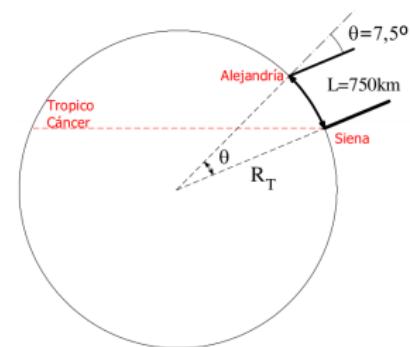
- Tamaño de edificaciones
- Tamaño de la tierra
- Tamaño de la luna
- Distancia tierra-luna
- Distancia entre estrellas:
paralaje



Dirección de la propagación I

Con el simple hecho de asumir la propagación rectilínea de la luz, ésta se puede utilizar como un elemento metrológico de primer orden:

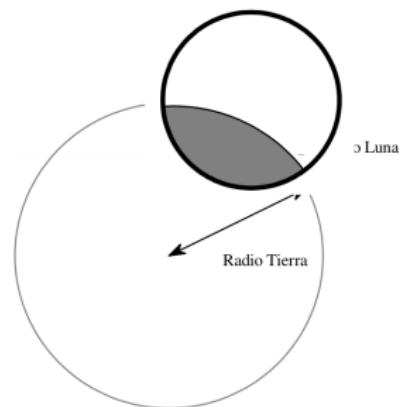
- Tamaño de edificaciones
- Tamaño de la tierra
- Tamaño de la luna
- Distancia tierra-luna
- Distancia entre estrellas:
paralaje



Dirección de la propagación I

Con el simple hecho de asumir la propagación rectilínea de la luz, ésta se puede utilizar como un elemento metrológico de primer orden:

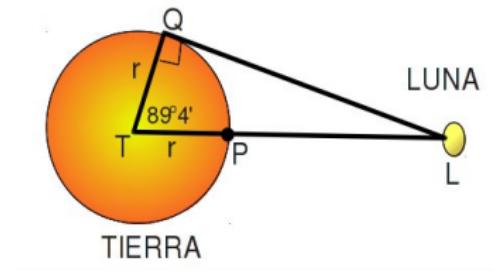
- Tamaño de edificaciones
- Tamaño de la tierra
- Tamaño de la luna
- Distancia tierra-luna
- Distancia entre estrellas:
paralaje



Dirección de la propagación I

Con el simple hecho de asumir la propagación rectilínea de la luz, ésta se puede utilizar como un elemento metrológico de primer orden:

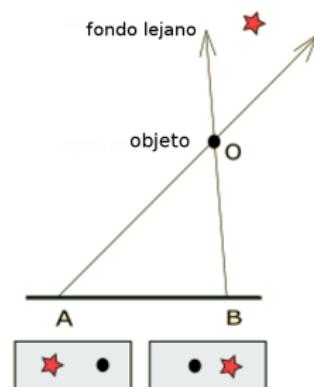
- Tamaño de edificaciones
- Tamaño de la tierra
- Tamaño de la luna
- Distancia tierra-luna
- Distancia entre estrellas:
paralaje



Dirección de la propagación I

Con el simple hecho de asumir la propagación rectilínea de la luz, ésta se puede utilizar como un elemento metrológico de primer orden:

- Tamaño de edificaciones
- Tamaño de la tierra
- Tamaño de la luna
- Distancia tierra-luna
- Distancia entre estrellas:
paralaje



Dirección de la propagación II

Actualmente se utilizan dispositivos basados en la propagación rectilínea de la luz.

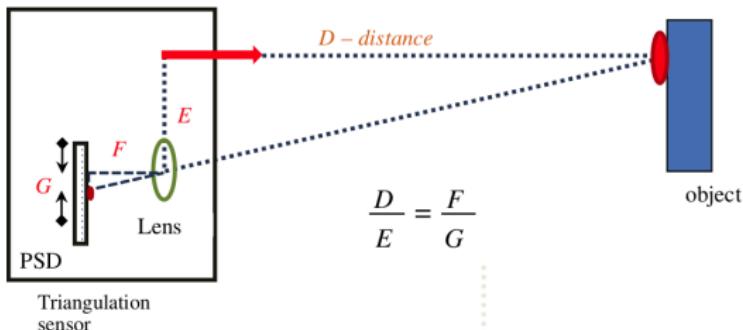


Proyector de perfiles



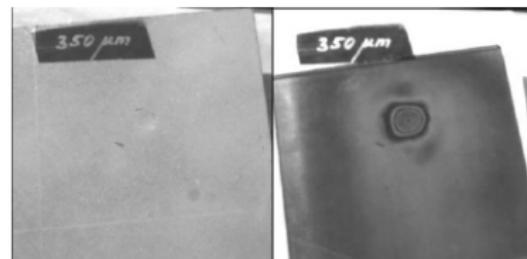
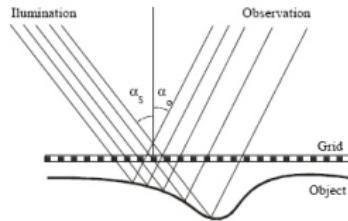
Dirección de la propagación III

Laser rangefinders



Dirección de la propagación IV

- Metrología Moiré
- Proyección de Franjas
- Codificación óptica de la posición

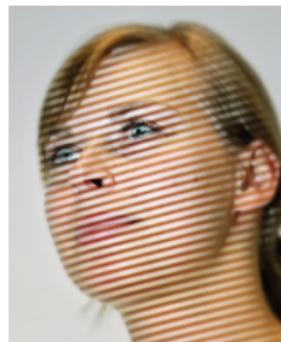
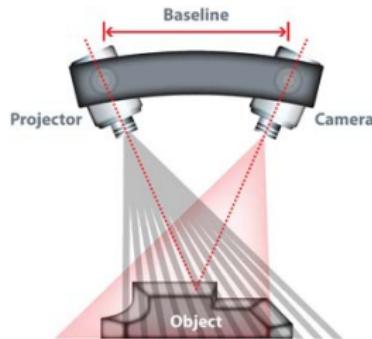


Shadow moiré para detección de defectos



Dirección de la propagación IV

- Metrología Moiré
- Proyección de Franjas
- Codificación óptica de la posición

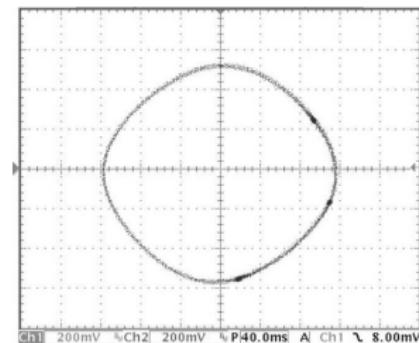


Proyección de franjas y reconstrucción 3D



Dirección de la propagación IV

- Metrología Moiré
- Proyección de Franjas
- Codificación óptica de la posición



Esquema de encoder y figura de Lissajous

Amplitud

- Mediciones radiométricas y fotométricas
- Sensores de fibra óptica
- Sensores de onda evanescente



Amplitud

- Mediciones radiométricas y fotométricas
- Sensores de fibra óptica
- Sensores de onda evanescente

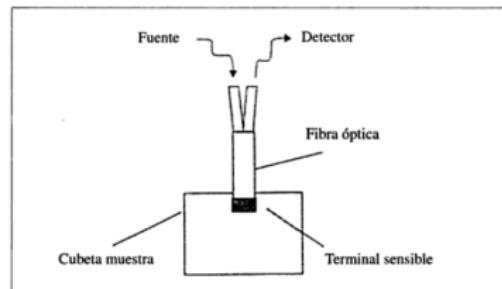
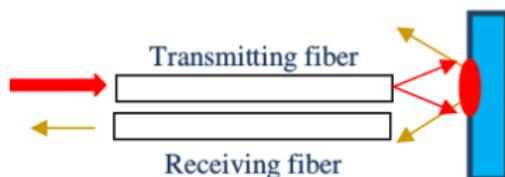


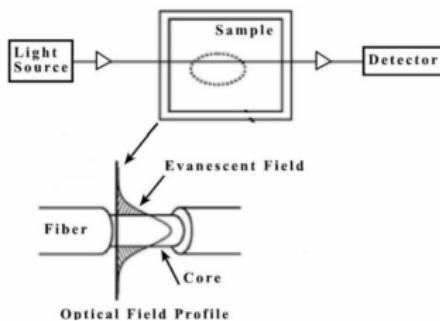
Figura 2.4 Sensores semi activos

Sensor de fibra para medida de desplazamientos y sensor semiactivo químico.



Amplitud

- Mediciones radiométricas y fotométricas
- Sensores de fibra óptica
- Sensores de onda evanescente

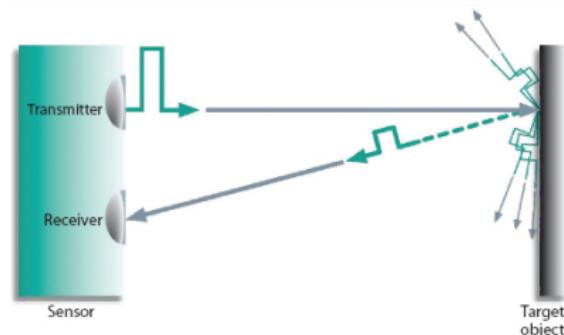


Sensor de onda evanescente.



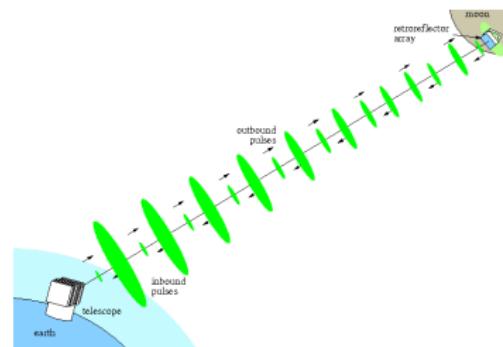
Velocidad de propagación

- Sensores por tiempo de vuelo
- Ejemplo: medida precisa de la distancia tierra-luna
- LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging)



Velocidad de propagación

- Sensores por tiempo de vuelo
- Ejemplo: medida precisa de la distancia tierra-luna
- LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging)

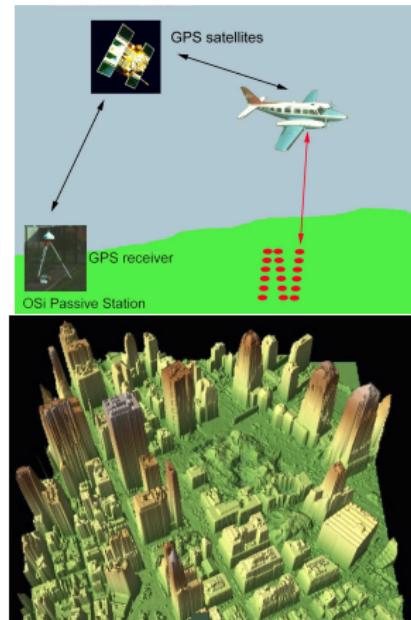


Distancia Tierra-Luna: $384402000,4902 \pm 0.00018$ m aumentando 4 cm/año.



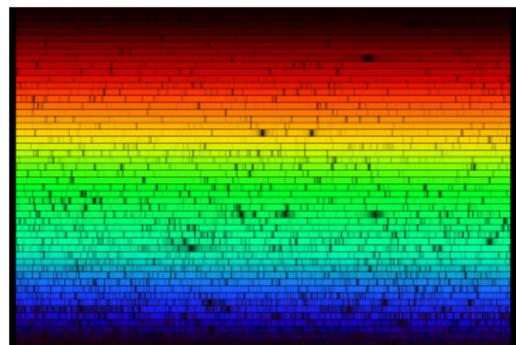
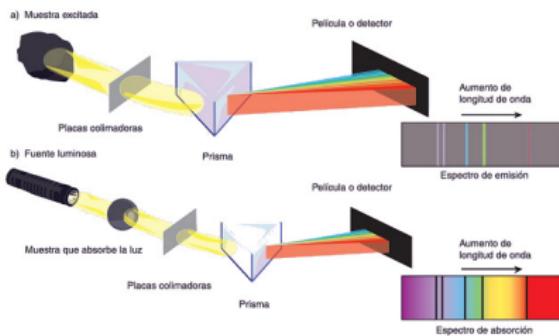
Velocidad de propagación

- Sensores por tiempo de vuelo
- Ejemplo: medida precisa de la distancia tierra-luna
- LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging)



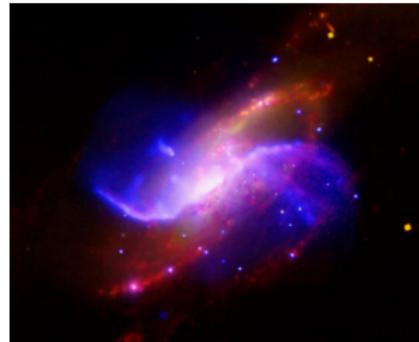
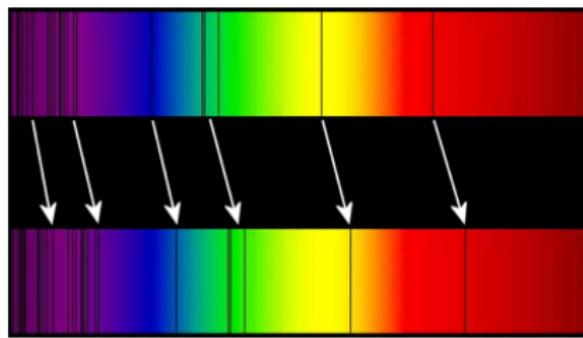
Frecuencia

- Espectroscopía
- Efecto Doppler



Frecuencia

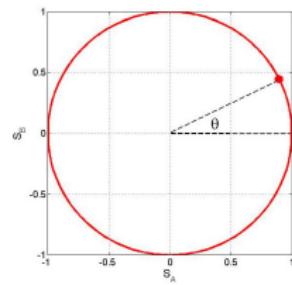
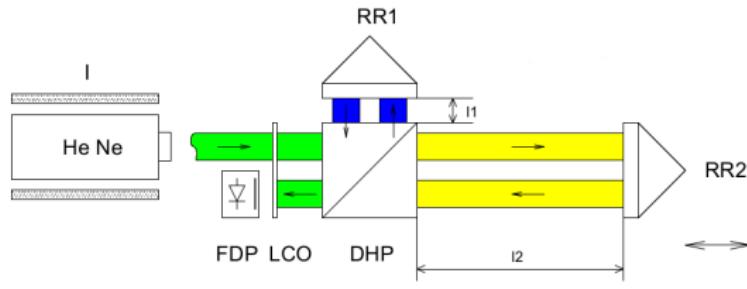
- Espectroscopía
- Efecto Doppler



Fase

Fase: $\phi = k_0 nh$

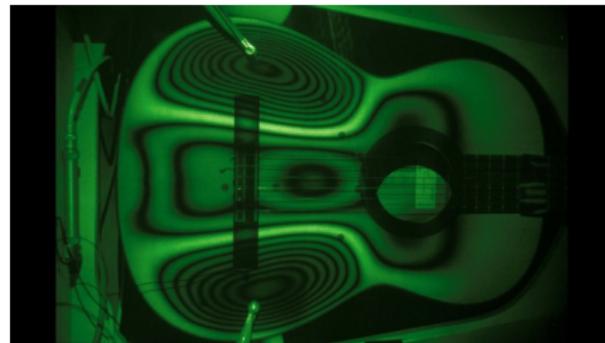
- Interferometria: Distancias, Espesores, índices de refracción
- Interferometría Holográfica
- Difractometria: Tamaño de objetos pequeños



Fase

Fase: $\phi = k_0 nh$

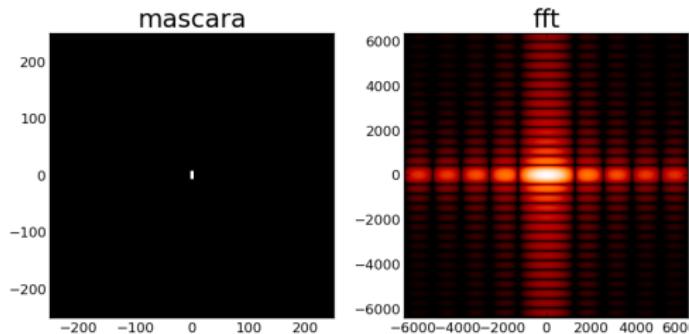
- Interferometria: Distancias, Espesores, índices de refracción
- Interferometría Holográfica
- Difractometria: Tamaño de objetos pequeños



Fase

Fase: $\phi = k_0 nh$

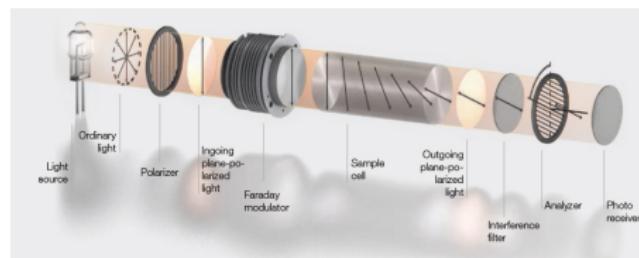
- Interferometria: Distancias, Espesores, índices de refracción
- Interferometría Holográfica
- Difractometria: Tamaño de objetos pequeños



Estado de polarización

Cambio de estado de polarización entre el haz incidente y el de salida.

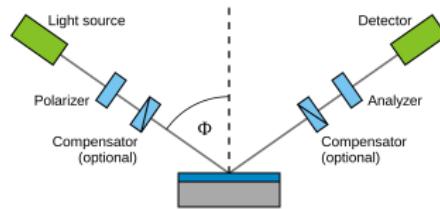
- Polarimetría
- Elipsometría
- Fotoelasticidad



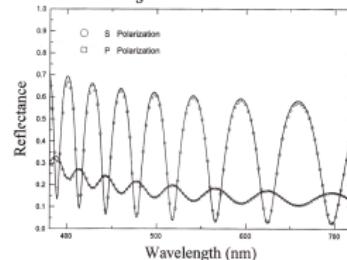
Estado de polarización

Cambio de estado de polarización entre el haz incidente y el de salida.

- Polarimetría
- Elipsometría
- Fotoelasticidad



$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan(\Psi)e^{i\Delta}$$



Estado de polarización

Cambio de estado de polarización entre el haz incidente y el de salida.

- Polarimetría
- Elipsometría
- Fotoelasticidad



MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN

sanchezbrea@fis.ucm.es



Referencias

- Berkovic, G. and Shafir, E. (2012). *Optical methods for distance and displacement measurements*. *Advances in Optics and Photonics*, 4(4):441–471.
- Gasvik, K. (2002). *Optical Metrology*. John Wiley & Sons.
- Harding, K. (2013). *Handbook Of Optical Dimensional Metrology*. CRC Press.
- Huang, W., Li, X., and Zhang, G. (2008). *Handbook of Optical Metrology*. Taylor and Francis.
- Malacara, D. (2001). *Handbook Of Optical Engineering* CRC Press.
- Moreno A. and Campos J. (2007) Revisión de diferentes técnicas de metroología óptica. *Óptica Pura y Aplicada* 40 (3) 267-280.
- Osten, W. and Reingand, N. (2012). *Optical Imaging And Metrology*. John Wiley & Sons.
- Sirohi, R. (2009). *Optical methods of measurement. wholefield techniques*. CRC.
- Yoshizawa, T. (2009). *Handbook of optical metrology. Principles and applications*. CRC.

