

¿Qué Física usa la Teledetección?

DRP

DFMF – UNED

26 de Octubre 2007

- Electromagnetismo
 - ▶ ondas electromagnéticas
- Electrónica
 - ▶ electrones y fotones
- Óptica
 - ▶ reflexión, refracción, transmisión, absorción y dispersión

- Espectro
 - ▶ bandas, radiancia
- Detectores
 - ▶ detectores, espectrorradiómetros
- Firma espectral
 - ▶ transmisividad atmosférica, absorción molecular, dispersión en materiales

- Espectro
 - ▶ bandas, radiancia
- Detectores
 - ▶ detectores, espectrorradiómetros
- Firma espectral
 - ▶ transmisividad atmosférica, absorción molecular, dispersión en materiales

Cuidado

Mucho más complicado que lo que se cuenta. . .
. . . pero lo que se cuenta basta para empezar!

Ondas electromagnéticas

Campo electromagnético

- **Campo eléctrico**
 - ▶ creado por cargas
(las cargas se conservan)
- **Campo magnético**
 - ▶ creado por corrientes
(las corrientes no se conservan)
- **Campo eléctrico inducido**
 - ▶ creado por campos magnéticos variables
(\sim corrientes cambiantes)
- **Campo magnético inducido**
 - ▶ creado por campos eléctricos variables
(\sim cargas cambiantes)

Ondas electromagnéticas

Campo electromagnético

● Campo eléctrico

- ▶ creado por cargas
(las cargas se conservan)

● Campo magnético

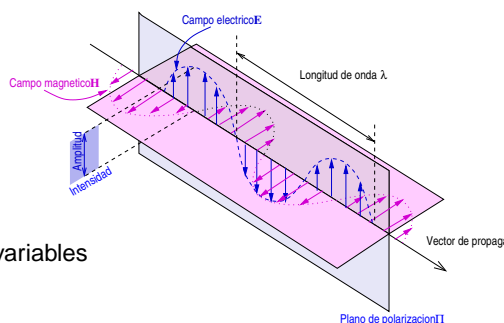
- ▶ creado por corrientes
(las corrientes no se conservan)

● Campo eléctrico inducido

- ▶ creado por campos magnéticos variables
(\sim corrientes cambiantes)

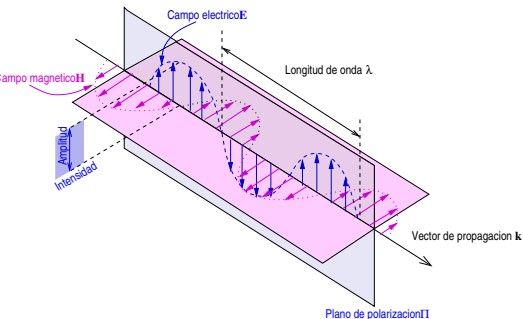
● Campo magnético inducido

- ▶ creado por campos eléctricos variables
(\sim cargas cambiantes)



Ondas electromagnéticas

Campo electromagnético



- **Campo eléctrico**

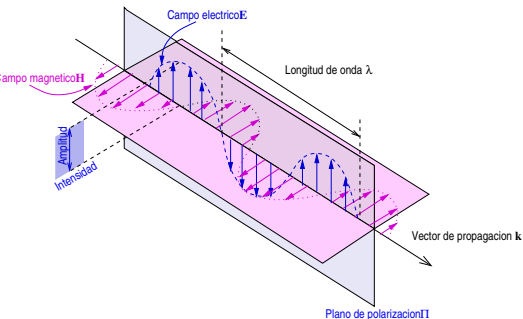
- ▶ cambios en la materia: moléculas, átomos y electrones

- **Campo magnético inducido**

- ▶ **VARIABLE:** percibido por las antenas

Ondas electromagnéticas

Campo electromagnético



- **Campo eléctrico**

- ▶ cambios en la materia: moléculas, átomos y electrones

- **Campo magnético inducido**

- ▶ VARIABLE: percibido por las antenas

- **Campo electromagnético**

- ▶ longitud de onda vs. frecuencia: $\lambda\nu = c$
- ▶ amplitud vs. intensidad: $I \propto E_0^2$
- ▶ vectores de propagación k y polarización \hat{e}

- Descomposición frecuencial del campo

- ▶ cualquier señal se puede expresar como suma de señales con frecuencias dadas

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \sum_{\nu} \mathbf{E}_{\nu}(\mathbf{x}) \cos(2\pi\nu t + \phi_{\nu})$$

- ★ Teorema de Fourier

- ▶ la energía total es suma de las energías de las distintas frecuencias

$$I(\mathbf{x}) = \sum_{\nu} I_{\nu}(\mathbf{x})$$

- ▶ Espectro:

- ★ reparto de energías por frecuencias
- ★ reparto de energías por longitudes de onda

$$\lambda = c/\nu$$

Ondas electromagnéticas

Espectro electromagnético

- Rangos de frecuencias

- ▶ frecuencias bajas
 - ★ microondas, ondas de radio
- ▶ frecuencias medias
 - ★ infrarrojo, luz visible
- ▶ frecuencias altas
 - ★ ultravioleta
- ▶ frecuencias muy altas
 - ★ rayos X, rayos γ

- Frecuencias usadas en Teledetección

- ▶ visible
- ▶ infrarrojo cercano (NIR)
- ▶ infrarrojo medio (SWIR)
- ▶ infrarrojo lejano/térmico (TIR)
- ▶ ...
- ▶ Microondas (RADAR)

Ondas electromagnéticas

Espectro electromagnético

- Rangos de frecuencias

¿Longitud de onda o frecuencia?

- Las radiaciones de frecuencias medias y altas, se describen dando su longitud de onda. Esto es así, porque se analizan con rejillas de difracción, que separan las longitudes de onda.
- Las radiaciones de frecuencias bajas, se analizan mediante circuitos electrónicos, por lo que se describen bien con las frecuencias de oscilación de éstos.

▶ frecuencias muy altas

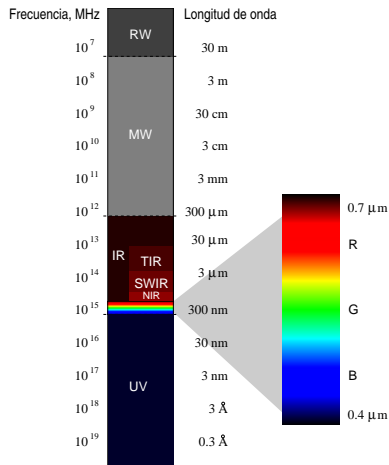
★ rayos X, rayos γ

▶ Microondas (RADAR)

Ondas electromagnéticas

Espectro usado en Teledetección

- visible
 - ▶ infrarrojo cercano (NIR)
 - ▶ infrarrojo medio (SWIR)
 - ▶ infrarrojo lejano/térmico (TIR)
 - ▶ ...
- Microondas (RADAR)

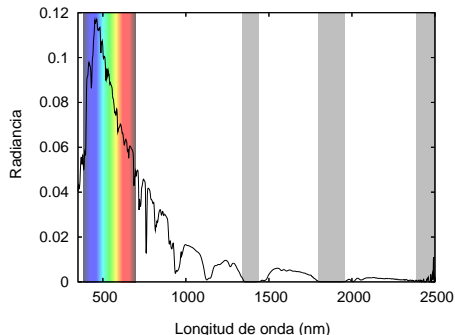


Ondas electromagnéticas

Espectro electromagnético del sol

- Espectro solar:
 - ▶ espectro de cuerpo negro $T \simeq 6000$ K
 - ▶ espectro de absorción
 - ★ atmósfera solar: líneas
 - ★ atmósfera terrestre: bandas

- Ventanas atmosféricas



Fotones y electrones

Teoría cuántica

- Cuantización de la energía

$$\varepsilon_\nu = h\nu$$

- Cuantización de la materia

$$\lambda_{dB} = h/mv$$

- Probabilidades de transición

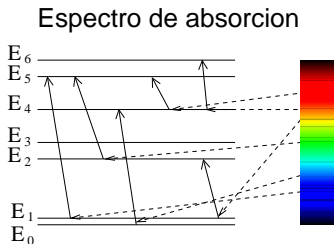
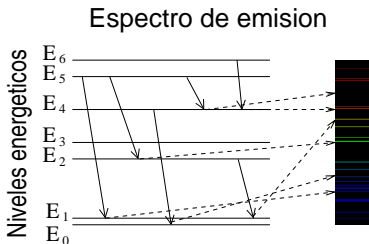
$$w(1 \rightarrow 2) = \frac{\lambda \Gamma_{12}^2 w_0}{(h\nu - \Delta E_{12})^2 + \frac{1}{4} \Gamma_{12}^2}$$

- Espectro de emisión/absorción

$$\nu = \frac{E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}}}{h} \leftrightarrow \lambda = \frac{hc}{E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}}}$$

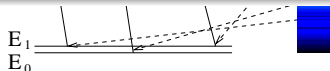
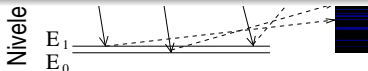
Fotones y electrones

Teoría cuántica



Espectros de emisión y absorción

- Espectro “blanco”: igual energía para todas las frecuencias
- Espectro de emisión: la energía sólo en ciertas frecuencias y no en el resto de ellas
- Espectro de absorción: la energía desviada de ciertas frecuencias, no llega al observador



Espectros de emisión y absorción

- Espectro “blanco”: igual energía para todas las frecuencias
- Espectro de emisión: la energía sólo en ciertas frecuencias y no en el resto de ellas
- Espectro de absorción: la energía desviada de ciertas frecuencias, no llega al observador



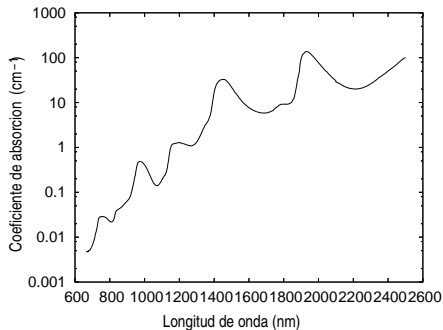
absorcion+emision=blanco

Las frecuencias que faltan en el espectro de absorción son las que aparecen en el espectro de emisión de la sustancia correspondiente

Espectros

Atómicos y moleculares

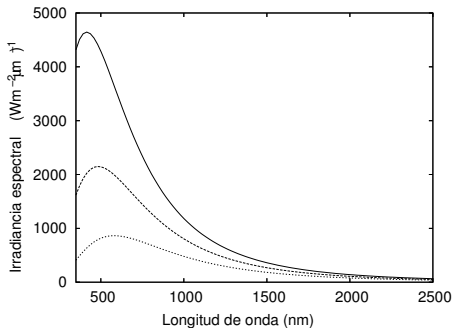
- Característico (¿único?) de cada sustancia
 - ▶ átomos → líneas
 - ▶ moléculas → bandas
- Bandas de absorción
 - ▶ análisis químico



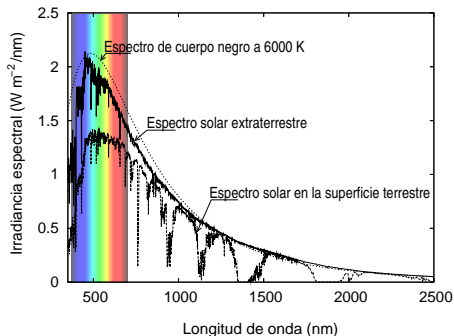
- Espectro de cuerpo negro

$$W = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda k_B T) - 1}$$

- ▶ $W = \sigma T^4$, $\sigma = 5,7 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$
- ▶ $\lambda T = 2898 \mu\text{m K}$



- Espectro continuo
 - ▶ cuerpo negro
- Espectro solar (extraterrestre)
 - ▶ cuerpo negro - absorción elementos
- Luz solar en superficie
 - ▶ cuerpo negro - absorción atmosférica



Detectores

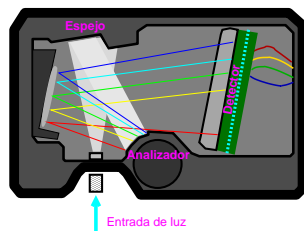
Espectrorradiómetros

- Analizador

- ▶ descomposición de la luz en longitudes de onda
- ▶ prisma
- ▶ rejilla de difracción

- Detectores de luz

- ▶ CCD
- ▶ “CCD por nanómetro”



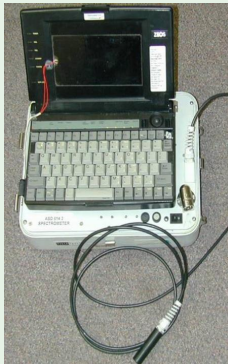
Detectores

Espectrorradiómetros

- Analizador

Hardware+software

Espectrorradiómetro: fibra óptica+analizador+detector+ordenador



Energía en una superficie

Balance: saliente, entrante

- Energía total
 - ▶ potencia radiada (W)
 - ▶ flujo saliente, Φ_E
 - Energía emitida por unidad de superficie
 - ▶ densidad de flujo radiante, $j_E(x, y)$ (W/m^2)
 - Emitancia, $E(x, y)$ (W/m^2)
- Energía total
 - ▶ potencia absorbida (W)
 - ▶ flujo incidente, Φ_I
 - Energía absorbida por unidad de superficie
 - ▶ densidad de flujo radiante, $j_I(x, y)$ (W/m^2)
 - Irradiancia, $M(x, y)$ (W/m^2)

Energía en una superficie

Balance: saliente, entrante

- Energía total
 - ▶ potencia radiada (W)
 - ▶ flujo saliente, Φ_E
 - Energía emitida por unidad de superficie
 - ▶ densidad de flujo radiante, $j_E(x, y)$ (W/m^2)
 - Emitancia, $E(x, y)$ (W/m^2)
- Energía total
 - ▶ potencia absorbida (W)
 - ▶ flujo incidente, Φ_I
 - Energía absorbida por unidad de superficie
 - ▶ densidad de flujo radiante, $j_I(x, y)$ (W/m^2)
 - Irradiancia, $M(x, y)$ (W/m^2)

...Espectrales

Las magnitudes radiométricas espectrales se refieren a la energía que se transporta en las distintas longitudes de onda.

Energía sobre una superficie

Dirección de procedencia

- Radiancia, $L(x, y; \theta, \varphi)$

$$L(x, y; \theta, \varphi) dS(x, y) d\Omega(\theta, \varphi) = \frac{d^2\Phi_I}{dSd\Omega} dS(x, y) d\Omega(\theta, \varphi)$$

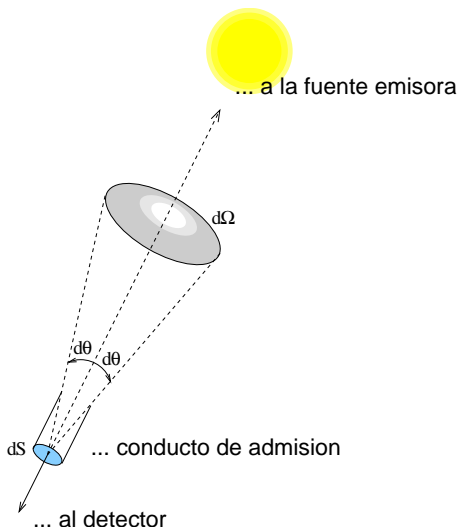
- Radiancia espectral, $L(x, y; \theta, \varphi; \lambda)$

$$L(x, y; \theta, \varphi; \lambda) dS(x, y) d\Omega(\theta, \varphi) d\lambda = \frac{d^2\Phi_I(\lambda)}{dSd\Omega d\lambda} dS(x, y) d\Omega(\theta, \varphi) d\lambda$$

Energía sobre una superficie

Dirección de procedencia

Radiancia, $L(x, y; \theta, \varphi)$



Balance energético

Conservación de la energía

$$\Phi_I = \Phi_r + \Phi_d + \Phi_a + \Phi_t$$

Referido a la energía incidente:

$$1 = \underbrace{\rho_s + \rho_d}_{\rho} + \alpha + \tau$$

- ρ : reflectividad
 - ▶ ρ_s : reflectividad superficial
 - ▶ ρ_d : reflectividad interna
- α : absorptividad
- τ : transmisividad

Balance energético

Conservación de la energía

...-ividad

El sufijo -ividad indica que se trata de magnitudes relativas.

$$1 = \underbrace{\rho_s + \rho_d}_{\rho} + \alpha + \tau$$

• ρ : reflectividad

▶ ρ_d : reflectividad interna

• α : absorptividad

• τ : transmisividad

Balance energético

Conservación de la energía

- ρ : reflectividad

...-ividad

El sufijo -ividad indica que se trata de magnitudes relativas.

- ▶ ρ_d : reflectividad interna

...-ividad espectral

El flujo espectral no se conserva, en general. Sin embargo...

- Se definen las ρ_λ , α_λ y τ_λ para estudiar el efecto de la materia sobre cada longitud de onda del espectro

Espectros de...

absorción, transmisión y reflexión

- Firmas espectrales = espectro de {absorción, transmisión, reflexión}
 - ▶ $\alpha(\lambda)$, $\tau(\lambda)$: experimentos de extinción
 - ★ campo: evaluación de aguas
 - ★ laboratorio: composición de disoluciones
 - ▶ $\rho(\lambda)$: observación de luz reflejada
 - ★ campo: [luz reflejada]/[luz incidente]
 - ★ teledetección: [luz reflejada]/[¿luz incidente?]
- Hipótesis: cada sustancia tiene una firma única
- Hipótesis: una firma caracteriza una sustancia

Espectros de...

absorción, transmisión y reflexión

- Firmas espectrales = espectro de {absorción, transmisión, reflexión}
 - ▶ $\alpha(\lambda)$, $\tau(\lambda)$: experimentos de extinción
 - ★ campo: evaluación de aguas
 - ★ laboratorio: composición de disoluciones
 - ▶ $\rho(\lambda)$: observación de luz reflejada
 - ★ campo: [luz reflejada]/[luz incidente]

Problema

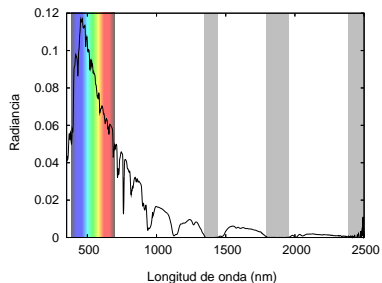
Mezclas de sustancias:

- ¿cómo separar/distinguir las firmas?
- “arte” de la espectroscopía

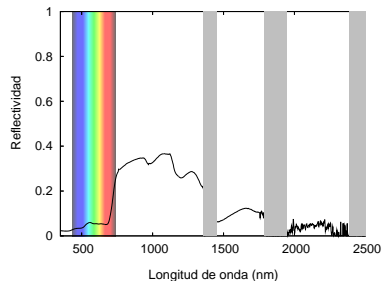
Bandas prohibidas

Bandas de absorción atmosférica

- Ozono
- Vapor de agua
- CO₂



Si $\Phi_I(\lambda) \simeq 0$, no se pueden calcular $\alpha(\lambda)$, $\tau(\lambda)$, $\rho(\lambda)$



Lectura de un espectro

Efectos de la estructura

- Efectos de la dispersión
- Magnificación por absorción-reflexión

Lectura de un espectro

Efectos de la estructura

- Efectos de la dispersión
- Magnificación por absorción-reflexión

¿Difracción?

La difracción en las estructuras de las cubiertas naturales ($> 10\mu\text{m}$) no es importante:

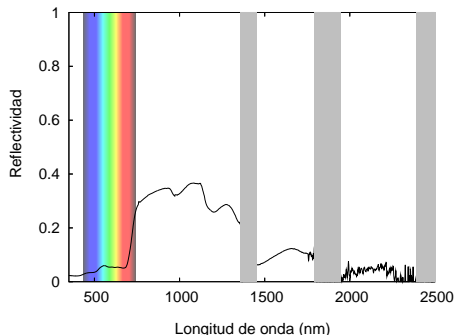
- La luz se propaga siguiendo rayos de la óptica geométrica.

Espectros prototipo

Vegetales

Características:

- absorción alta en el visible
 - ▶ clorofila: color de las hojas
- alta reflectividad en el NIR
 - ▶ dispersión en el mesófilo
 - ▶ valles de absorción de agua
- vigor vegetal / hoja seca.

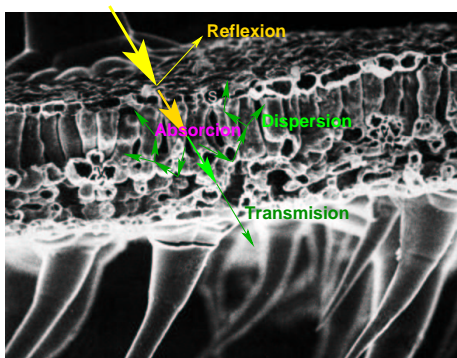


Espectros prototipo

Estructura de una hoja

Características:

- reflexión en la cutícula
- mesófilo en empalizada
 - ▶ absorción por cloroplastos
- mesófilo esponjoso
 - ▶ dispersión por huecos de aire
 - ▶ más cuantos más huecos
 - ▶ menos cuanto mayores huecos

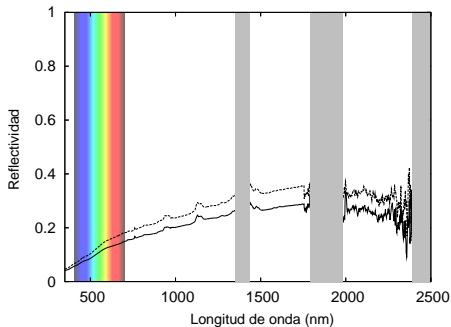


Espectros prototipo

Suelos

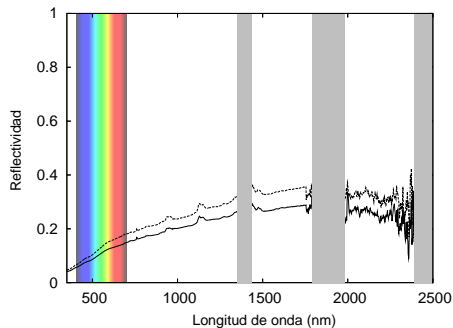
Características:

- baja reflectividad
 - ▶ absorción por minerales
- aumento continuo en NIR
 - ▶ reflexión difusa en superficie
 - ▶ valles de absorción de agua



Características:

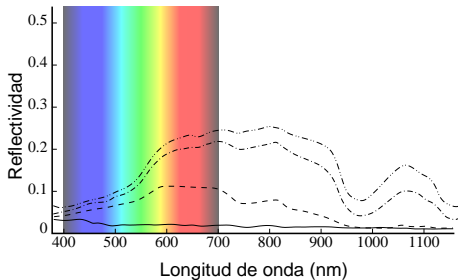
- disminución de reflectividad
 - ▶ contenido orgánico
 - ▶ humedad
- aumento de reflectividad
 - ▶ finura del grano
- valles de absorción de hierro
 - ▶ 900 nm



Espectros prototipo

Agua fluvial

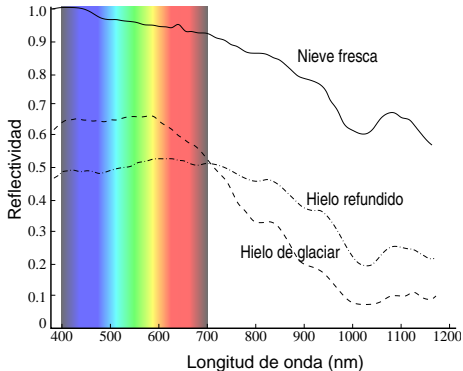
- Limpia
 - ▶ muy baja reflectividad (< 1%)
- Con partículas en suspensión
 - ▶ mayor concentración, mayor reflectividad
 - ▶ mayor concentración, mayores longitudes de onda



Espectros prototipo

Nieve y hielo

- Nieve
 - ▶ muy alta reflectividad ($\simeq 100\%$)
- Fusión / compactación
 - ▶ disminuye la reflectividad



Resumen

... lo que tiene que quedar

- espectro electromagnético
 - ▶ diferentes energías a diferentes longitudes de onda
 - ▶ cambios de energía electrónicos
- absorción atmosférica por moléculas de gas
 - ▶ ventanas atmosféricas
- absorción en las cubiertas
 - ▶ composición: mínimos de reflectancia
- reflexiones en las cubiertas
 - ▶ estructura porosa o de capas: mayor reflectividad
- discriminación de firmas espectrales por cubiertas