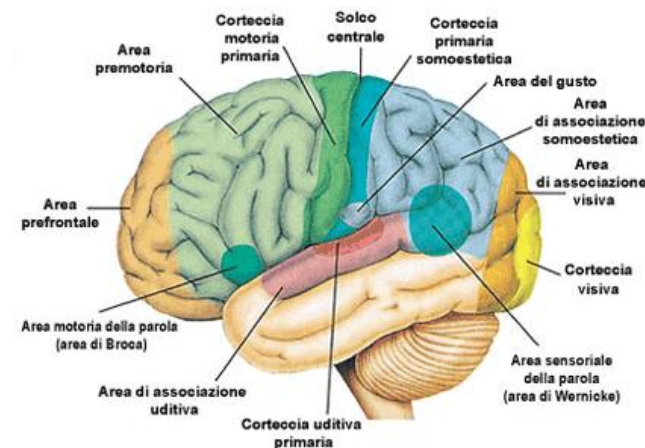
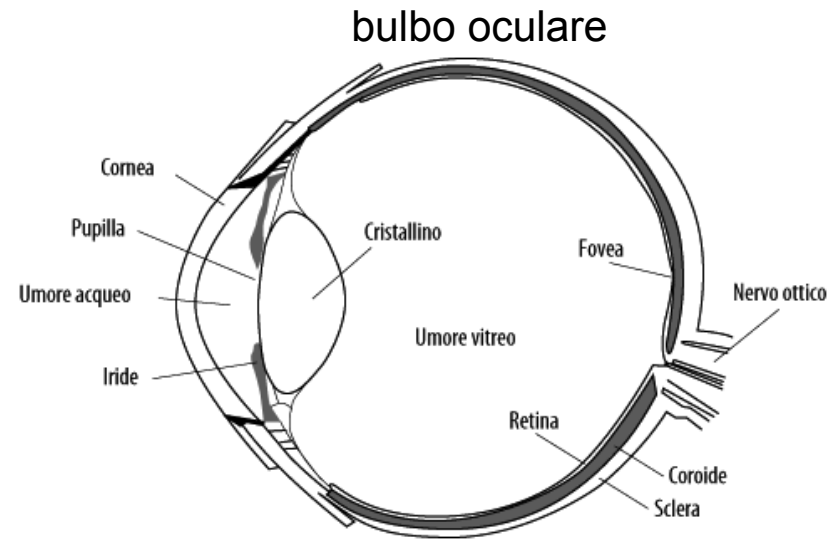


Sistemi d'immagini mediche

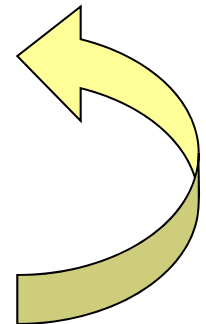
- ✓ Dispositivi che trasferiscono un'immagine da una superficie ad un'altra
- ✓ Canali attraverso cui i segnali relativi a tutti gli elementi dell'immagine originale passano per apparire nell'immagine finale
 - ✓ Pellicole fotografiche
 - ✓ Sistemi elettronici basati sull'acquisizione digitale

Sistema visivo umano

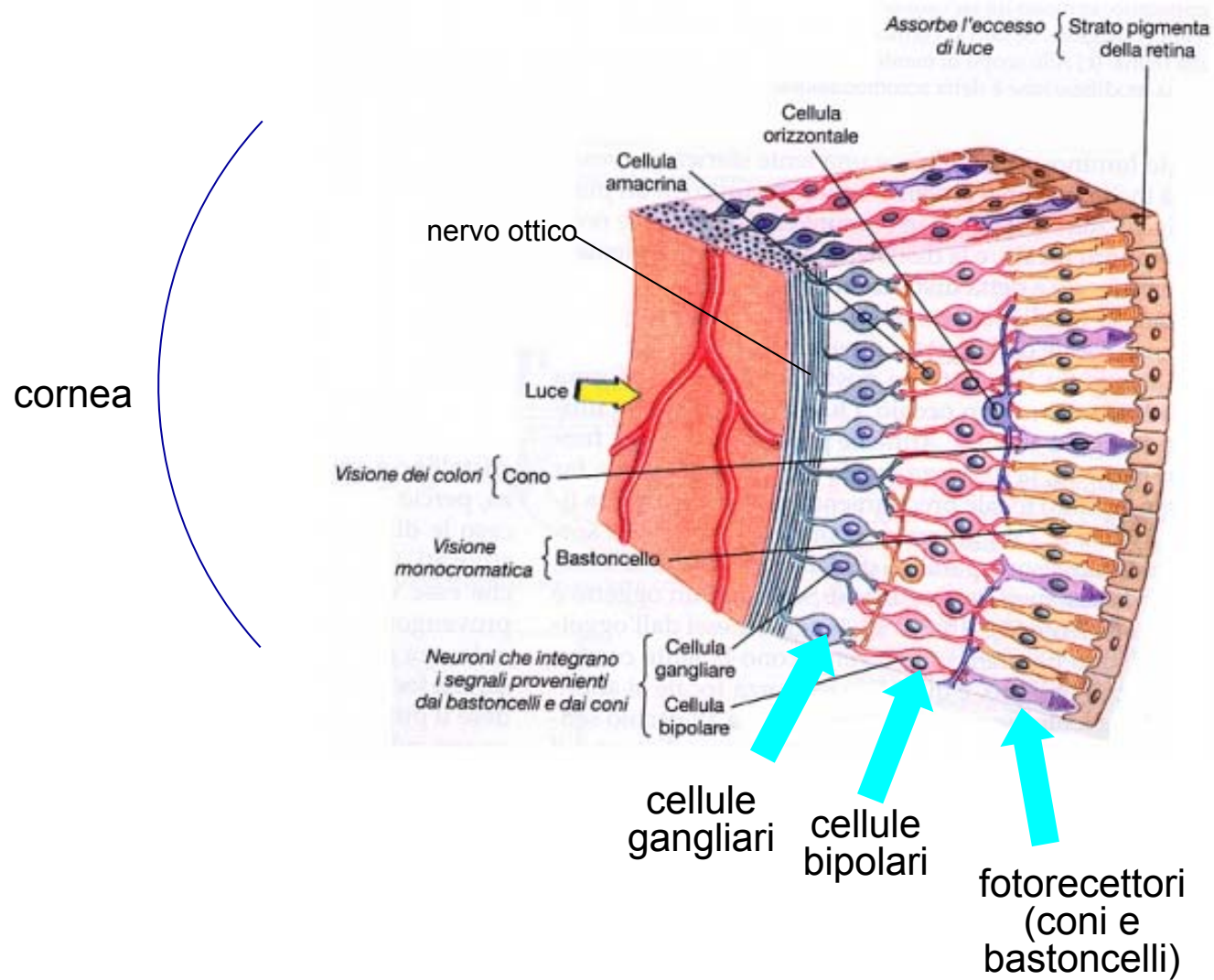
- Cornea e cristallino
 - sistema di lenti convergenti che focalizzano l'immagine sulla retina rimpicciolita e capovolta
- Iride
 - parte colorata dell'occhio
- Pupilla
 - foro nell'iride attraverso il quale passa la radiazione
 - diaframma circolare che cambia l'apertura con le condizioni luminose (tra 2 e 8 mm)
- Retina
 - traduce la radiazione in segnali nervosi trasmessi al cervello dal nervo ottico attraverso i fotorecettori in essa contenuti (coni e bastoncelli)
- Fovea
 - zona della retina dove viene focalizzata l'immagine



la regione occipitale del cervello
come parte del sistema visivo
umano

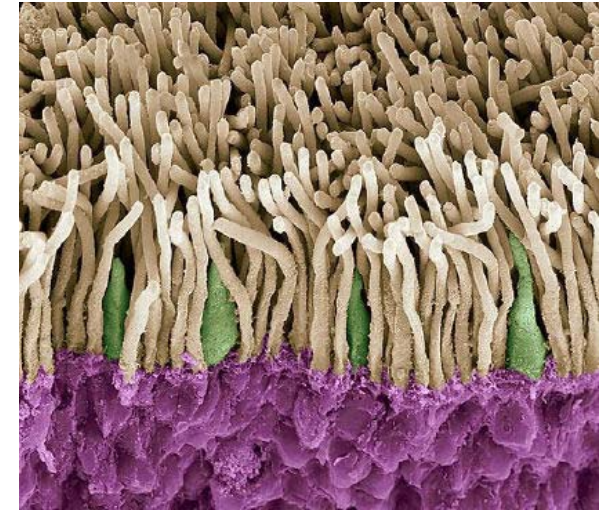


La retina



Fotorecettori dell'occhio: coni e bastoncelli

- Fotorecettori dell'occhio: coni e bastoncelli
 - Bastoncelli: visione scotopica (notturna) e percezione della luminanza
 - Coni: visione fotopica (diurna) e percezione della cromaticità
- L'occhio umano ha circa 120 milioni di bastoncelli e 7 milioni di coni

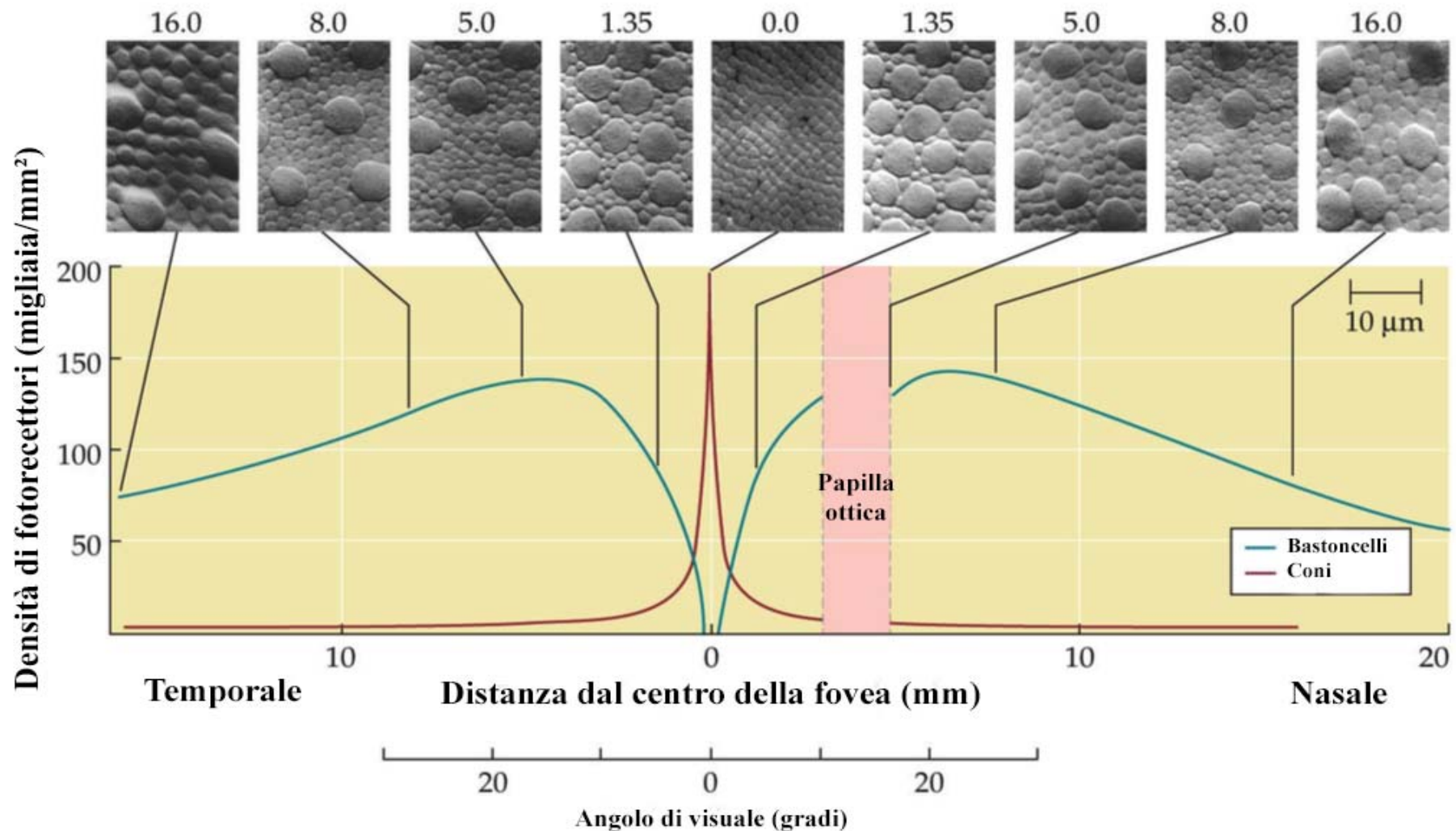


coni (in verde) e bastoncelli (in marrone) al microscopio

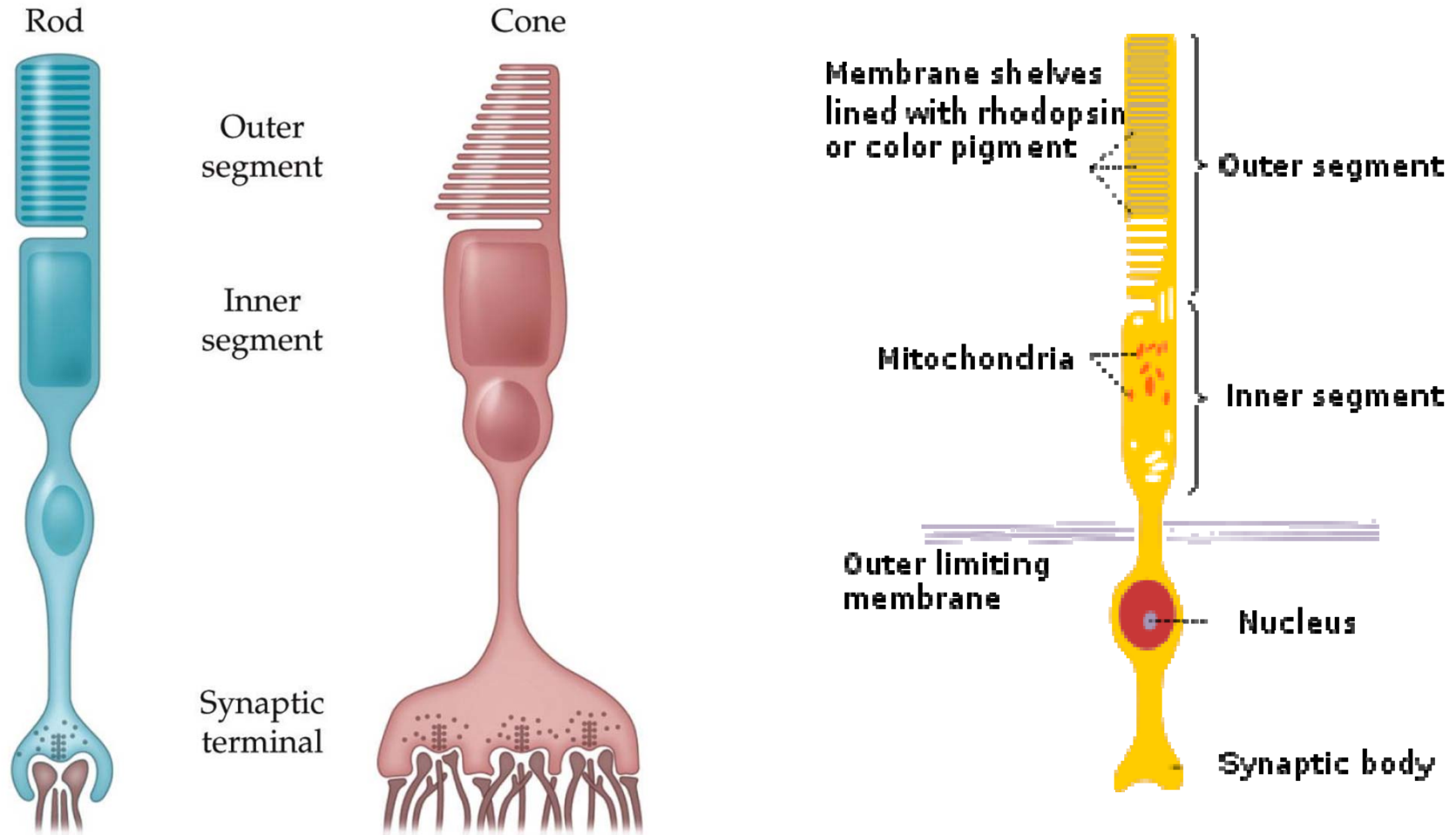
Tipo di cellula	Diametro (μm)	Lunghezza (μm)
bastoncello	2	40-60
cono	2.5-7.5	25-58

Distribuzione spaziale dei fotorecettori

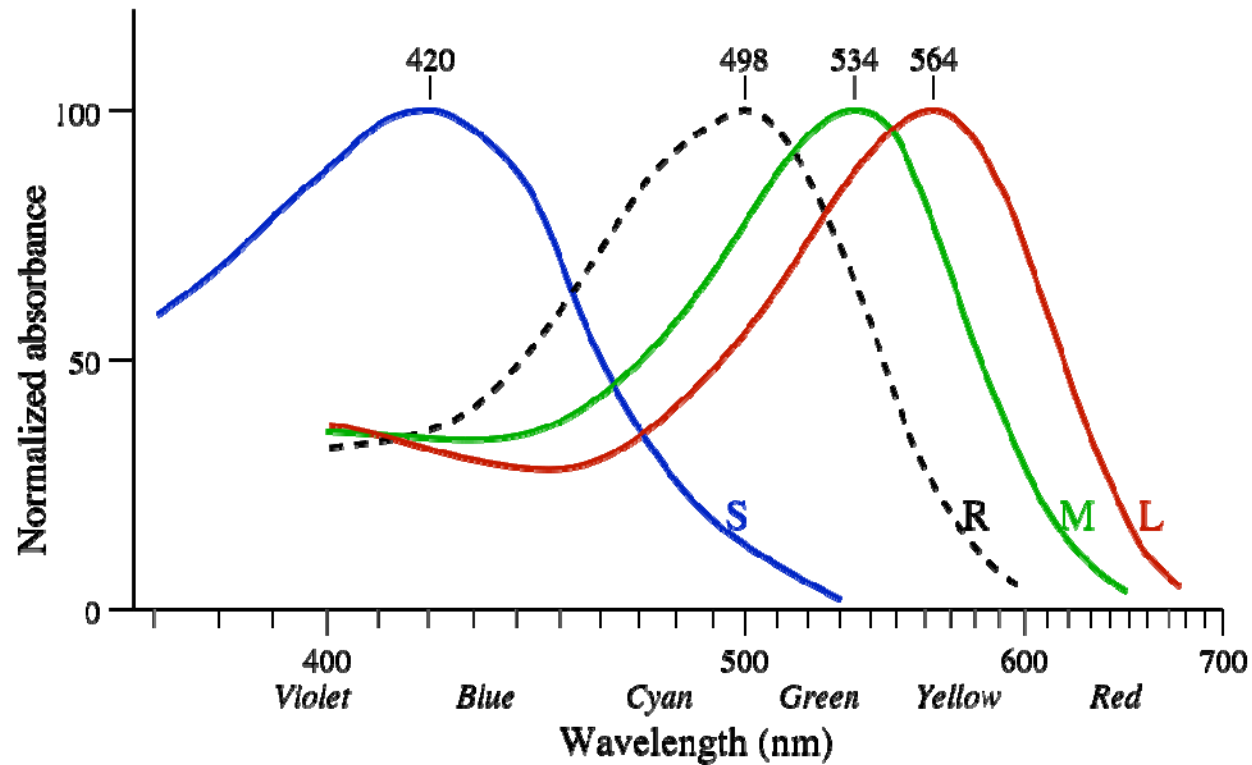
90% dei coni sono nella fovea (parte centrale della retina)
i bastoncelli sono sulla zona periferica della retina



Fotorecettori dell'occhio: coni e bastoncelli



Pigmenti presenti



Rod pigment: rhodopsin

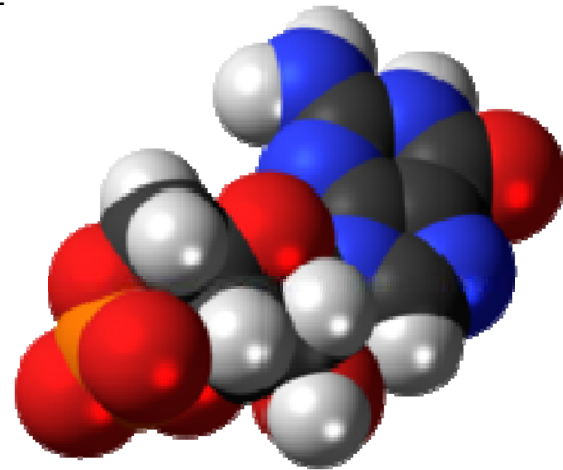
Iodopsin Cone type	Name	Range (nm)	Peak wavelength (nm)
S (OPN1SW) - "tritan", "cyanolabe"	β	400–500 nm	420–440 nm
M (OPN1MW) - "deutan", "chlorolabe"	γ	450–630 nm	534–545 nm
L (OPN1LW) - "protan", "erythrolabe"	ρ	500–700 nm	564–580 nm

Fisiologia della vista

La **rodopsina** è una proteina a α -elica, che è situata nei numerosi dischi di membrana. E' costituita da un pigmento, l'**11-cis-retinale**, sensibile alla luce, legato all'**opsina**, una proteina della retina.



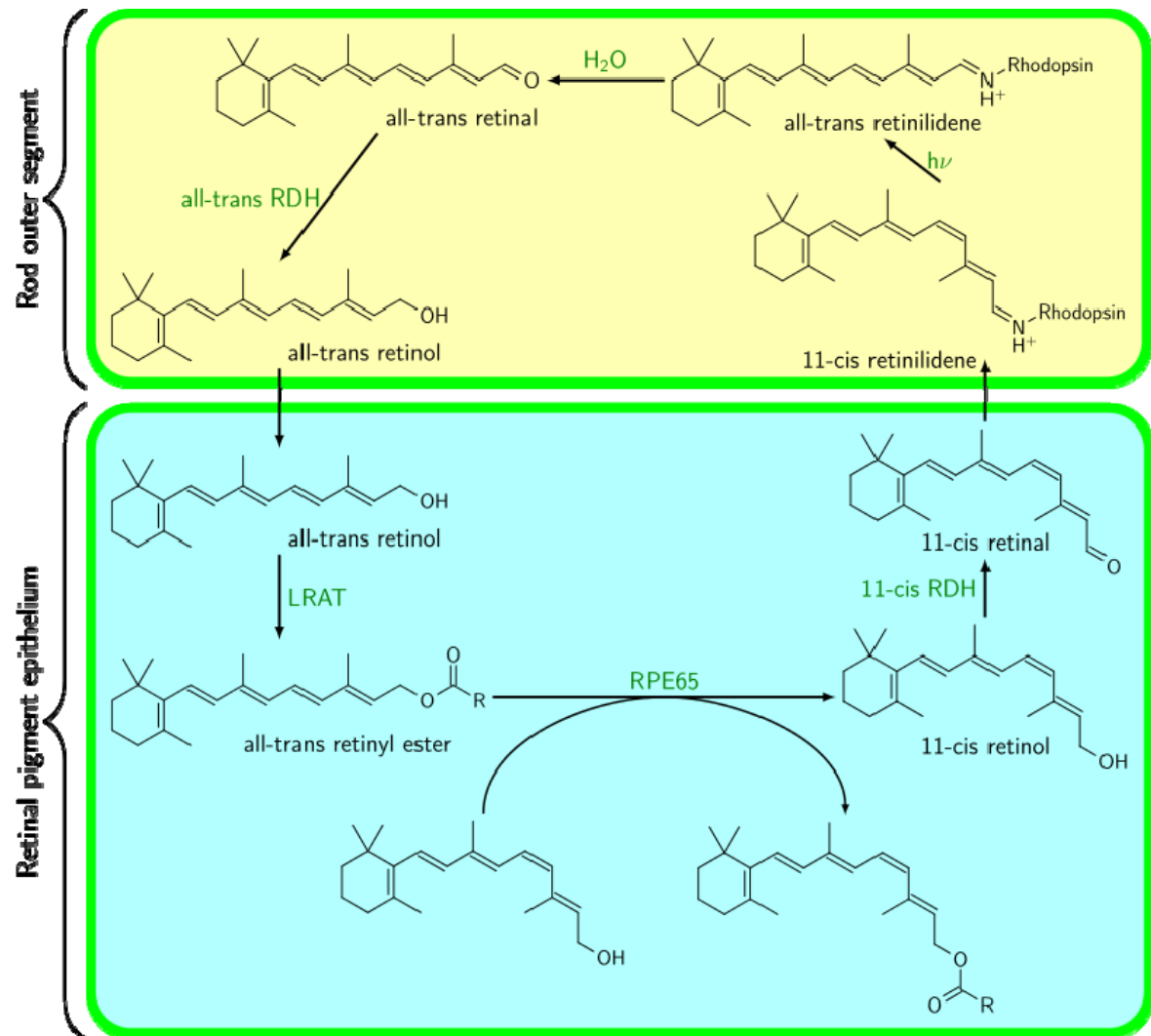
Nei bastoncelli si trovano numerosi canali per il Na^+ aperti in condizione di buio, perché nella cellula ci sono alte concentrazioni di **cGMP (guanosina monofosfato ciclico)** che tiene aperti i canali.



Fisiologia della vista

Quando la luce interagisce con l'11-cis-retinale, catalizza la sua conversione a tutto-trans-retinale, che determina un cambiamento conformazionale nella opsina. Questa proteina attivata, attiva una seconda proteina, la trasducina, che a sua volta attiva una specifica GTP Fosfodiesterasi, che scinde il cGMP in GMP e determina un abbassamento della concentrazione del cGMP.

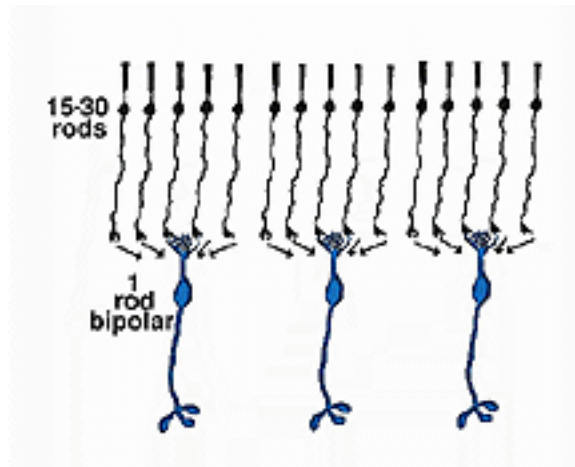
I canali per il Na^+ lungo la membrana della cellula a bastoncello si chiudono, si determina una variazione del potenziale di membrana (iperpolarizzazione). La membrana essendo polarizzata non rilascia il GABA (γ -amminobutirrato, un neurotrasmettitore inibitorio), in questo modo le cellule del nervo ottico non essendo inibite possono generare l'impulso nervoso, che arriverà al nostro cervello tramite il nervo ottico.



Normalmente il potenziale di riposo della membrana plasmatica di un bastoncello è -30 mV. Quando il cGMP diminuisce i canali del Na^+ aperti sono sempre meno, e questo provoca l'iperpolarizzazione della membrana sino a -35 mV per pochi millisecondi.

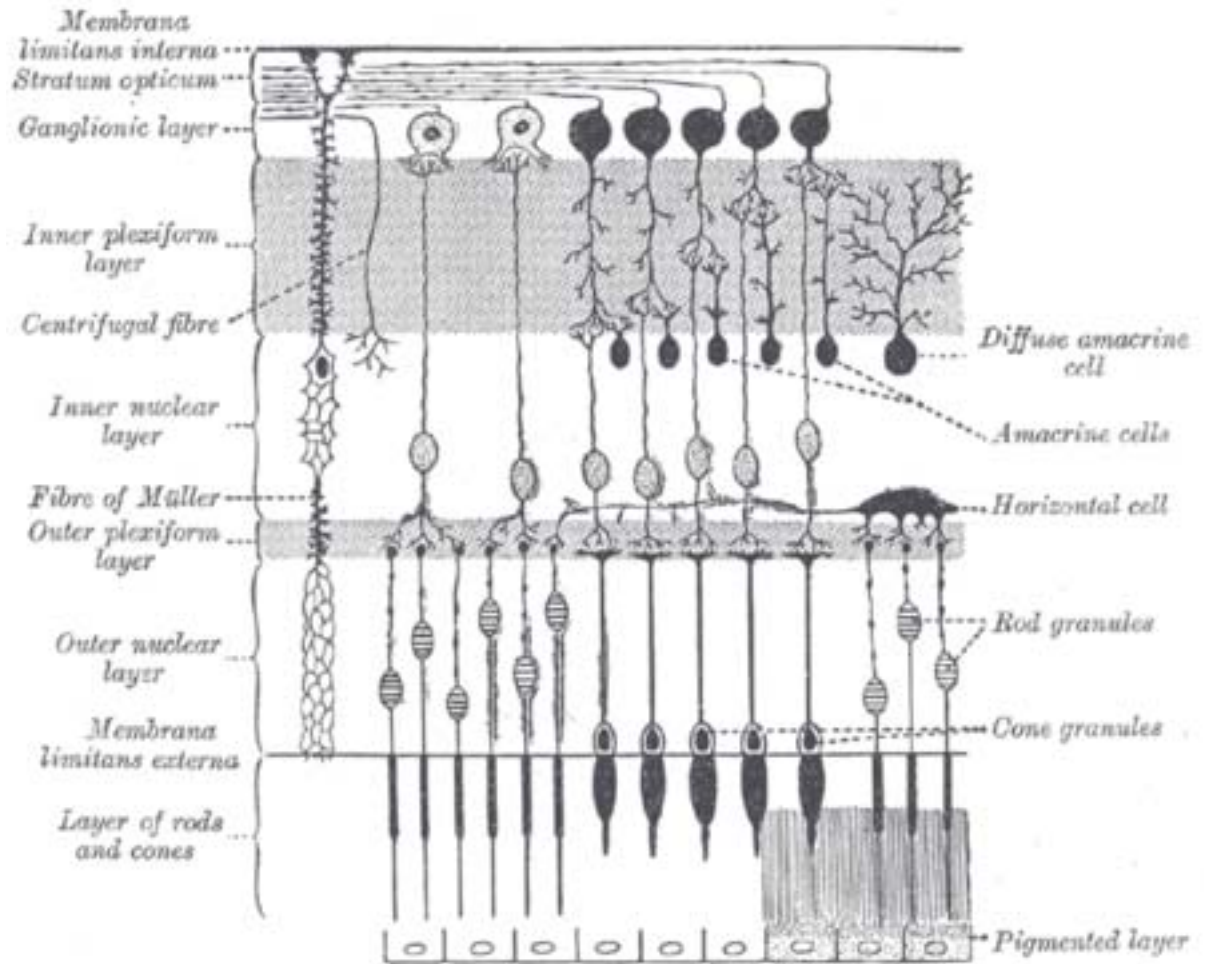
Elementi di conduzione del segnale

- Cellule bipolari: fanno confluire gli impulsi originati in gruppi di fotorecettori su di un numero inferiore di cellule gangliari.
 - o Le cellule bipolari per i coni sono piccole e possiedono un unico dendrite, che prende intimo rapporto coi piedi ramificati dei coni; il loro neurite contrae rapporti col dendrite delle cellule gangliari.
 - o Le cellule bipolari per i bastoncelli sono invece caratterizzate dal possedere una o più ramificazioni dendritiche molto varie e voluminose.



Elementi di conduzione del segnale

- Cellule gangliari: hanno aspetto globoso e dimensioni varie; possono presentare un grosso dendrite unico oppure diversi dendriti.



Elementi di associazione

- Le cellule orizzontali sono disposte nello strato dei granuli interni ed hanno la funzione di collegare orizzontalmente i fotorecettori e di aumentare o deprimere la soglia funzionale dei coni, dei bastoncelli e delle cellule bipolari, inibendo o facilitando il flusso degli impulsi visivi.
- Le cellule amacrine, sono anch'esse situate nello strato dei granuli interni ed hanno la funzione di collegare le cellule bipolari e le cellule gangliari; sono considerate come elementi associativi profondi

Contenuto di informazione di un' immagine

Prodotto del numero di elementi discreti dell' immagine (pixel o pel =picture element) per il numero di livelli d' ampiezza (scala di grigi) di ciascun livello

Caratteristiche fondamentali

- Risoluzione
- Contrasto
- Rumore

Risoluzione

Capacità del sistema di discriminare i dettagli dell'immagine sorgente

Un'immagine può essere considerata una superficie di date dimensioni che ha una risoluzione spaziale espressa in coppie (paia) di linee per mm (**lp/mm**): **oggetto + spazio**

Es: 10 buchi/cm $\longrightarrow$ 1lp/mm $\longrightarrow$ 2 pixels/mm

Pixel: più piccola dimensione dell'oggetto che vogliamo **risolvere**

Limiti

- ✓ La risoluzione dell'immagine fotografica è limita dalla granulosità della pellicola
- ✓ Nei sistemi digitali dalle caratteristiche e dimensioni del dispositivo rivelatore

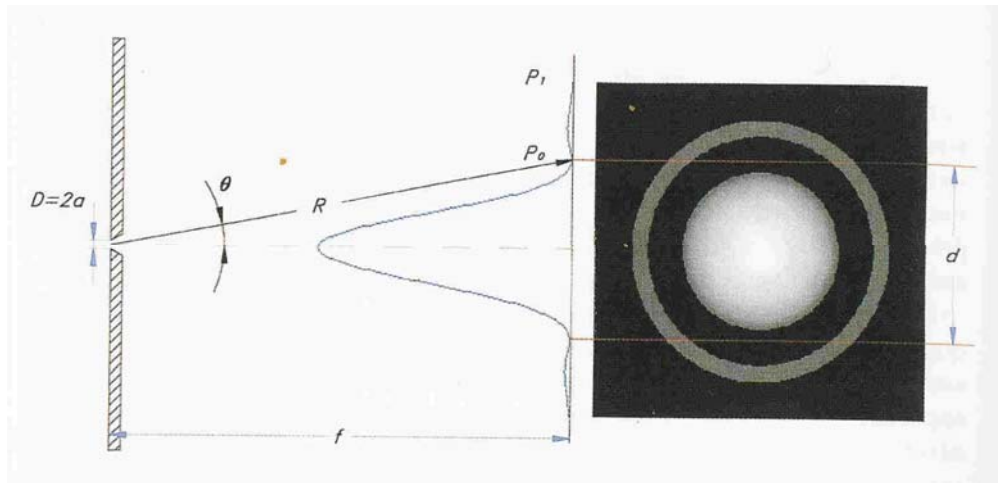
Supponendo di voler andare a guardare un'immagine medica direttamente con l'occhio umano (senza interporre ulteriori lenti):

La risoluzione è limitata dal potere risolutivo dell'occhio?

Risoluzione

Limite del potere risolutivo: diffrazione (i raggi luminosi sono deviati dai bordi dell'obiettivo)

Es.: apertura circolare ($D=2a$)



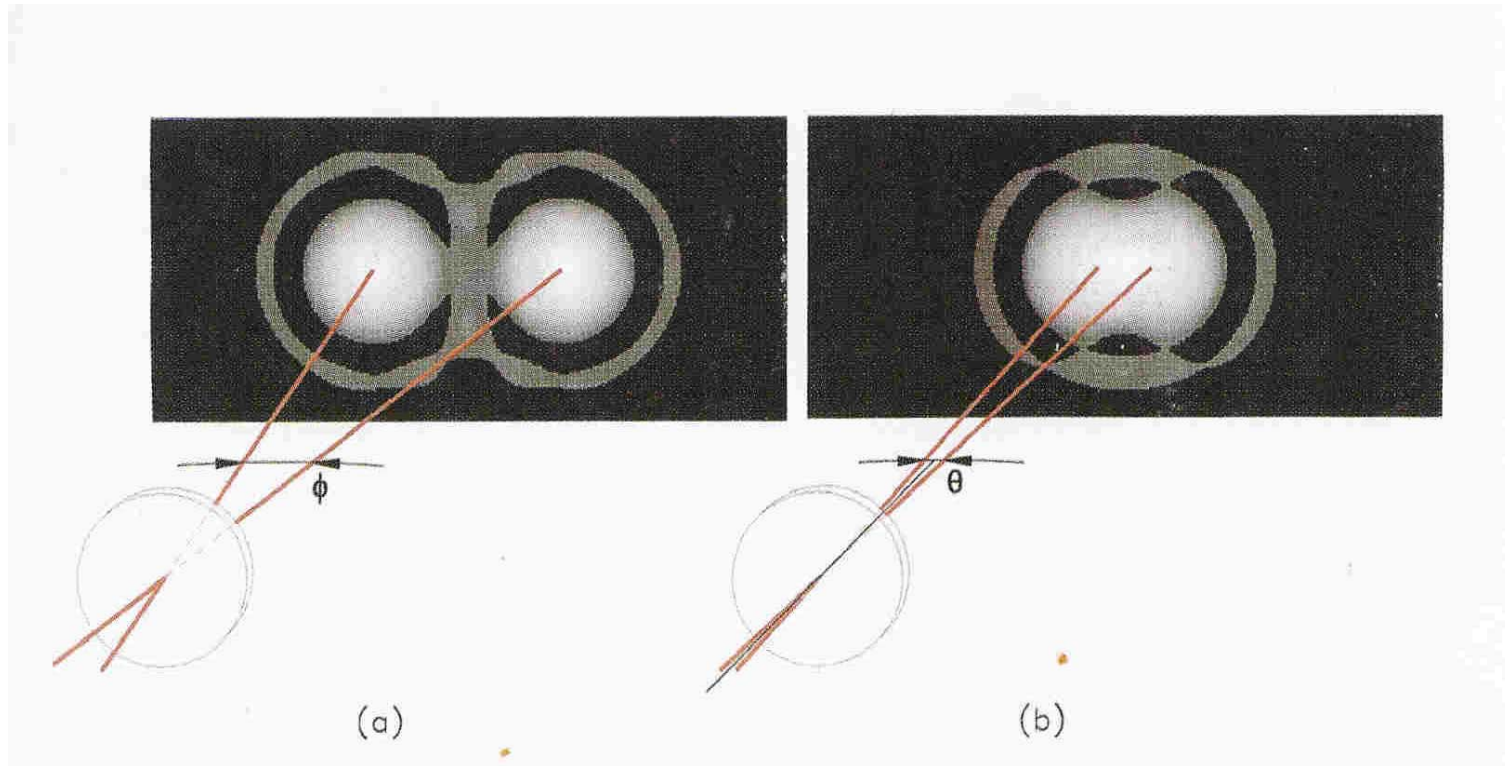
$$\frac{d}{2f} \cong \sin \theta \cong \theta$$

$$d = 1.22 \frac{R\lambda}{a}$$

d diametro del primo anello scuro, R distanza tra il centro dell'apertura e il punto dello schermo in cui si annulla per la prima volta l'intensità I , λ la lunghezza d'onda

$$d = 1.22 \frac{f\lambda}{a}$$

Criterio di Rayleigh:



Due stelle sono distinguibili se il centro di una di esse cade nel primo anello scuro di Airy, cioè se i due centri distano almeno $d/2$. D'altronde

$$\frac{d}{2} \cong \theta f \quad \text{e quindi l'angolo minimo sotto cui due oggetti sono distinguibili è:} \quad \theta \cong \frac{d}{2f}$$

Potere risolutivo

Lente ($D=2a$), f distanza focale della lente $f \sim R$

$$d = 1.22 \frac{f\lambda}{a}$$

$$\theta \cong \frac{d}{2f}$$

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{2a} = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

Es: **Occhio**: Lente (cristallino): $D=2 \text{ mm}$, $f=17 \text{ mm}$

$$\lambda = 560 \text{ nm} \quad D = 2 \text{ mm} \quad \theta = 1.22 \frac{\lambda}{2a} = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad \longrightarrow \quad \theta \cong 70.4'' \cong 1'$$

Acuità visiva

Oggetti ad una distanza di 10 cm dall'occhio sono risolti se:

$$a = 10(\text{cm}) \cdot \text{tg}\theta(\text{rad}) = 10(\text{cm}) \cdot \text{tg}[1.17(\text{gradi}) \cdot 2\pi / 360] = 35 \mu\text{m}$$

Potere risolutivo

Lente ($D=2a$), f distanza focale della lente $f \sim R$

$$d = 1.22 \frac{f\lambda}{a}$$

$$\theta \cong \frac{d}{2f}$$

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{2a} = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

Es: **Occhio**: Lente (cristallino): $D=2 \text{ mm}$, $f=17 \text{ mm}$

$$\lambda = 560 \text{ nm} \quad D = 2 \text{ mm} \quad \theta = 1.22 \frac{\lambda}{2a} = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad \longrightarrow \quad \theta \cong 70.4'' \cong 1'$$

Acuità visiva

Oggetti ad una distanza di 10 cm dall'occhio sono risolti se:

$$a = 10(\text{cm}) \cdot \text{tg}\theta(\text{rad}) = 10(\text{cm}) \cdot \text{tg}[1.17(\text{gradi}) \cdot 2\pi / 360] = 35 \mu\text{m}$$

$$\text{Telescopio: } D = 360 \text{ mm} \quad \longrightarrow \quad \theta \cong 0.3''$$

Potere risolutivo

Ma coni e bastocelli possono limitare la risoluzione?

Superficie su cui viene riprodotta l'immagine (retina): coni e bastoncelli $\sim 2 \mu\text{m}$

$$\text{Minima separazione angolare} \cong \frac{2 \mu\text{m}}{17 \text{mm}} = 1.2 \cdot 10^{-4} \text{ rad} \cong 24''$$

Dimensioni dei pixel dei dispositivi digitali circa $100 \mu\text{m}$

Contrasto

Differenza di luminosità tra parti contigue di immagine

Deriva dalle differenti interazioni della radiazione con l' oggetto:

- ✓ radiazione luminosa: differenti riflessioni
- ✓ radiazione X: differenti assorbimenti delle differenti parti del corpo
- ✓ radiazione γ : differenti emissioni dalle varie parti del corpo

1)
$$C = \frac{I_1 - I_2}{I_1}$$

I_1 luminosità dell' oggetto
 I_2 luminosità dell' ambiente

2)
$$C = \lg_{10} \frac{I_1}{I_2} = \lg_{10} I_1 - \lg_{10} I_2 = \lg_{10} \frac{I_1}{I_0} - \lg_{10} \frac{I_2}{I_0} = D_2 - D_1$$

I_0 luminosità della sorgente

D densità ottica = $\lg_{10} \frac{I_0}{I}$

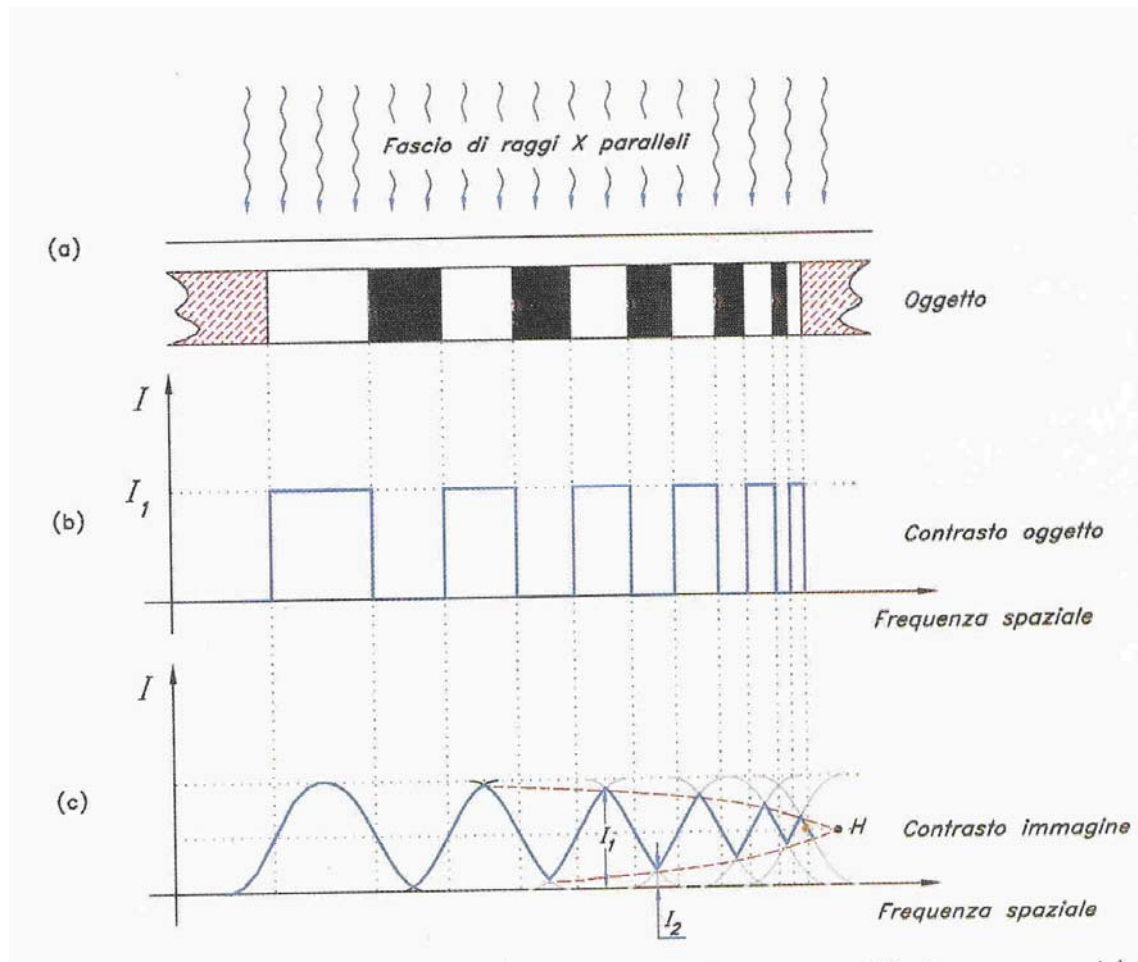
$0 \div 4$
 $0.21 \div 3.5$

3)
$$C = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$$

viene utilizzata per la definizione di funzione di trasferimento della modulazione (MTF)

Funzione di trasferimento della modulazione (MTF)

Risposta di un elemento o dell'intero sistema di immagine in funzione della frequenza spaziale: esprime il degradamento dell'immagine

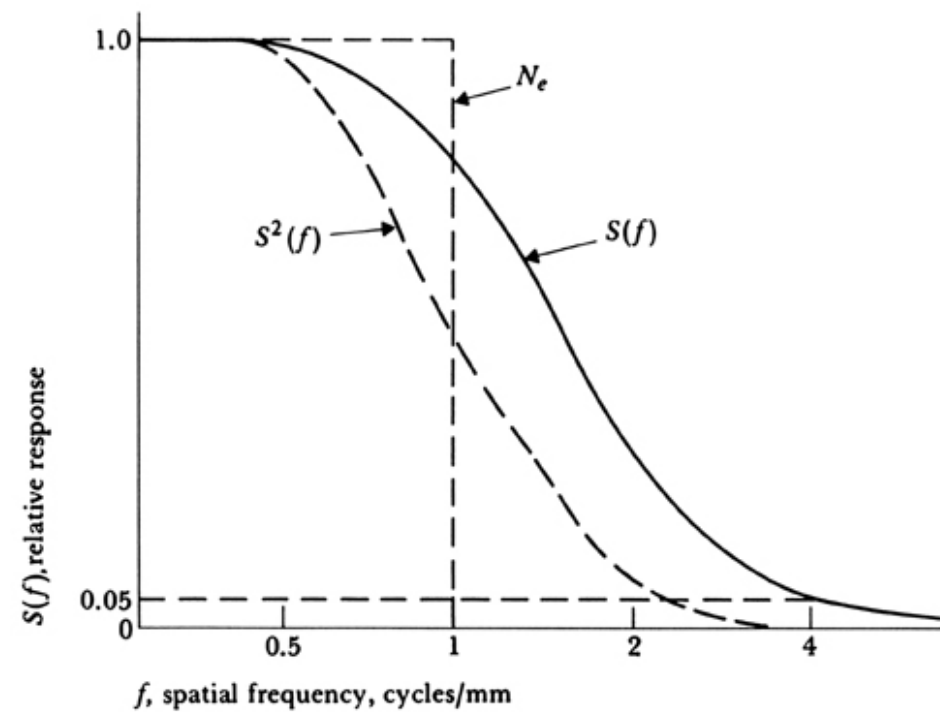


$$C = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$$

Funzione di trasferimento della modulazione (MTF)

Funzioni sinusoidali

$$S(f) = \frac{\pi}{4} \left[M(f) + \frac{M(3f)}{3} - \frac{M(5f)}{5} + \frac{M(7f)}{7} + \dots \right]$$



Contrasto dell' immagine

Oggetto

Contrasto dell' immagine

Oggetto

Sorgente



Energia della radiazione:

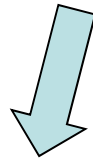
alto contrasto: tecnica a raggi molli

basso contrasto: tecnica a raggi duri

Contrasto dell' immagine

Oggetto

Sorgente



Energia della radiazione:

alto contrasto: tecnica a raggi molli

basso contrasto: tecnica a raggi duri

Sistema di rivelazione

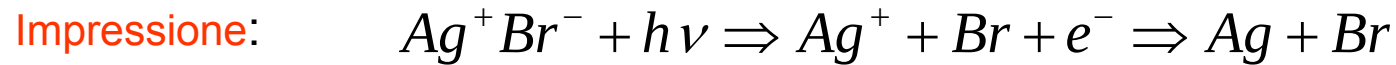


Pellicola: Curva sensitometrica

Sistemi digitali: Rumore legato
all'intensità del raggio

Pellicola radiografica

Pellicola è composta da un supporto (*base*: foglio di poliestere di 0.2 mm di spessore), sul quale viene spalmata un' emulsione contenente cristalli di AgBr.



Se si formano contemporaneamente almeno 5 atomi d' argento metallici

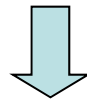
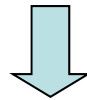


Immagine latente



Sviluppo: immersione della pellicola in una soluzione riducente: gli ioni d' argento del cristallo si accumulano intorno agli atomi metallici Ag dando luogo a piccoli punti neri (10^9 atomi d'argento)

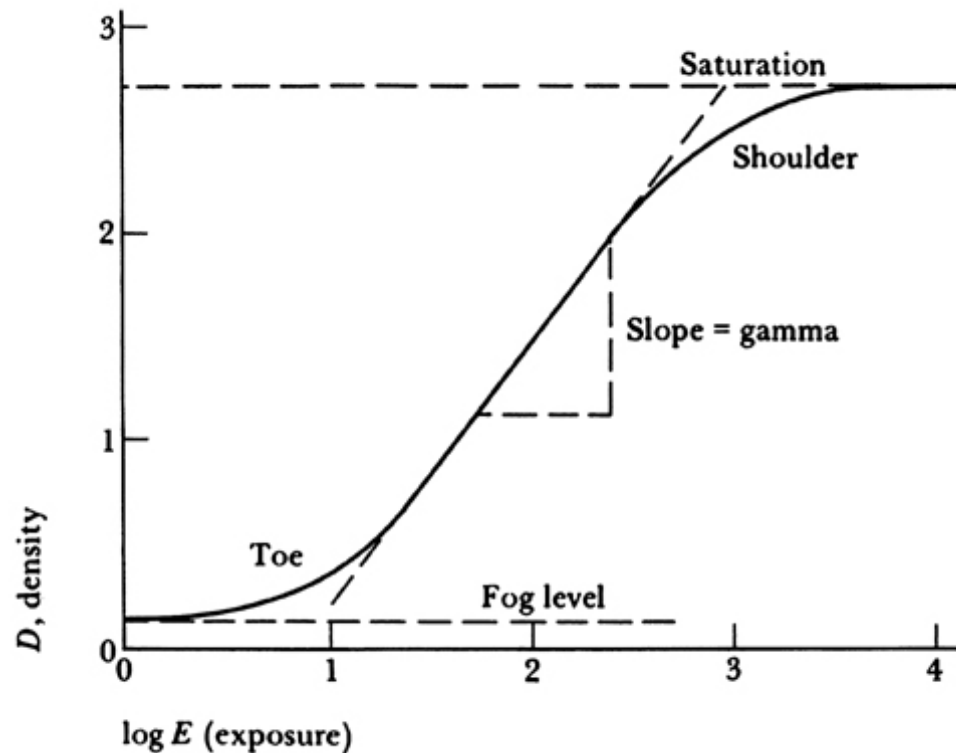


Fissaggio: immersione in una soluzione acquosa di tiosolfato di sodio ($Na_2S_2O_3$) o di ammonio $(NH_4)_2S_2O_3$



Caratterizzazione della pellicola

Curva sensitometrica (curva di Hurter e Driffield):



$D = \log(1/T)$ (coefficiente di trasmissione)

Fog level=Fondo + Velo:

densità ottica della base (fondo)
annerimento dell'emulsione dovuta
alla radiazione di fondo dell'ambiente (velo)

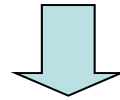
Indice di contrasto:

pendenza del tratto lineare della curva

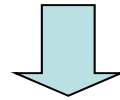
Alti indici di contrasto indicano bassa dinamica di esposizione!

Sistemi digitali

Numero di livelli di grigio che riusciamo a rappresentare



Rumore!



Numero di livelli è uguale al SNR

Rumore

Tutto ciò che non è segnale: tutte le perturbazioni introdotte dai dispositivi fisici utilizzati per la trasmissione ed elaborazione del segnale utile

Caratterizzazione statistica:

p probabilità che si verifichi un evento in corrispondenza di una osservazione **q** alto numero di osservazioni

m=qp numero medio di questo tipo di evento

Evento:

probabilità (**p**) che una goccia di pioggia cada in un' area A in un secondo, **q** numero di secondi

m=qp numero medio in parecchie osservazioni di q secondi ciascuna

Statistica di Poisson:

probabilità che K gocce cadano nell' area A in q secondi $p(K; m) = \frac{e^{-m} m^K}{K!}$

Valor medio

$$\sum_{K=0}^{\infty} K p(K; m) = m$$

Varianza

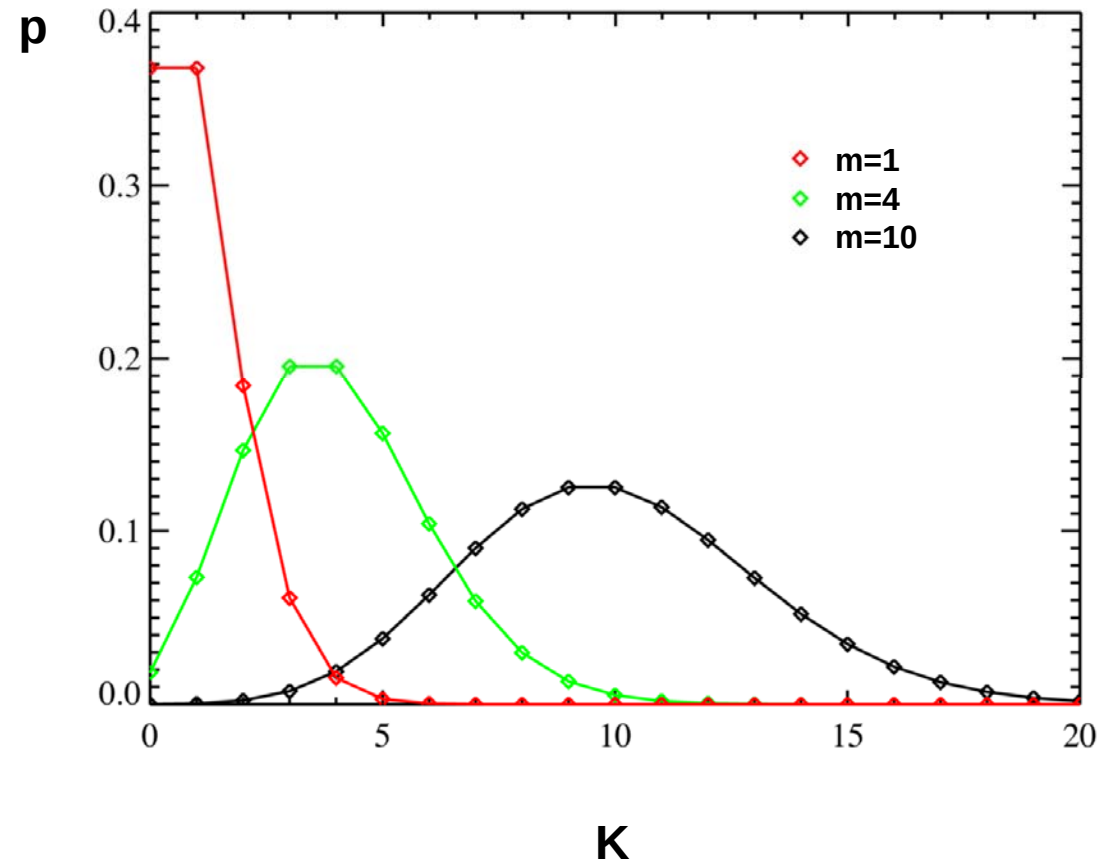
$$\sum_{K=0}^{\infty} (K - m)^2 p(K; m) = m$$

Deviazione standard

$$\sqrt{m}$$

Distribuzione di Poisson

$$p(K; m) = \frac{e^{-m} m^K}{K!}$$



Rumore

Gocce d'acqua e raggi X che colpiscono un detector: statistica di Poisson

Segnale modulato (assorbimento da parte del paziente di raggi X):

N N(1-M) $0 \leq M \leq 1$ NM $\Rightarrow$ termine che contiene l'informazione del segnale
entranti uscenti

$$SNR = \frac{NM}{\sqrt{N}} = M \sqrt{N}$$

$$SNR_{\max} = \frac{NM_{\max}}{\sqrt{N}} = M_{\max} \sqrt{N} = \sqrt{N}$$

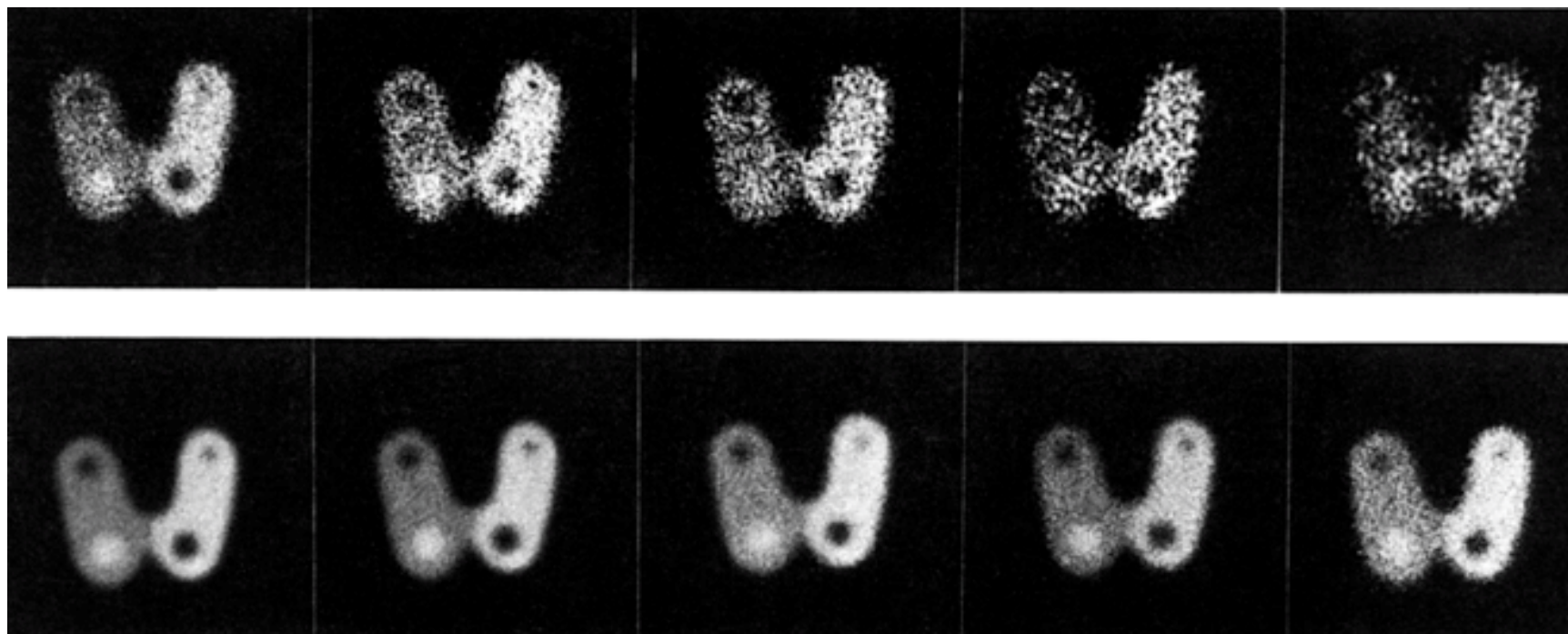
100 eventi in 1 s in 1 cm² $\Rightarrow$ SNR=10

400 eventi in 4 s in 1 cm² $\Rightarrow$ SNR=20

400 eventi in 1 s in 4 cm² $\Rightarrow$ SNR=20

Per segnali distribuiti randomicamente
tempo di integrazione e spazio di integrazione hanno lo stesso effetto!

Rumore



In ciascuna immagine dell'oggetto di test della tiroide, il numero di raggi γ è aumentato di un fattore 2. Il numero di conteggi va da 1563 a 800.000.

Alto SNR mi permette di osservare segnali a basso contrasto in un campo rumoroso!

Aumento il tempo



Aumento la dose

Aumento lo spazio



Diminuisco la risoluzione

Rumore

Qual'è la probabilità che il numero di fotoni per pixel superi randomicamente $N + JN^{1/2}$ in funzione di J ?

J	P
1	16%
2	2.3%
3	0.14%
4	0.003%

Rumore

Qual'è la probabilità che il numero di fotoni per pixel superi randomicamente $N + JN^{1/2}$ in funzione di J ?

J	P
1	16%
2	2.3%
3	0.14%
4	0.003%

Es.: matrice di pixel 360x480 ($=1.7 \cdot 10^5$ pixel) investita da raggi X

$J=4 \implies$ 5 pixel eccedono il limite

Rumore

Qual'è la probabilità che il numero di fotoni per pixel superi randomicamente $N + JN^{1/2}$ in funzione di J ?

J	P
1	16%
2	2.3%
3	0.14%
4	0.003%

Es.: matrice di pixel 360x480 ($=1.7 \cdot 10^5$ pixel) investita da raggi X

$J=4 \implies$ 5 pixel eccedono il limite

Consideriamo ora una matrice con un numero totale di pixel pari a b . Ogni pixel sia quadrato con lato d e che occupi un'area totale pari A . Quindi $A = b \cdot d^2$.

Rumore

Qual'è la probabilità che il numero di fotoni per pixel superi randomicamente $N + JN^{1/2}$ in funzione di J ?

J	P
1	16%
2	2.3%
3	0.14%
4	0.003%

Es.: matrice di pixel 360x480 ($=1.7 \cdot 10^5$ pixel) investita da raggi X

$J=4 \implies$ 5 pixel eccedono il limite

Consideriamo ora una matrice con un numero totale di pixel pari a b . Ogni pixel sia quadrato con lato d e che occupi un'area totale pari A . Quindi $A = b \cdot d^2$.

Quale deve essere il numero N di raggi X da inviare sulla matrice, se si vuole che il segnale utile (MN) non sia confuso con il rumore ($JN^{1/2}$) in non più dello 0.003% dei pixel?

Rumore

Qual' è la probabilità che il numero di fotoni per pixel superi randomicamente $N + JN^{1/2}$ in funzione di J ?

J	P
1	16%
2	2.3%
3	0.14%
4	0.003%

Es.: matrice di pixel 360x480 ($=1.7 \cdot 10^5$ pixel) investita da raggi X

$J=4 \implies$ 5 pixel eccedono il limite

Consideriamo ora una matrice con un numero totale di pixel pari a b . Ogni pixel sia quadrato con lato d e che occupi un'area totale pari A . Quindi $A = b \cdot d^2$.

Quale deve essere il numero N di raggi X da inviare sulla matrice, se si vuole che il segnale utile (MN) non sia confuso con il rumore ($JN^{1/2}$) in non più dello 0.003% dei pixel?

Per il singolo pixel

$$MN' > J\sqrt{N'} \quad \sqrt{N'} > \left(\frac{J}{M}\right)$$

Per la matrice

$$N = bN' \quad C=M \quad N \geq \left(\frac{J}{C}\right)^2 b \quad N = A \frac{J^2}{(d^2 C^2)}$$

$$\text{Se } J=5 \quad N = A \frac{25}{(d^2 C^2)}$$

Fattori pratici



$$N = A \frac{50}{d^2 C^2}$$

Esempio

Valore di N:

- ✓ immagine a bassa risoluzione: A=100x100mm, 3 livelli di grigio, dimensione pixel: 3 mm

$$N = A \frac{50}{d^2 (C)^2} = 100^2 \frac{50}{3^2 (1/3)^2} = 5 \cdot 10^5$$

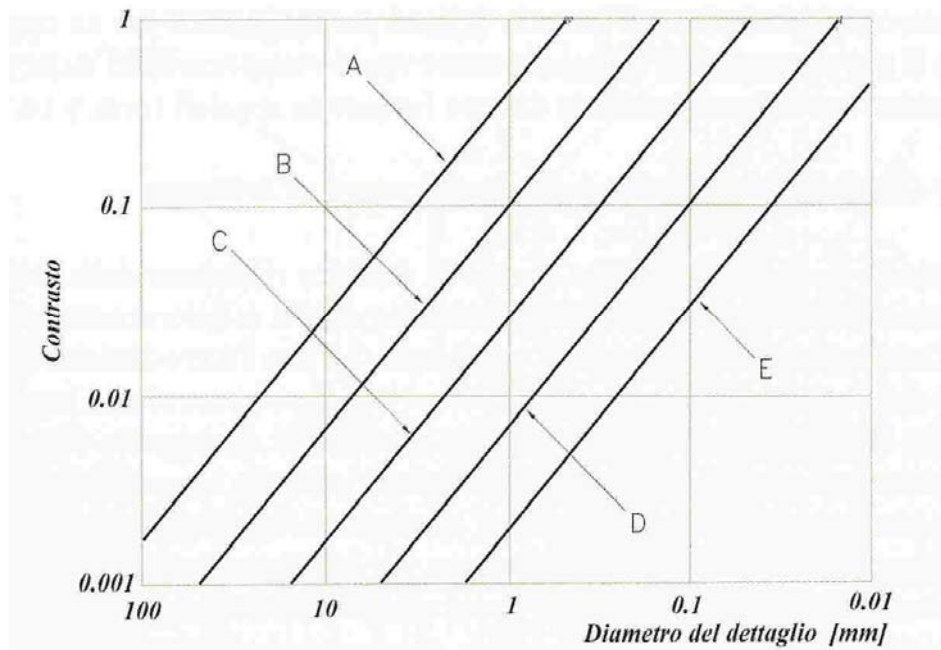
- ✓ immagine con buona risoluzione: A=100x100mm, 10 livelli di grigio, dimensione pixel: 0.5 mm

$$N = A \frac{50}{d^2 (C)^2} = 100^2 \frac{50}{0.5^2 (1/10)^2} = 2 \cdot 10^8$$

Relazione tra contrasto, rumore e risoluzione

$$SNR^2 = \left(\frac{\Delta N}{\sqrt{N}} \right)^2 = \frac{\Delta N^2}{N} = \frac{\left(\frac{\Delta N}{A} \right)^2}{\frac{N}{A}} A = \frac{\Delta \Phi^2}{\Phi} A = \frac{\Delta \Phi^2}{\Phi^2} \Phi A$$

$$SNR^2 = \frac{\Delta \Phi^2}{\Phi^2} \Phi A = C_0^2 \Phi A = C_0^2 \Phi \frac{\pi D^2}{4} \quad \lg C_0 = -\lg D + \frac{1}{2} \lg \frac{4(SNR)^2}{\pi \Phi}$$



A: $n_{ph}=10^2$ fotoni/mm²

E: $n_{ph}=10^6$ fotoni/mm²

Oggetti più piccoli possono essere risolti, ma si perde l'informazione sul contrasto