

## 01.LA LUCE: CENNI STORICI – FONDAMENTI DI RADIOMETRIA E INTRODUZIONE ALLA FOTOMETRIA

Nel 1700 Newton asseriva la teoria corpuscolare della luce (la luce è composta da miriadi di particelle microscopiche) mentre Huygens negli stessi anni sosteneva che la luce avesse una natura ondulatoria (la luce è un'onda che si propaga nell'etere, ovvero una vibrazione come il suono nell'aria). Dal '700 sino a quasi la metà dell'800 la teoria più accettata era quella di Newton, in quanto era un uomo molto più potente e influente dello scienziato olandese Huygens. All'inizio del 1800 gli esperimenti di Young sembrano confermare la teoria ondulatoria della luce. Nel 1887 Michelson e Morley dimostrano che in realtà l'etere non esiste e che la luce ha una velocità costante rispetto al moto della terra da qualsiasi direzione provenga. Quindi non può essere una vibrazione dell'etere.

Rispetto alla **teoria ondulatoria** della luce dobbiamo distinguere due grandezze fondamentali: l'ampiezza (la differenza di livello tra picchi e valli) e la lunghezza d'onda (la distanza tra due picchi successivi). La velocità della luce è costante ed è 300.000 km/s. Nota la velocità di un'onda, la frequenza è determinata dal rapporto tra la velocità e la lunghezza d'onda.

Nel 1850 Faraday ipotizza che la luce sia un'onda elettromagnetica. Nel 1864 Maxwell descrive con le sue equazioni differenziali il comportamento delle onde elettromagnetiche.

Il grafico rappresenta due onde, una riferita al campo elettrico e l'altra riferita al campo magnetico, che si muovono perpendicolarmente tra loro vibrando mentre avanzano nel tempo e nello spazio. Differentemente da un'onda acustica che vibra avanti e indietro nell'aria, l'onda elettromagnetica oscilla perpendicolarmente alla direzione di propagazione; ciò introduce il tema della polarizzazione.

- Campo elettrico: avvicinando ad un foglio di carta una penna bic precedentemente strofinata su un maglione di lana il foglio di carta si alza perché la penna si è caricata di cariche elettriche e quindi c'è un'attrazione elettrica. Il campo elettrico è anche quello che concerne i cavi dell'elettricità o la scarica di un fulmine.
- Campo magnetico: è quello della calamita.

**POLARIZZAZIONE** → Rappresentando solo il campo elettrico, un'onda di questo tipo viene detta onda piana perché mentre avanza nel tempo e nello spazio vibra in su e in giù rimanendo sempre su un piano. A questo punto può essere polarizzata in verticale se il piano è verticale, o in orizzontale se il piano è orizzontale, oppure può avere polarizzazione sia orizzontale che verticale se è la somma di due onde.

**Filtraggio** → Esistono dei filtri inventati dalla Polaroid che hanno la caratteristica di far passare solo l'onda che ha una polarizzazione piana; quindi se questi filtri li metto uno davanti all'altro e li vado ad esempio a ruotare in maniera opportuna la luce non passa dall'altra parte: sono filtri che diminuiscono la quantità di luce ma non attenuandola come fanno i normali occhiali da sole ma come fanno gli occhiali da sole che hanno lenti polarizzate.

Ci possono essere anche onde che mentre avanzano nel tempo e nello spazio non si limitano a oscillare su e in giù, ma mentre aumentano e diminuiscono di valore incominciano anche a ruotare rispetto all'asse di propagazione. Si parla di polarizzazione circolare.

**Polarizzazione esperimento fisico:** Un filtro polarizzante ha la proprietà di far passare la radiazione di un raggio luminoso che lo attraversa solo alle onde orientate in una direzione. Ponendo due filtri polarizzanti interposti tra l'osservatore e una fonte luminosa si crea una doppia barriera alle radiazioni luminose. Quando uno dei due viene ruotato di 90° rispetto all'altro le radiazioni vengono bloccate completamente.

La luce come viene generata dalle lampade non è mai luce polarizzata, è luce non polarizzata, cioè un'onda che mentre avanza nello spazio nel vibrare tra un istante e l'istante successivo ha una direzione casuale.

Come le onde del mare anche la luce non polarizzata non è composta da una sola onda ma dalla somma di onde di ampiezze e frequenze differenti (somma di onde monocromatiche). Un'onda monocromatica è una radiazione composta da una sola onda di ampiezza e frequenza fissa. Lo spettro descrive le ampiezze delle onde monocromatiche di differenti frequenze che compongono una radiazione. Fanno eccezione i laser che sono delle onde monocromatiche polarizzate.

**DISTRIBUZIONE DI POTENZA SPETTRALE** → In presenza di una qualsiasi radiazione non monocromatica e che quindi è data dalla somma di tante onde di ampiezze e frequenze differenti, occorre un metodo per conoscere il contenuto di questa radiazione luminosa. Questa informazione viene chiamata distribuzione di potenza spettrale o spettro. Lo spettro (SPD spectral power distribution) rappresenta le ampiezze e le

lunghezze d'onda delle onde monocromatiche che sono contenute in una radiazione. Il grafico (Slide 5) mostra la distribuzione di potenza spettrale della luce del giorno, cioè della somma tra luce solare e luce del cielo.

In funzione di tante lunghezze d'onda monocromatiche diverse la luce naturale è composta di tante onde diverse di lunghezza d'onda e colore diverso, perché la lunghezza d'onda è ciò che determina il colore. La lunghezza d'onda è espressa in nanometri (nm) per cui è una grandezza piccolissima, però la luce si muove talmente veloce (300.000 km/s) che in realtà queste onde hanno la loro dimensione nello spazio. Il fatto che siano contenuti tanti colori diversi è la ragione per cui noi questa luce la vediamo bianca, poiché contiene tutti i colori (il bianco è la somma di tutti i colori).

La distribuzione spettrale descrive le ampiezze delle onde monocromatiche di differenti frequenze che compongono una radiazione.

Lo spettro di questa radiazione data dalla somma di onde monocromatiche è un grafico in cui sulle ascisse sono riportate le lunghezze d'onda delle onde monocromatiche che compongono la radiazione e sulle ordinate le relative ampiezze. La curva risultante è la rappresentazione spettrale di questa radiazione. Questa informazione non si troverà mai su qualsiasi catalogo di sorgente di luce mentre si troverà l'informazione del suo contenuto spettrale, perché questa si porta dietro due informazioni fondamentali che sono il colore (la forma dello spettro determina il colore della luce) e l'energia (quanta energia è associata a quella luce).

**LO SPETTRO ELETTROMAGNETICO** → Secondo la teoria dell'elettromagnetismo la luce è una radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda compresa tra 380-780 nm. Considerando le radiazioni elettromagnetiche al variare della lunghezza d'onda emerge che la luce visibile all'occhio umano è una piccolissima porzione: fino a 10 cm di lunghezza d'onda ci sono le onde radio, fino a 1 mm le microonde, sotto al mm abbiamo gli infrarossi (queste onde sono invisibili ma le cellule della nostra pelle sono in grado di percepire il calore degli infrarossi). La luce visibile è una piccolissima porzione dello spettro elettromagnetico di lunghezza d'onda compresa tra 380-780 nm, contenente tutti i colori nello stesso ordine in cui li trovo nell'arcobaleno (rosso, arancio, giallo, verde, ciano, blu, violetto). Prima del rosso ci sono gli infrarossi e dopo il viola gli ultravioletti. Procedendo ulteriormente ci sono i raggi X, i raggi gamma e i raggi cosmici. Caratteristica fondamentale delle radiazioni elettromagnetiche è che al diminuire della lunghezza d'onda, cioè all'aumentare della frequenza, queste radiazioni sono via via più dannose per gli organismi viventi (raggi UV e raggi X dannosi, raggi cosmici e raggi gamma sono mortali).

**Esempio:** La distribuzione spettrale della luce emessa da una lampada ad alogenuri metallici con un filtro anti UV (notare che in corrispondenza della zona dell'ultravioletto lo spettro decade). Il nostro sistema visivo la luce prodotta da una lampada di questo tipo la vede comunque bianca. Lo spettro ha un picco nella zona del verde e un altro picco nella zona dell'arancio-ambra.

Alla fine dell'Ottocento tutta la fisica classica viene messa in discussione da vari studiosi il cui capostipite più noto è Einstein. Vari esperimenti (Kirchoff, Rayleigh, Wien, Planck e poi Einstein) nella seconda metà del 1800 e all'inizio del 1900 mostrano che considerare la luce come un'onda e.m. non spiegava alcuni fenomeni. In alcuni casi infatti la luce presenta un comportamento corpuscolare. Heisenberg e Schrodinger (1920) pongono le basi della fisica quantistica per la definizione dei quanti di luce (basata sulla definizione delle probabilità). Si osservano due fenomeni:

**1.** Se mentre mi muovo alla velocità di 5 km/h misuro rispetto a me la velocità con cui mi viene incontro un'altra persona che si muove a sua volta a 5 km/h, mi risulterà che si muove a 10 km/h. Se invece mi fermo noto che si muove rispetto alla terra alla velocità di 5 km/h. Se applico lo stesso ragionamento alla luce noteremo che questo non è valido perché la luce comunque la si osservi si muove sempre a 300.000 km/s, non varia la sua velocità in funzione di come mi muovo perché ha una velocità che è costante. **2.** Grazie all'invenzione di particolari telescopi si nota anche che quando la luce passa vicino a delle masse molto grandi come giganti rosse, essa viene deviata.

Queste due osservazioni aprono alla definizione della natura ondulatoria e corpuscolare della luce, che risulta essere sia un'onda sia un corpuscolo, ovvero un fotone, un quanto di luce.

**LA LUCE E LA MATERIA: RADIOMETRIA** → Ai fini dello studio dell'interazione con la materia si considera la luce come una radiazione e.m. Lo studio delle radiazioni e.m. è oggetto della radiometria che studia il trasferimento di energia radiante tramite un insieme di grandezze fisiche scalari (cioè non vettoriali). Queste grandezze sono funzioni della lunghezza d'onda (ovvero distribuzioni spettrali).

Un raggio di luce è definito da 3 vettori: un vettore che determina la direzione di propagazione, un vettore che determina il campo elettrico e un vettore che determina il campo magnetico. Per definire un vettore ci vogliono 3 valori. Questo significa che ogni singolo raggio di luce per essere definito in modalità vettoriale richiederebbe 9 numeri.

In radiometria la situazione è più semplice e si usa la nomenclatura (cioè il nome della grandezza) per distinguere il fatto che quella radiazione abbia a che fare con i 3 elementi fondamentali che entrano in gioco nella progettazione: le sorgenti, le superfici, il ricevitore (ci sarà una grandezza che identifica come arrivano le radiazioni all'essere umano).

Quando una luce colpisce una superficie sostanzialmente possono accadere tre cose:

1. La luce viene assorbita (trasformata in un'altra forma di energia: es. calore)
2. Riflessa (diffusamente e/o specularmente)
3. Trasmessa (diffusamente e/o specularmente) → La trasmissione speculare è detta rifrazione ed è governata dalla legge di Snell: quando la luce passa da un mezzo meno denso ad uno più denso ( $n_1 < n_2$ ) la luce viene deviata. La relazione tra l'angolo formato tra il raggio incidente e la normale alla superficie e l'angolo formato tra la normale e il raggio deviato è governata dalla legge di Snell.

Questa legge vale anche al contrario ma si pone un problema: la luce che proviene da un mezzo più denso ad uno meno denso con direzione quasi parallela alla superficie viene riflessa verso l'interno. Questo fenomeno si chiama Total Internal Reflection (TIR), riflessione interna totale (fibre ottiche: Tra i sistemi di illuminazione basati sulle fibre ottiche vi sono quelli di illuminazione museali, per questioni di sensibilità del materiale quindi di conservazione. Dal sistema di illuminazione esce un fascio di fibre ottiche che finisce ad esempio nella teca che contiene di Codice Atlantico portandovi esclusivamente luce, senza calore né ultravioletti e nella quantità minima necessaria a farlo vedere). Questo fenomeno si verifica anche quando in piscina si è immersi sotto il pelo dell'acqua e si può osservare riflesso il fondo della piscina.

**LA DISPERSIONE** → In realtà l'indice di rifrazione non è un numero, non è una costante, ma anch'esso è una sorta di spettro, cioè una funzione della lunghezza d'onda. Di ciò se ne accorse per primo Newton che fece arrivare un raggio di luce bianca su un prisma di cristallo scoprendo che già all'interno del cristallo il raggio si separava in tanti raggi di luce colorata. Onde di lunghezza differente hanno un angolo di rifrazione diverso nello stesso mezzo (arcobaleno). Questo fece pensare a Newton che il cristallo separava particelle di dimensioni diverse che avevano colore diverso; in realtà queste sono lunghezze d'onda diverse.

Osservando l'indice di rifrazione dei vetri più economici vedo che è un numero che varia in funzione della lunghezza d'onda, sebbene di poco. Ma se osservo l'indice di rifrazione del vetro flint, cioè un cristallo come quello del prisma di Newton, vedo che varia molto: tutti gli elementi dello spettro della luce bianca (composta di tante onde monocromatiche) vengono divisi, perché deviati in funzione della legge di Snell con un angolo diverso.

**L'ANGOLO SOLIDO DI PROIEZIONE** → L'angolo solido (estensione alla terza dimensione dell'angolo piano) è una regione conica di spazio definita dal rapporto tra l'area della superficie racchiusa sulla sfera ed il raggio elevato al quadrato della sfera stessa. Si misura in steradiani [sr]. L'angolo solido che sottende tutto lo spazio attorno ad un punto vale  $4\pi$  sr. Ad uno stesso angolo solido possono corrispondere infinite forme.

**GRANDEZZE RADIOMETRICHE** →

L'**energia radiante** associata ad una radiazione elettromagnetica si misura in Joule. (il fatto che ci sia  $\lambda$  tra parentesi significa che è uno spettro, cioè un'informazione cromatica associata).

1. Flusso radiante e intensità radiante riguardano il primo elemento del progetto, cioè le sorgenti.

• Il **flusso radiante** è la variazione dell'energia nell'unità di tempo. Ad esempio può indicare quanta energia esce da una sorgente nell'unità di tempo. Si misura in Watt perché è una potenza (questi Watt non hanno nulla a che vedere con quelli degli elettrodomestici poiché quella è potenza elettrica, questi Watt sono potenza radiante. La potenza esiste in tanti contesti diversi delle applicazioni umane. Ad esempio la potenza

del motore di un'automobile è espressa in KWatt. Anche nel caso di un flusso in un tubo l'acqua che fuoriesce avrà una sua potenza idrica misurata anch'essa in Watt).

- **L'intensità radiante** permette di associare il flusso a una precisa direzione [Watt/sr]. È utilizzata per descrivere la forma dell'energia che esce da una sorgente. In questi rapporti è implicato il differenziale (un'entità molto piccola che tende a zero ma non è zero). Quindi l'intensità alla fine non la vado a descrivere per un intero angolo solido ma per n direzioni diverse.

2. Irradianza e uscita radiante riguardano il secondo elemento del progetto, cioè le superfici.

Per conoscere quanta luce arriva su una superficie devo fare il rapporto tra il flusso e l'area. C'è una complicazione: come faccio a sapere se l'energia sulla superficie sta arrivando o sta uscendo? Entra in gioco la nomenclatura: la grandezza è sempre la stessa ma si chiama **irradianza** se il flusso arriva sulla superficie, **uscita radiante** [Watt/m<sup>2</sup>] se esce dalla superficie. È utilizzata per descrivere l'energia che arriva o lascia una superficie. Il fatto che il rapporto è espresso in differenziale significa che non sto considerando un'area ma sto considerando punto per punto.

3. La radianza riguarda il terzo elemento del progetto, cioè l'osservatore, il ricettore.

La **radianza** [Watt/ sr m<sup>2</sup>] può descrivere la percezione dell'energia luminosa da parte di un osservatore umano. Avendo un punto A osservato e un cerchio da cui sto osservando sto definendo un angolo solido, di ampiezza  $\Omega$ . Inoltre sto osservando il punto con un'inclinazione  $\theta$  rispetto alla normale. La radianza dipende anche dalla distanza dal ricettore (se il ricettore è molto distante il cono sarà molto più stretto, quindi l'angolo solido più piccolo).

**FOTOMETRIA** → Una radiazione e.m. come viene percepita da un osservatore umano? La valutazione visiva di uno stimolo radiometrico è oggetto della fotometria.

La funzione di efficacia luminosa spettrale  $K(\lambda)$  valuta la sensibilità alle radiazioni e.m. dell'osservatore umano medio.  $K(\lambda)$  è stata misurata sperimentalmente su un campione di soggetti umano e ottenuta come media dei valori rilevati.

Negli anni '20 dello scorso secolo la CIE (l'ente internazionale che stabilisce le norme e le raccomandazioni scientifiche inerenti luce, colore e percezione visiva) misura la sensibilità dell'occhio umano alle differenti radiazioni e.m. determinando una funzione di sensibilità a campana chiamata **Efficacia luminosa spettrale**  $K(\lambda)$ . Dalla curva si osserva che vi è un valore massimo  $\lambda_m=555$  nm in corrispondenza di cui ho il massimo di sensibilità. Un'onda monocromatica di questa lunghezza d'onda la vediamo gialla. Il giallo è il colore che in natura vediamo come più luminoso. Procedendo ugualmente verso il rosso o verso il blu la nostra sensibilità diminuisce. (Vediamo il blu o il rosso cupo come colori più scuri perché siamo meno sensibili a quelle radiazioni). Notiamo che la curva è zero al di fuori dell'intervallo 380-780 nm e ciò spiega perché non vediamo né gli infrarossi né gli ultravioletti. (Di notte il nostro sistema visivo cambia un po' per cui il colore più luminoso non è più il giallo ma è il verde).

Ad ogni grandezza radiometrica corrisponde una grandezza fotometrica pesata (cioè moltiplicata per) dall'efficacia luminosa spettrale  $K(\lambda)$ . Essendo  $K(\lambda)$  uguale a zero al di fuori del campo visivo (380-780 nm) ne consegue che anche le grandezze fotometriche sono definite tra 380 e 780nm. Per le grandezze fotometriche, per convenzione, si usa il pedice  $v$  (visivo) invece del pedice  $e$  (energetico) della radiometria.

La formula del **flusso luminoso** [lm] rappresenta il passaggio tra la realtà fisica e la realtà percepita dall'osservatore umano.

Supponiamo di avere un flusso radiante spettrale; la forma di questo spettro determinerà anche il colore di questa radiazione.

Moltiplico la realtà fisica per la sensibilità dell'osservatore umano e ottengo una curva che è il prodotto tra due funzioni. Farne l'integrale significa calcolare l'area sottesa alla curva. Il flusso radiante è uno spettro quindi la forma di quella curva determinerà il colore di quella radiazione. Il flusso visivo è un valore che indica quanta luce esce dalla sorgente, ma non mi dice niente sull'informazione cromatica.

LE GRANDEZZE FOTOMETRICHE:

Energia radiante – **energia luminosa** [T]

Intensità radiante – **intensità luminosa** [cd]

Irradianza – **illuminamento** [lux]

Uscita radiante – **emettanza luminosa o uscita luminosa** [lux]

Radianza – **luminanza** [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ] (la luminanza è ciò che di più vicino c'è al concetto verbale che noi possiamo avere di luminosità).

Con l'avvento dei led l'illuminazione colorata ormai è stata sdoganata, accanto alle grandezze fotometriche ci sono anche quelle radiometriche, a volte espresse in forma totale. Cosa significa valore totale? Se parliamo ad esempio di radianza spettrale (curva), la radianza totale è l'area sottesa alla curva. Perdo l'informazione sul colore e ho una sola informazione energetica.

STRUMENTI DI MISURA:

La sfera integratrice detta anche sfera di Ulbricht misura il flusso luminoso

I fotometri (o goniofotometri) misurano l'intensità luminosa

I Luxmetri misurano l'illuminamento

I Luminanzometri misurano la luminanza

A volte con il termine fotometro si intende uno strumento in grado di effettuare più tipi di misure.

