

# Metrologías basadas en las propiedades de la luz

## 6º seminario intercongresos metrología 2015: Tecnologías ópticas en la metrología

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



AÑO INTERNACIONAL  
DE LA LUZ  
2015

- 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



AÑO INTERNACIONAL  
DE LA LUZ  
2015

- 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



AÑO INTERNACIONAL  
DE LA LUZ  
2015

- 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.



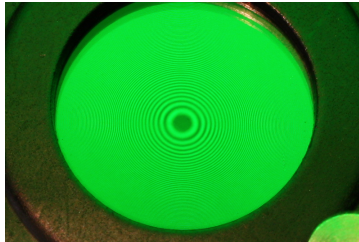
# Modelos de la luz

- 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

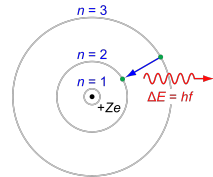
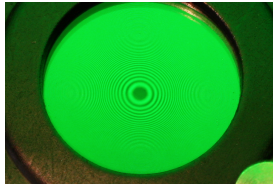






# Modelos de la luz

- Modelo **geométrico**: Luz como rayo  $\rightarrow$  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



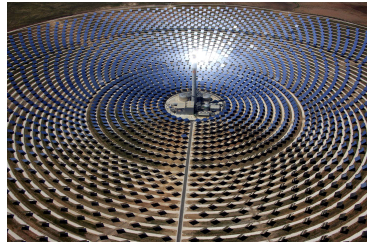
# Propiedades de la luz

- 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





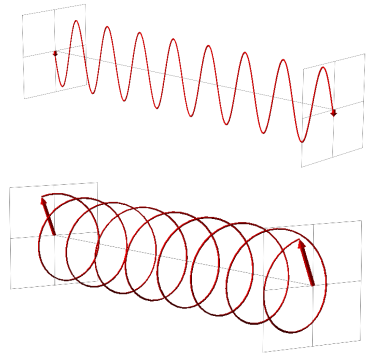
# Propiedades de la luz

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



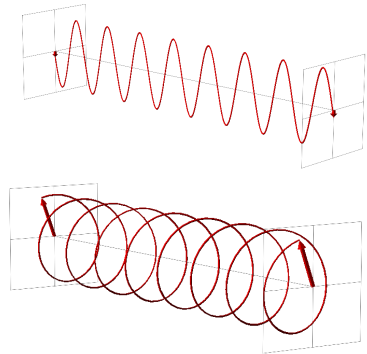
# Propiedades de la luz

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





# 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

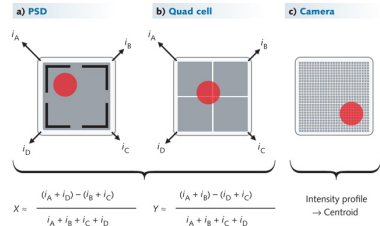
Los modelos no se adaptan de forma exacta a la realidad: incertidumbres



# 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 metrología 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 metrología 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 metrología 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 metrología 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 metrología 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.

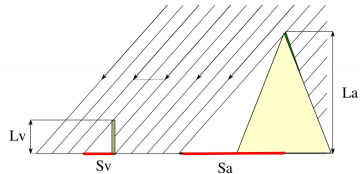




# Dirección de la propagación I

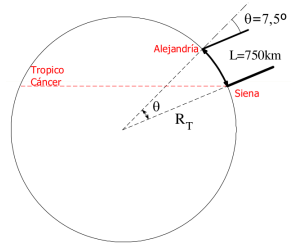
Con el simple hecho de asumir la propagación rectilínea de la luz, ésta se puede utilizar como un elemento metrológico de primer orden:

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



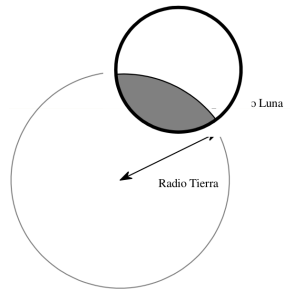
Con el simple hecho de asumir la propagación rectilínea de la luz, ésta se puede utilizar como un elemento metrológico de primer orden:

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



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



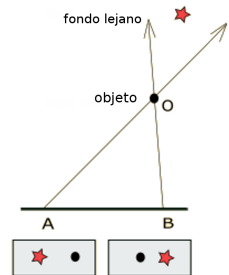
Con el simple hecho de asumir la propagación rectilínea de la luz, ésta se puede utilizar como un elemento metrológico de primer orden:

-

# 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.

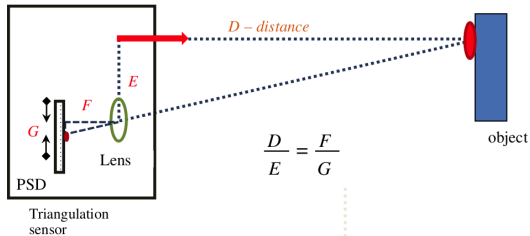


Proyector de perfiles



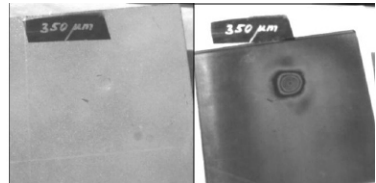
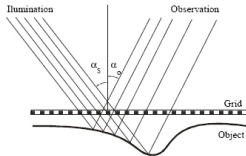
## Dirección de la propagación III

### Laser rangefinders



## Dirección de la propagación IV

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



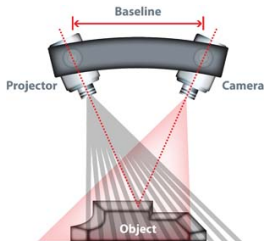
Shadow moire para detección de defectos





## Dirección de la propagación IV

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

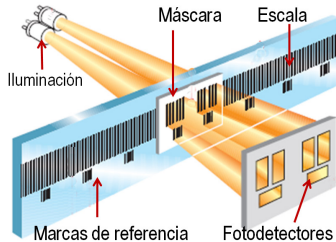


Proyección de franjas y reconstrucción 3D

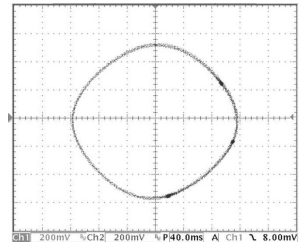


## Dirección de la propagación IV

- 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

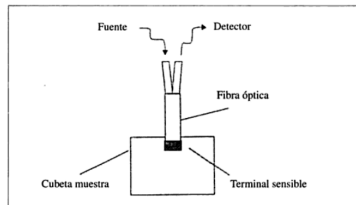
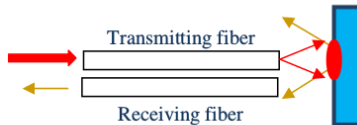


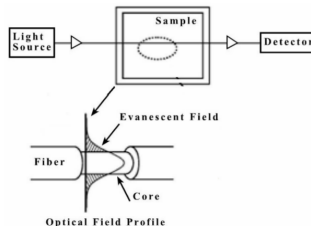
Figura 2.4 Sensores semi activos

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



# Amplitud

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

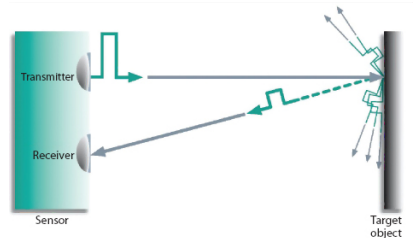


Sensor de onda evanescente.

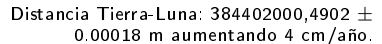


# Velocidad de propagación

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

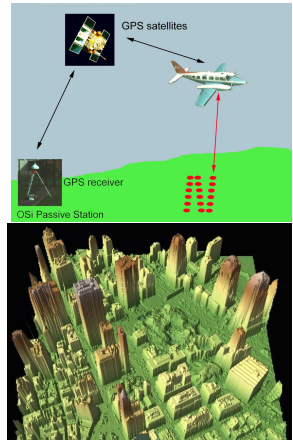


- Sensores por tiempo de vuelo
- Ejemplo: medida precisa de la distancia tierra-luna
- LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging)



# Velocidad de propagación

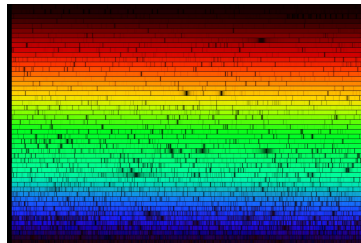
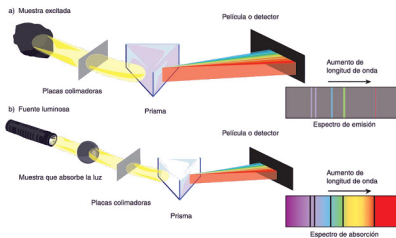
- Sensores por tiempo de vuelo
- Ejemplo: medida precisa de la distancia tierra-luna
- LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging)





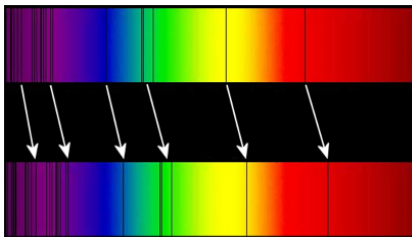
# Frecuencia

- Espectroscopía
- Efecto Doppler



# Frecuencia

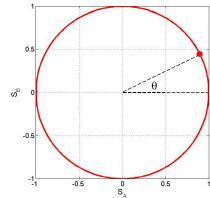
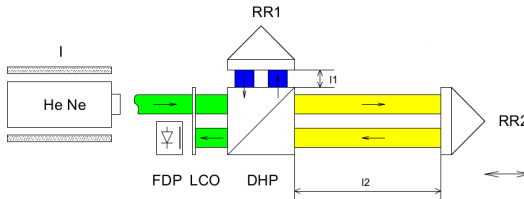
- Espectroscopía
- Efecto Doppler



# Fase

Fase:  $\phi = k_0 n h$

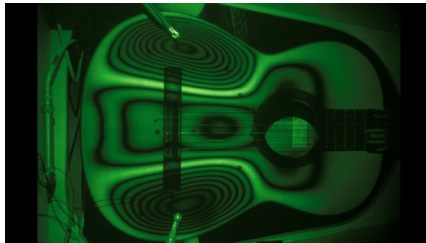
- Interferometría: Distancias, Espesores, índices de refracción
- Interferometría Holográfica
- Difractometría: Tamaño de objetos pequeños



# Fase

Fase:  $\phi = k_0 n h$

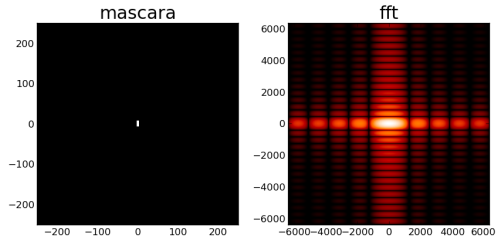
- Interferometría: Distancias, Espesores, índices de refracción
- Interferometría Holográfica
- Difractometría: Tamaño de objetos pequeños



# Fase

Fase:  $\phi = k_0 n h$

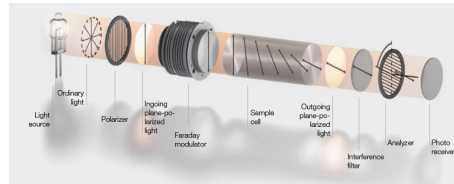
- Interferometría: Distancias, Espesores, índices de refracción
- Interferometría Holográfica
- Difractometría: Tamaño de objetos pequeños



# Estado de polarización

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

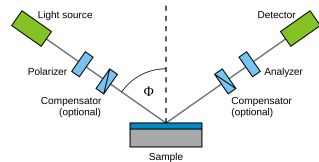
- Polarimetría
- Elipsometría
- Fotoelasticidad



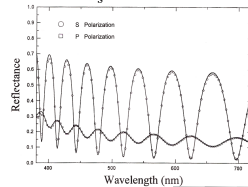
# Estado de polarización

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](mailto: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 metrología 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.*

