

## Alessandro Farini: note per le lezioni di ottica del sistema visivo

Queste note non vogliono essere esaustive, ma solo servire come linee guida per le lezioni

### 1 Lo spettro elettromagnetico

La radiazione visibile è solo una piccola parte dello spettro elettromagnetico. Quando utilizziamo una qualunque sorgente luminosa generalmente siamo esposti, oltre alle radiazioni visibili, anche ad altre radiazioni, come l'ultravioletto e l'infrarosso, che possono essere assorbite dai mezzi oculari, anche se non sono in grado di provocare la sensazione visiva. Alcuni dei parametri che permettono di distinguere tra loro le varie radiazioni elettromagnetiche sono la lunghezza d'onda  $\lambda$  (Fig.1.1) e la frequenza  $\nu$ .

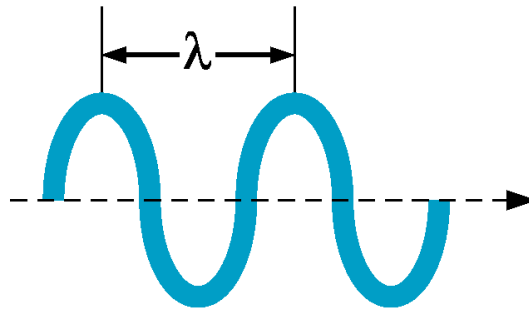


Fig.1.1 Definizione di lunghezza d'onda

La lunghezza d'onda  $\lambda$  e la frequenza  $\nu$  di una radiazione elettromagnetica sono grandezze legate tra loro, dato che possiamo scrivere che, nel vuoto:

$$\lambda \cdot \nu = c$$

dove con  $c$  abbiamo indicato la velocità della radiazione nel vuoto (circa 300.000 Chilometri al secondo). Questa formula ci dice che radiazioni di lunghezza d'onda più grande hanno frequenza minore rispetto a radiazioni di lunghezza d'onda più corta.

Se poi ricordiamo la formula di Planck, che ci fornisce l'energia di un quanto (in pratica un "pacchetto") di radiazione elettromagnetica:

$$E = h\nu$$

ne segue che:

$$E = h \frac{c}{\lambda}$$

Abbiamo quindi che l'energia di una radiazione è inversamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda  $\lambda$ ; più corta è la lunghezza d'onda di una radiazione, e maggiore sarà il suo contributo energetico. E' necessario dedicare molta attenzione alla radiazione UV, che, avendo lunghezza d'onda minore rispetto al visibile presenta di conseguenza un contenuto energetico maggiore.

La radiazione luminosa (luce) non e' altro che un caso particolare di propagazione di radiazione elettromagnetica che varia nello spazio e nel tempo. In questo senso la luce e' solo una piccola parte di uno spettro assai ampio, in cui le varie parti sono distinte dal variare della lunghezza d'onda. Quando le radiazioni elettromagnetiche hanno una grande lunghezza d'onda, nell'ordine delle centinaia di metri, possiamo parlare, come si vede nella figura , di onde radio. Osservando la figura 1.2 ci si accorge di come alla stessa "famiglia" della luce appartengano anche altre radiazioni quali l'ultravioletto, l'infrarosso, i raggi x, le microonde e le onde radio. La luce è una parte assai ristretta dello spettro elettromagnetico, ma con una fondamentale proprietà: di poter essere vista, cioè inviata al cervello tramite il sistema visivo, proprietà che manca a tutte gli altri tipi di onde elettromagnetiche.

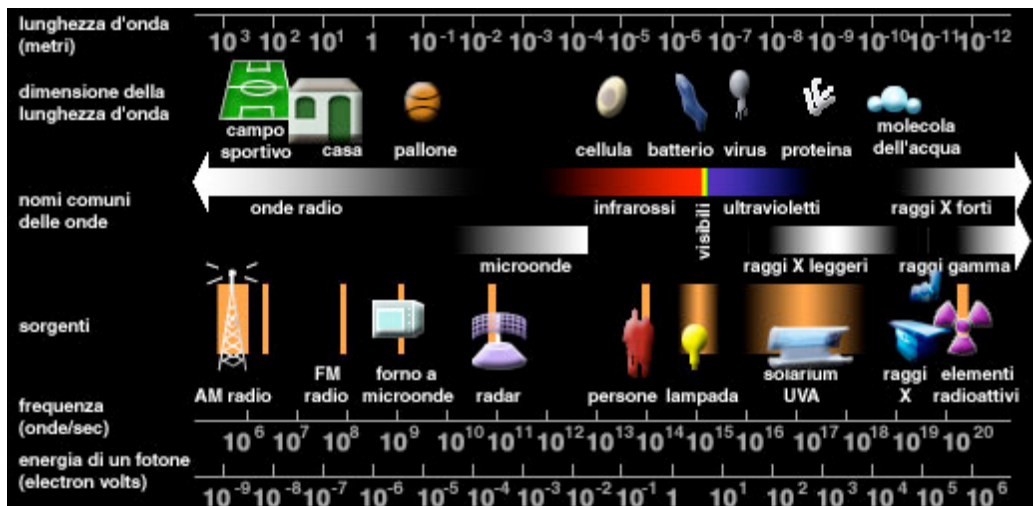


Figure 1.2: Lo spettro Elettromagnetico

La luce e' quindi semplicemente un particolare caso di propagazione di radiazione elettromagnetica, che varia nel tempo e nello spazio seguendo un moto ondulatorio.

## 2 Ottica del sistema visivo

Lo scopo dell'ottica del nostro sistema visivo è quello di ottenere immagini perfette: in pratica di un oggetto puntiforme (ad esempio una stella lontana) si dovrebbe ottenere un'immagine puntiforme. In realtà la perfezione di queste immagini è limitata da alcuni fattori che dovranno essere presi in considerazione, tra i quali

- La diffrazione della pupilla
- Le aberrazioni nella cornea e nel cristallino
- La diffusione della luce da parte dei vari mezzi ottici
- Le proprietà ottiche della retina stessa

oltre naturalmente a problemi di defocus (le varie anomalie refrattive) e di astigmatismo.

### La diffrazione della pupilla

La diffrazione è un tipico fenomeno dell'ottica legato alla natura ondulatoria della luce. Per considerare la diffrazione si può ricorrere al principio di Huygens-Fresnel: *ogni punto di un fronte d'onda funge da sorgente di onde sferiche secondarie aventi la stessa frequenza dell'onda primaria. In ogni punto situato oltre l'ostacolo, il campo ottico è la sovrapposizione di tutte le onde secondarie che arrivano in quel punto.*[Hecht]. Essa sarà tanto più avvertibile quanto più piccola è la pupilla di ingresso del sistema ottico. Un oggetto puntiforme produce per diffrazione una figura che viene detta disco di Airy in cui l'illuminamento si distribuisce in questo modo.

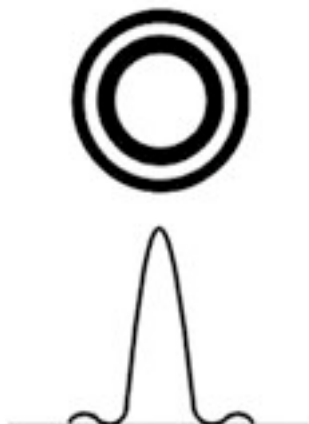


Figura 2.1 Point Spread Function

La dimensione del disco di Airy può essere ricavata dalla seguente formula che ci fornisce il raggio del disco (cioè dal massimo fino al primo minimo) in radianti

$$\theta_A = 1.22 \cdot \frac{\lambda}{a}$$

dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda del segnale luminoso mentre  $a$  è la dimensione della pupilla d'ingresso. Nel caso della visione umana possiamo considerare  $\lambda=555$  nm (massimo di sensibilità dell'occhio in visione fotopica) mentre  $a$  coincide con la misura della nostra pupilla. Ad esempio quando la pupilla ha una dimensione di 1 mm ne segue che:

$$\theta_A = \frac{1.22 \cdot 0.000555}{1} = 0.0006771 \text{ rad} = 0.039^\circ = 2.3'$$

mentre per una pupilla di 2.5 mm si ha

$$\theta_A = 0.93'$$

Dalla formula si ricava che se l'unico problema ad affliggere il sistema visivo fosse la diffrazione avremmo che più grande è la pupilla e migliore sarebbe l'immagine retinica. Va anche sottolineato che il limite imposto dalla diffrazione è un limite teorico che non può essere aggirato con una migliore realizzazione delle ottiche. Un sistema affetto esclusivamente dalla diffrazione si dice limitato per diffrazione.

Le aberrazioni nella cornea e nel cristallino

In un occhio reale le vere performance ottiche sono assai peggiori di quelle predette dalla diffrazione a causa della presenza di varie aberrazioni ottiche, e di conseguenza la point spread function assume forme molto meno regolari.

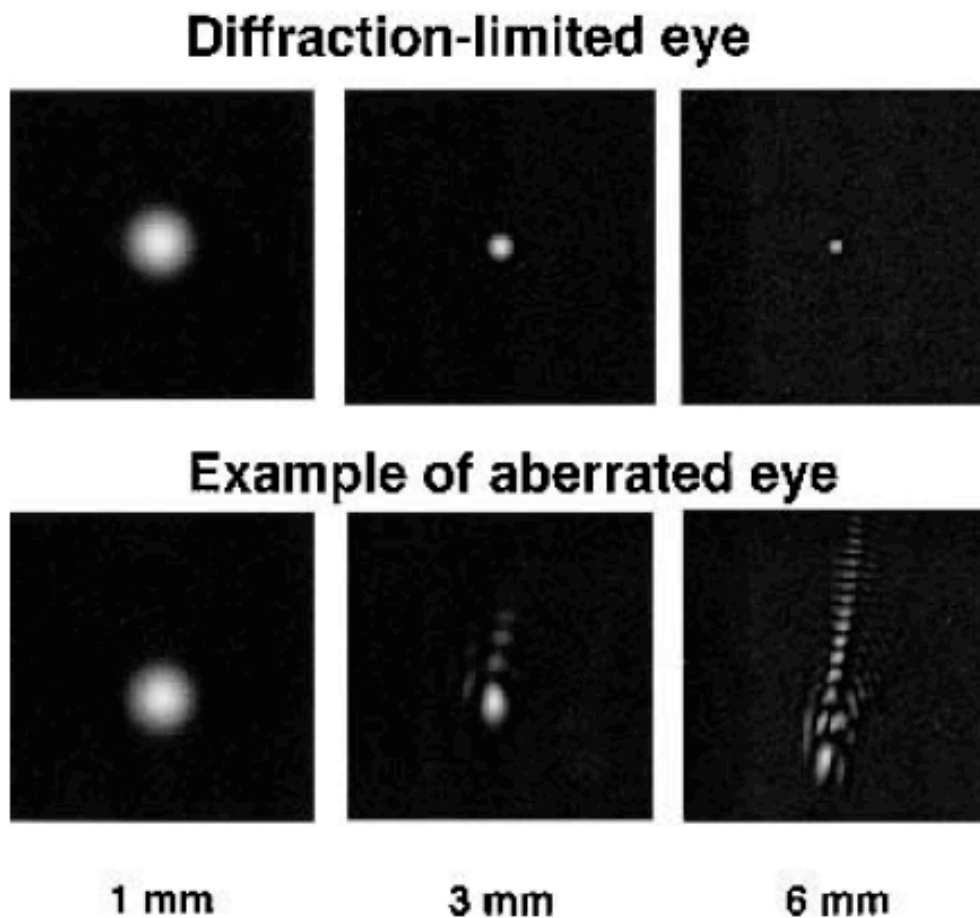


Fig.2.2 Confronto tra occhio senza e con aberrazioni

Nella Figura 2.2 sono rappresentate le point spread function nel caso di un occhio in cui sia presente

solo la diffrazione e in un caso in cui si tenga conto delle varie aberrazioni geometriche. Dato che il contributo delle varie aberrazioni geometriche aumenta all'aumentare della pupilla si può notare che con la pupilla di 1 mm in pratica l'unico limite dell'occhio è dato dalla diffrazione, mentre con una pupilla di 6 mm domina il contributo delle aberrazioni.

Nella figura 2.3 è rappresentato l'andamento dell'acuità visiva in funzione della dimensione della pupilla per un occhio in cui vale solo la diffrazione (linea tratteggiata) e per un occhio reale (linea intera). Mentre il comportamento per diffrazione prevederebbe, come già detto, un miglioramento continuo, l'occhio reale raggiunge le performance ideali a 3 mm. Solo per pupille inferiori a 1.5 mm si può approssimare il comportamento dell'occhio reale con quello limitato per diffrazione.

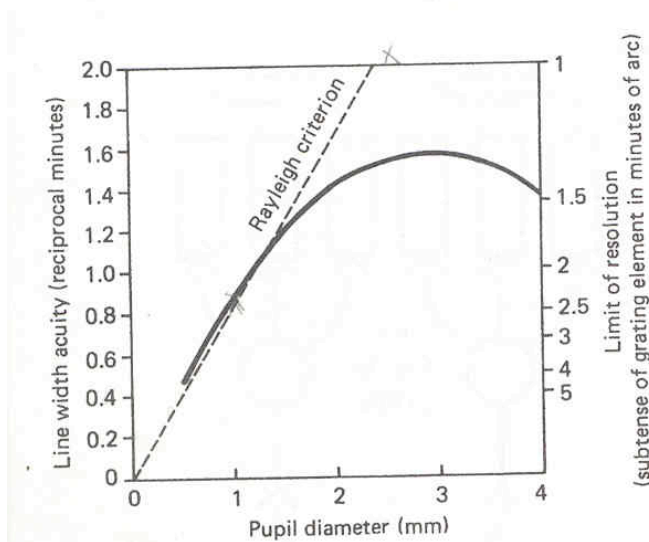


Fig.2.3 acuità visiva in funzione del diametro della pupilla

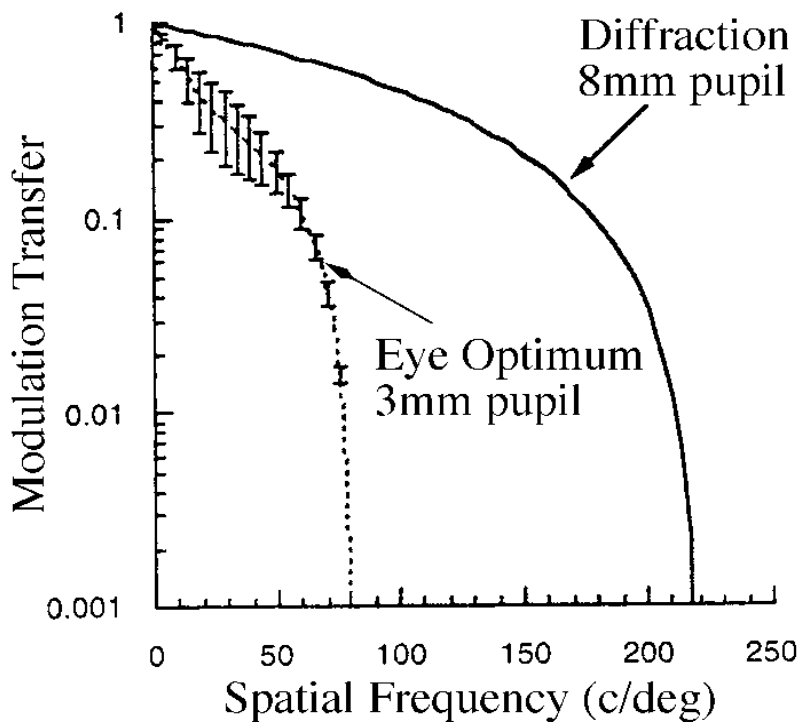


Fig.2.4 Grafico MTF di un 'occhio reale con pupilla 3 mm e di un occhio con solo diffrazione