

# Appunti Image Processing 24/25

Michele Gentile

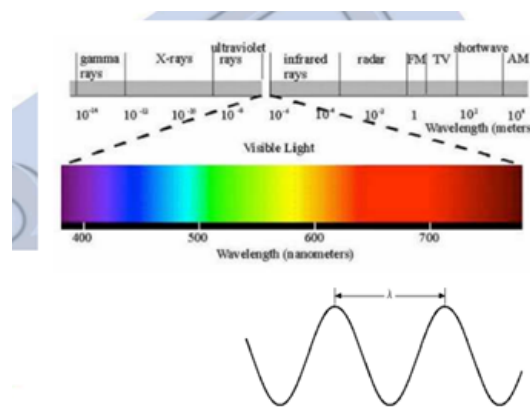
# 1 Luce e Spettro Elettromagnetico

Lo spettro elettromagnetico può essere espresso in termini di frequenza, lunghezza d'onda ed energia.

- Luce visibile: 400 – 800 nm.

Le immagini possono essere caratterizzate come una distribuzione bidimensionale dell'intensità (luminosità):  $f = f(x, y)$ . La luminosità della luce si può descrivere in termini di *flusso luminoso*, che è una misura della potenza percepita della luce visibile. Le unità di flusso luminoso sono i *lumen*. Definiamo:

1 Watt di uscita a 555.02 nm  $\Rightarrow \Phi = 683$  lumen.



## 1.1 Caratterizzazione dell'Immagine

- **Energia trasmessa**  $W$  [w  $\times$  s = Joule] corrisponde all'energia luminosa  $Q$  [lm  $\times$  s].
- **Potenza (flusso di energia)**  $\Phi = \frac{dW}{dt}$  [watt] corrisponde al flusso luminoso misurato in lumen [lm].  
1 watt = 683 lumen.
- **Intensità radiante**  $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$  [w  $\times$  (sr) $^{-1}$ ] corrisponde all'intensità luminosa [lm  $\times$  sr $^{-1}$  = candela].

Una candela è uguale all'intensità luminosa di una sorgente che emette a una frequenza di  $540 \times 10^{12}$  Hz (lunghezza d'onda di 555.02 nm) e all'intensità radiante di  $\frac{1}{683}$  watt per steradiano.

Le quantità radiometriche caratterizzano il fenomeno fisico, mentre le quantità fotometriche riguardano la realtà fisica del fenomeno in relazione alla sensibilità dell'occhio umano.

## 1.2 Unità Radiometriche

- **Irraggiamento (Irradiance)**: il flusso radiante (potenza) ricevuto da una superficie per unità di area.
- **Emittenza (Radiant Exitance)**: il flusso radiante (potenza) emesso da una superficie per unità di area.
- **Intensità radiante (Radiant Intensity)**: il flusso radiante (potenza) emesso, riflesso, trasmesso o ricevuto, per unità di angolo solido.
- **Radianza (Radiance)**: il flusso radiante emesso, riflesso, trasmesso o ricevuto da una data superficie, per unità di angolo solido e per unità di area proiettata.



### Radiometric units

Energia  $W$  (joule)

Potenza energetica  $\Phi = dW/dt$  (watt)

Grandezza	Definizione	Unità
<b>Irradiance</b> Irraggiamento	$d\Phi/dS_r$	watt/m <sup>2</sup>
<b>Radiant exitance</b> Emittenza	$d\Phi/dA_s$	watt/m <sup>2</sup>
<b>Radiant Intensity</b> Intensità	$d\Phi/d\Omega$	watt/sterad
<b>Radiance</b> Radianza	$d\Phi/(d\Omega dS \cos\theta)$	watt/(sterad m <sup>2</sup> )

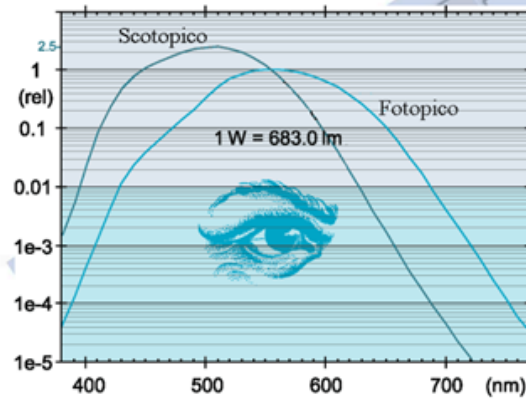
## 1.3 Esempio: Irradiazione del Sole

L'irradiazione sulla sommità dell'atmosfera è di  $1361 \text{ W/m}^2$ . I raggi del Sole vengono attenuati mentre attraversano l'atmosfera, lasciando una massima irradiazione superficiale normale di circa  $1000 \text{ W/m}^2$  a livello del mare (dipende dall'inclinazione della superficie di misura).

## 1.4 Funzione di luminosità

Le misurazioni radiometriche possono essere correlate con le misurazioni fotometriche utilizzando la funzione di luminosità (sperimentale). Questa rappresenta la risposta dell'occhio umano alla variazione della lunghezza d'onda. Ci sono due campi luminosi adiacenti: uno è costituito da una sorgente di intensità nota, l'altro da una sorgente che emette su una lunghezza d'onda leggermente diversa. L'osservatore varia la luminosità della seconda sorgente fino a percepire la stessa intensità nelle due aree. La funzione di luminosità si ottiene tracciando il rapporto tra le intensità dei due campi luminosi in funzione della lunghezza d'onda della sorgente sconosciuta. *Heterochromatic Flicker Photometry experiment.*

## luminosity function



### 1.5 Quantità Fotometriche

1 *candela* (cd) è l'emissione luminosa per unità di angolo solido ( $\frac{1}{683}$  W per steradiante a 555 nm). Flusso totale (lumen) =  $\text{cd} \times 4\pi$ . È la ventesima parte dell'intensità emessa nella direzione normale da 1 cm<sup>2</sup> di platino alla temperatura di fusione, 1770°C.

$$1 \text{ cd} = \frac{1 \text{ lumen}}{\text{steradiante}}.$$

Una lampadina fluorescente compatta da 25 W emette circa 1700 lumen; se la luce viene irradiata in modo uniforme in tutte le direzioni (cioè su  $4\pi$  steradiani), avrà un'intensità di:

$$\text{Intensità luminosa} = \frac{1700 \text{ lm}}{4\pi \text{ sr}} \approx 135 \text{ lm/sr} = 135 \text{ cd}.$$

### 1.6 Unità Fotometriche



#### Photometric Units

Quantity	Definition	Unit
Illuminance <i>Illuminamento</i>	$d\Phi/dS_r$	Lumen/m <sup>2</sup>
Luminous emittance <i>Emittenza luminosa</i>	$d\Phi/dS_s$	Lumen/m <sup>2</sup> (lux)
Luminous intensity <i>Intensità</i>	$d\Phi/d\Omega$	Lumen/sterad
Luminance <i>Luminanza</i>	$d\Phi/(d\Omega dA_p)$	Lumen/(sterad m <sup>2</sup> )

## 1.7 Caratterizzazione dell'Immagine

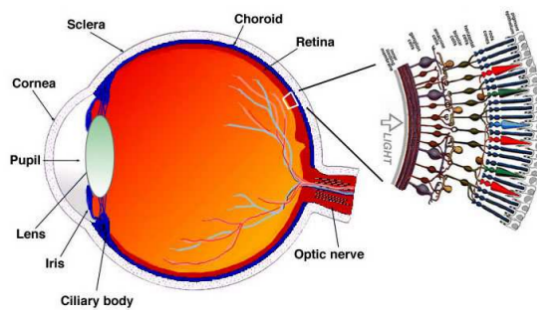
Un'immagine può essere caratterizzata come la distribuzione spaziale dell'energia radiante prodotta da una sorgente luminosa:

$$f = f(x, y, \lambda, t);$$

dove  $f$  è reale, non negativa, definita e limitata (variabili spaziali e temporali). L'immagine percepita (da un osservatore umano) o acquisita (tramite un trasduttore) è la funzione  $f$  modificata dalla risposta del visualizzatore o del trasduttore, tipicamente secondo le medie temporali e delle lunghezze d'onda.

$\lambda$  riguarda la lunghezza d'onda della luce.

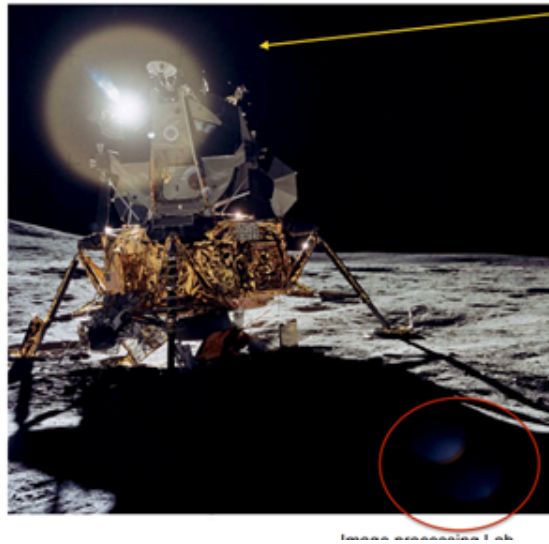
## 2 Struttura dell'Occhio



L'occhio è costituito da tre strati:

- Lo strato più esterno è composto da cornea e sclera.
- Lo strato intermedio è costituito da coroide, corpo ciliare e iride.
- Lo strato più interno è la retina.

La luce che colpisce le cellule fotosensibili della retina viene convertita in segnali elettrici che sono trasportati al cervello dai nervi ottici. L'occhio ha una forma approssimativamente sferica, con un diametro medio di circa 20 mm.



## 2.1 Riflessione e Dispersione (Immagini Fantasma)

Il fenomeno delle immagini fantasma è causato dalla riflessione indiretta o rifrazione della luce che attraversa l'obiettivo della fotocamera. Questo fenomeno è dovuto a imperfezioni nell'obiettivo stesso. L'immagine appare "sbiadita", riducendo contrasto e saturazione del colore, aggiungendo luce alle regioni scure dell'immagine e aggiungendo bianco alle regioni saturate, riducendo così la loro saturazione.

## 2.2 Funzione dei Fotorecettori

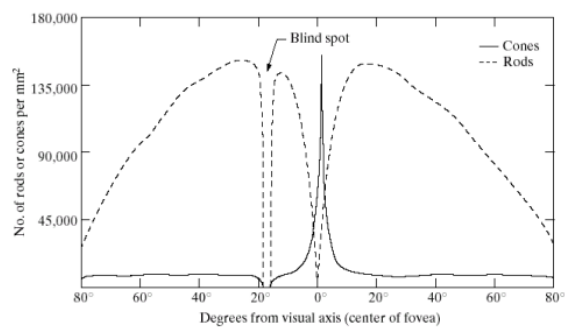
I bastoncelli e i coni non sono le uniche cellule fotorecettive presenti nella retina. Un piccolo sottogruppo di cellule gangliari retiniche nei mammiferi è anche intrinsecamente fotosensibile. I coni e i bastoncelli sono correlati alle informazioni visive che formano l'immagine, mentre la funzione principale dei fotorecettori nella retina interna è generare e trasmettere informazioni visive che non formano immagini.

Il riflesso pupillare alla luce (PLR) è un riflesso che controlla il diametro della pupilla in risposta all'intensità luminosa (luminanza) che colpisce le cellule gangliari retiniche nella parte posteriore dell'occhio, facilitando l'adattamento della vista a diversi livelli di luminosità e oscurità. Questo processo avviene attraverso le cellule gangliari.

## 2.3 Invecchiamento e Riduzione della Luce Trasmissibile

Con l'avanzare dell'età, la quantità di luce che viene trasmessa attraverso la lente dell'occhio diminuisce progressivamente. Quando un oggetto o una scena vengono messi a fuoco dalla lente, l'immagine ottica viene proiettata sulla retina, permettendo ai recettori fotosensibili di assorbire l'energia della radiazione elettromagnetica e convertirla in segnali elettrochimici, che vengono trasmessi al cervello attraverso le fibre nervose che formano il nervo ottico.

## 2.4 Coni e Bastoncelli



I recettori che formano l'immagine sulla retina sono di due tipi: i coni e i bastoncelli. I coni, circa 6-7 milioni per occhio, sono principalmente concentrati nella parte centrale della retina, chiamata macula, e sono altamente sensibili ai colori. I coni vengono attivati in condizioni di illuminazione da media ad alta intensità, essendo quindi responsabili della cosiddetta visione diurna o fotopica.

La distribuzione dei recettori sulla superficie della retina è simmetricamente radiale rispetto al punto centrale della fovea. La percezione visiva degli oggetti intensamente blu è meno distinta rispetto alla percezione degli oggetti rossi e verdi, poiché i coni blu sono situati fuori dalla fovea, dove i coni più ravvicinati offrono la massima risoluzione. L'indice di rifrazione della luce blu è abbastanza diverso rispetto a quello della luce rossa e verde, tanto che quando queste ultime sono a fuoco, il blu risulta leggermente sfocato a causa dell'aberrazione cromatica.

L'elevata concentrazione di coni e il fatto che ciascun cono sia collegato a una fibra nervosa consentono la capacità di discriminare dettagli molto fini in condizioni di luce da media ad alta intensità. I muscoli che controllano l'occhio ruotano il bulbo oculare finché l'immagine dell'oggetto di interesse non cade all'interno della fovea, che rappresenta l'area di maggiore acuità visiva, con un diametro di circa 1,5 mm.

I bastoncelli, in numero molto maggiore (da 75 a 150 milioni per occhio), sono distribuiti più uniformemente su tutta la superficie della retina e sono praticamente insensibili al colore. I bastoncelli vengono attivati in condizioni di bassa intensità luminosa, e sono quindi responsabili della visione notturna o scotopica.

## 2.5 Campo Recettivo delle Cellule Gangliari

La luce stimola i recettori, che inviano informazioni alle cellule gangliari. Ogni cellula gangliare risponde alla luce diretta su una specifica area circolare della retina, chiamata campo recettivo della cellula. Le cellule gangliari rispondono solo debolmente all'illuminazione uniforme e forniscono più informazioni sui contrasti che sull'intensità assoluta. Le informazioni necessarie per rilevare gli oggetti sono contenute principalmente nelle variazioni di intensità luminosa attraverso il campo visivo.

Nella regione della fovea, i raggi di luce arrivano direttamente sui fotorecettori. La distribuzione su un'area più ampia e il fatto che più bastoncelli siano collegati a una singola fibra nervosa riduce la capacità di risoluzione dei dettagli. I bastoncelli forniscono quindi un'immagine globale e meno precisa della scena nel campo visivo. Per queste ragioni, la visione notturna è caratterizzata dall'assenza di colore e da una scarsa acuità visiva.

## 2.6 Il Punto Cieco

La mancanza di recettori nell'area dove si innesta il nervo ottico dà origine al cosiddetto punto cieco. Tuttavia, il movimento continuo del bulbo oculare durante la visione evita la mancanza di percezione in quest'area.

## 2.7 Visione Notturna

La distribuzione su un'area più ampia e il fatto che diversi bastoncelli siano connessi a una singola fibra nervosa riduce le capacità di risoluzione dei dettagli: i bastoncelli forniscono un'immagine globale e meno precisa di questa scena nel campo visivo. Per queste ragioni, la visione notturna è caratterizzata dall'assenza di colore e da una bassa acutezza visiva. La mancanza di recettori nell'area in cui il nervo ottico si innesta dà origine al cosiddetto punto cieco: il movimento continuo del bulbo oculare durante la visione, tuttavia, evita la mancanza di percezione in questa zona.

## 2.8 Visione Foveale e Movimenti Oculari

Negli esseri umani e in altri primati simiani, la visione foveale centrale ha un'acuità più alta rispetto alla periferia (maggiore risoluzione spaziale). Questo schema di spazio variabile consente un ampio campo visivo, permettendo al contempo un'elaborazione visiva efficiente, dato che il cervello elabora solo la parte centrale dell'immagine che riceve e non tutto il campo visivo. I movimenti oculari permettono di risolvere i dettagli fini, se necessario.

## 2.9 Teoria di Hughes

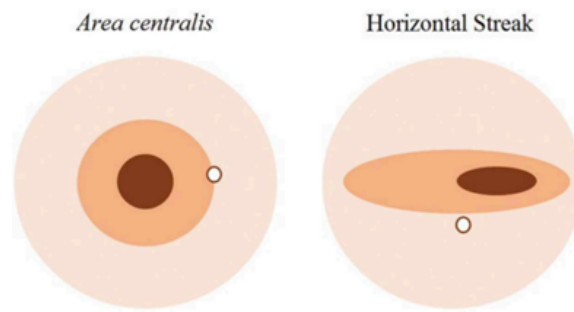
Lo stile di vita dell'animale all'interno di un ambiente plasma molte proprietà della retina, come la distribuzione e i tipi di bastoncelli, coni e cellule gangliari (Walls, 1942; Hughes, 1977; Lythgoe, 1979). Nell'uomo, questo schema di spazio variabile consente un ampio campo visivo, pur permettendo un'elaborazione visiva efficiente. I movimenti oculari permettono di risolvere i dettagli fini.

Non tutti i mammiferi possiedono una fovea. La distribuzione delle cellule gangliari (Hughes' Terrain theory) dipende dalla simmetria del mondo percepito. Una maggiore concentrazione di neuroni retinici si osserva nelle regioni dove è maggiore la necessità di buona qualità dell'immagine. La distribuzione cellulare è correlata con il comportamento e l'habitat della specie.

## 2.10 Specializzazioni Retiniche e Strie Visive

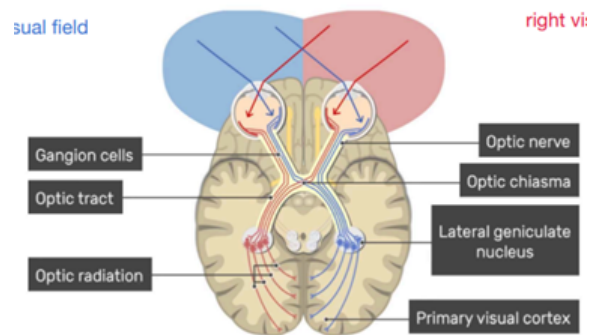
Le specializzazioni retiniche (retinal specializations) sono aree di maggiore densità cellulare rispetto alle aree circostanti e includono strie visive, area centralis e fovea. Le strie visive (visual streaks) sono regioni allungate di maggiore densità cellulare e possono essere orizzontali o verticali. La stria orizzontale fornisce una visione panoramica dell'ambiente senza la necessità di un alto grado di movimento oculare. Le strie orizzontali permettono di esaminare un'ampia area senza i movimenti saccadici degli occhi.





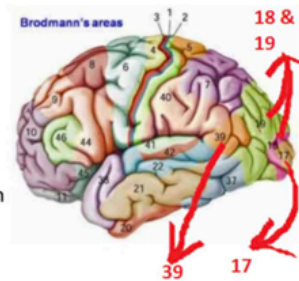
### 3 Via Visiva

Le cellule gangliari portano i segnali visivi generati dalla retina ai nervi ottici nella parte posteriore degli occhi. Dopo essere uscite dagli occhi, i neuroni trasportano i segnali visivi alla corteccia visiva primaria.



La corteccia visiva, in base alle caratteristiche strutturali e funzionali, è divisa in diverse aree.

1. Primary visual area (area 17)
2. Visual association area (area 18 & 19)
3. Higher visual association area (area 39)



#### 3.1 Esperimento di Hubel e Wiesel

David Hubel e Torsten Wiesel, nei primi anni '50, registrarono l'attività neuronale nella corteccia visiva di un gatto mentre spostavano una linea luminosa sulla sua retina. Durante le registrazioni

notarono alcune cose interessanti: (1) i neuroni si attivavano solo quando la linea era in un determinato punto della retina, (2) l'attività di questi neuroni cambiava a seconda dell'orientamento della linea e (3) a volte i neuroni si attivavano solo quando la linea si muoveva in una determinata direzione.

### 3.2 Aree della Corteccia Visiva

- **Corteccia visiva primaria o V1:** conserva la localizzazione spaziale delle informazioni visive, cioè l'orientamento dei bordi e delle linee. È la prima a ricevere i segnali da ciò che gli occhi hanno catturato.
- **Corteccia visiva secondaria o V2:** la sua funzione è raccogliere la frequenza spaziale, la dimensione, il colore e la forma dell'oggetto.
- **Corteccia visiva terziaria o V3:** riceve input da V2. Aiuta nell'elaborazione del movimento globale e fornisce una rappresentazione visiva completa.
- **V4:** riceve anche input da V2. Riconosce forme geometriche semplici e contribuisce al riconoscimento degli oggetti. Non è sintonizzata su oggetti complessi come i volti umani.
- **Area visiva temporale media (MT) o V5:** viene utilizzata per rilevare la velocità e la direzione degli oggetti visivi in movimento, cioè la percezione del movimento. Rileva anche il movimento di caratteristiche visive complesse. Riceve connessioni dirette da V1.
- **Area dorsomediale (DM) o V6:** è utilizzata per rilevare la stimolazione di un campo visivo ampio e il movimento proprio. Come V5, riceve connessioni dirette da V1. Ha una selezione estremamente precisa dell'orientamento dei contorni visivi.

### 3.3 Corteccia Visiva Primaria

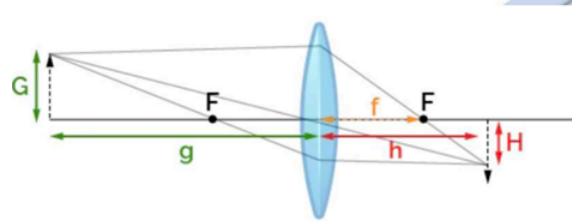
Nella corteccia visiva primaria, sei strati di cellule estraggono informazioni di base sui bordi, la profondità, l'orientamento, il movimento e il colore degli oggetti nel campo visivo. La corteccia visiva primaria è organizzata retinotopicamente, quindi ogni parte del campo visivo è elaborata da una parte specifica della corteccia. Dalla corteccia visiva primaria, due vie trasportano le informazioni alle aree associative visive, dove i segnali visivi vengono ulteriormente interpretati e dotati di significato.

### 3.4 Funzionamento degli Strati nella Corteccia Visiva

Il primo strato è responsabile della rilevazione di linee, bordi, variazioni di luminosità e altre caratteristiche semplici. Le informazioni vengono poi trasmesse al successivo strato, che combina le caratteristiche semplici per costruire rilevatori che possono identificare forme semplici. Il processo continua negli strati successivi, diventando sempre più astratto a ogni livello. Gli strati più profondi saranno in grado di estrarre caratteristiche di ordine superiore come forme o oggetti specifici. Gli ultimi strati della rete integrano tutte queste caratteristiche complesse e producono previsioni di classificazione.

### 3.5 Formazione dell'Immagine nell'Occhio Umano

#### 3.5.1 Lunghezza Focale e Ingrandimento dell'Immagine

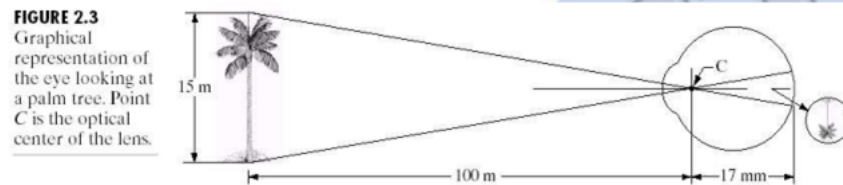


- $f$  = lunghezza focale (focal length)
- Distanza di messa a fuoco (focus distance)  $= d = g + h$
- $h$  = distanza tra l'immagine reale e la lente
- $g$  = distanza tra l'oggetto e la lente

L'ingrandimento (magnification) di una lente è una misura assoluta di quanto l'altezza dell'immagine reale differisce dall'altezza dell'oggetto:

$$\text{Ingrandimento} = \frac{H}{G}$$

L'altezza  $h$  sulla retina è data da:

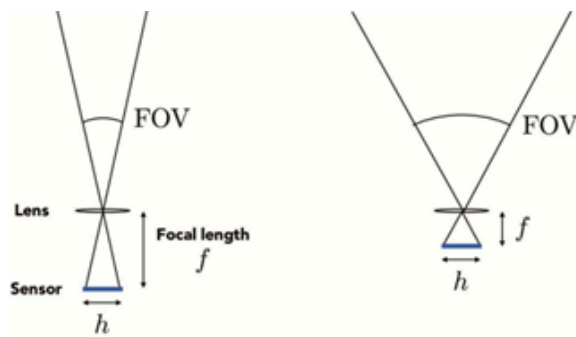


$$\frac{15}{100} = \frac{h}{0,017} \Rightarrow h = 2,55 \text{ mm}$$

I recettori eccitati dalla luce trasformano l'energia radiante in impulsi elettrici successivamente interpretati dal cervello.

### 3.6 Lunghezza focale

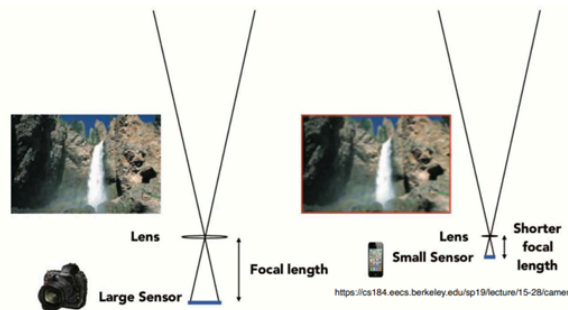
Il centro ottico di una lente è un punto all'interno della lente sull'asse principale. Un raggio di luce lo attraversa senza cambiare direzione. Per una dimensione del sensore fissa, ridurre la lunghezza focale aumenta il campo visivo (FOV). Per mantenere il FOV, è necessario ridurre la lunghezza focale della lente in proporzione alla larghezza/altezza del sensore.



$$\text{FOV} = 2 \arctan \left( \frac{h}{2f} \right)$$

### 3.7 Effetto della dimensione del sensore sul FOV

Se il sensore è più piccolo ma ha gli stessi pixel, la risoluzione è più alta, ma avendo pixel più piccoli si hanno problemi di saturazione. Per questo le camere hanno pixel più grandi, aumentando la dinamica del segnale e riducendo la saturazione.

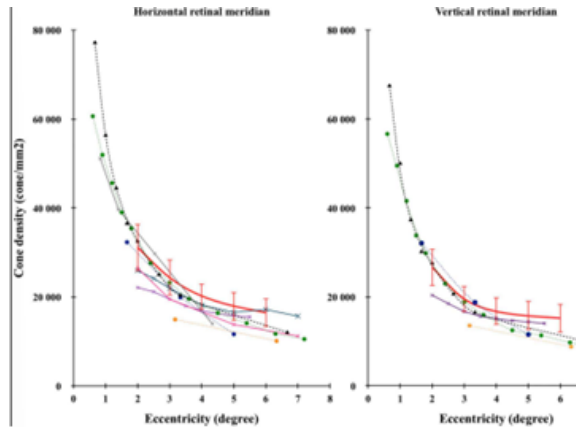


### 3.8 Disposizione dei coni

- Disposizione geometrica dei coni: impacchettamento esagonale
- La densità dei coni diminuisce con l'eccentricità retinica.
- Densità maggiore lungo i meridiani orizzontali rispetto ai meridiani verticali.

### 3.9 Campionamento retinico e acuità visiva

L'acuità visiva (visual acuity) è una misura della risoluzione spaziale del sistema di elaborazione visiva. A 6 metri o 20 piedi, un occhio umano dovrebbe essere in grado di separare contorni distanti



circa 1,75 mm (1 arc min - 60 cicli/degree). I limiti dell'acuità visiva dovrebbero essere coerenti con le dimensioni anatomiche del mosaico dei recettori (teorema del campionamento di Shannon, 1949). La densità dei coni nell'occhio umano implica un limite di Nyquist per il centro foveale di circa 60 cicli/degree. L'ipotesi critica del teorema di Shannon è la regolarità spaziale della griglia di campionamento. La regolarità spaziale nel mosaico dei coni foveali umani è preservata solo su distanze dell'ordine di un decimo di grado. La risoluzione visiva diminuisce rapidamente al di fuori del centro foveale. La base anatomica e fisiologica di questa riduzione non è chiara. La risoluzione è limitata dalla spaziatura dei coni solo al centro foveale. Immediatamente fuori dal centro:

- La risoluzione è peggiore di quanto previsto dalla spaziatura dei coni e si adatta meglio al limite di campionamento delle cellule gangliari retiniche.
- I coni non formano una griglia spaziale perfetta. Recupero dell'immagine da campioni irregolari.

### 3.10 Campionamento retinico

Ci sono due fasi di campionamento:

- I bastoncelli e i coni trasducono la luce in segnali elettrochimici.
- Le cellule gangliari retiniche campionano i segnali dei fotorecettori.

La densità dei fotorecettori diminuisce con l'eccentricità, mentre la densità delle cellule gangliari cala ancora più rapidamente. Ci sono circa 130 milioni di fotorecettori che coprono la retina, e queste informazioni sono ridotte a solo un milione di cellule gangliari.

### 3.11 Distribuzione anatomica di bastoncelli e coni

La distribuzione di bastoncelli e coni sulla superficie della retina ha importanti conseguenze per la visione.

- Al centro della fovea ci sono circa 200.000 coni/mm<sup>2</sup>.

- A meno di  $0,2^\circ$  di eccentricità ci sono 100.000 coni/mm<sup>2</sup>.
- A  $1^\circ$  di eccentricità ci sono 20.000 coni/mm<sup>2</sup>.
- Al margine della retina ci sono 5.000 coni/mm<sup>2</sup>.
- Il 15% della retina è costituito da spazi vuoti tra i coni.

### 3.12 Campionamento dei coni foveali e acuità visiva (Tabella Snellen)

Un'acuità visiva normale corrisponde a una visione di 6/6. Una visione di 6/12 indica una prestazione inferiore (6/12 significa che una persona con visione 6/6 vedrebbe lo stesso optotipo da 12 metri), mentre una visione di 6/3 indica una prestazione migliore. 20/40 corrisponde a 6/12. Bisogna avvicinarsi a 20 piedi per vedere ciò che una persona con visione normale vede a 40 piedi. 20/20 corrisponde a 6/6.

### 3.13 Teorema di Nyquist

La massima frequenza spaziale che può essere rilevata è pari a 1/2 della frequenza di campionamento.

- Spaziatura dei coni foveali 120 campioni/deg
- Frequenza spaziale massima: 60 cicli/deg (6/6 valore medio)
- Visione 20/10 o 6/3 (acuità migliore)

### 3.14 Movimenti oculari

Gli occhi non sono mai completamente a riposo: effettuano frequenti movimenti oculari di fissazione anche quando sono fissi su un punto.

- **Saccadi:** Movimenti oculari rapidi e balistici che cambiano il punto di fissazione foveale. Possono essere di piccola ampiezza, come quelli fatti durante la lettura, o di grande ampiezza quando si guarda attorno a una stanza. Possono essere evocati volontariamente o verificarsi riflessivamente.
- **Movimenti di vergence:** Allineano la fovea di ciascun occhio con oggetti posti a distanze diverse, coinvolgendo la convergenza o la divergenza delle linee di vista.
- **Movimenti vestibolo-oculari:** Stabilizzano gli occhi rispetto al mondo esterno, compensando i movimenti della testa.
- **Movimenti di inseguimento lento:** Movimenti lenti di tracciamento degli occhi progettati per mantenere un oggetto in movimento allineato con la fovea.

### 3.15 Funzione di luminosità

Descrive la sensibilità spettrale media della percezione visiva umana della luminosità.

### 3.16 Effetto Purkinje

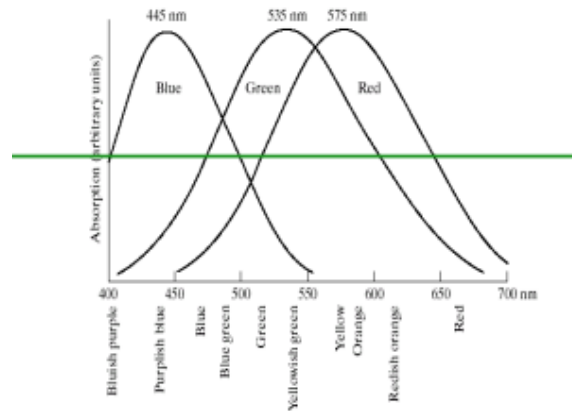
Sensibilità differente dei fotorecettori. Purkinje notò che i suoi fiori preferiti apparivano di un rosso brillante durante un pomeriggio soleggiato, mentre all'alba sembravano molto scuri. Ciò è dovuto alla tendenza della sensibilità luminosa dell'occhio umano a spostarsi verso l'estremità blu dello spettro cromatico in condizioni di bassa illuminazione, come parte dell'adattamento al buio. L'effetto si verifica perché i coni sensibili al colore rispondono meglio alla luce giallo-arancio, mentre i bastoncelli, più sensibili alla luce, rispondono meglio alla luce verde-blu.

### 3.17 Visione dei colori

I colori che un individuo può vedere sono definiti dal numero di diversi recettori di colore presenti nella retina. I cani hanno solo due coni recettori di colore: blu e giallo. The eyes of the peacock mantis shrimp contain 16 color-receptive cones. This means that peacock mantis shrimp can see colors that humans could never even perceive. It can see ultraviolet light and linear polarized light and circular polarized light peacock mantis shrimp, *Odontodactylus scyllarus* Gambero mantice. The response of our visual system is effectuated by the presence of only three types of cones, it is not possible to analyze the spectrum in detail. Color is not a property of electromagnetic radiation, but a feature of visual perception by an observer. There is an arbitrary mapping between wavelengths of light in the visual spectrum and human experiences of color.

### 3.18 Metamerism

Metamerism is a phenomenon that occurs when two colours appear to match under one lighting condition, but not when the light changes. Metamerism occurs because each type of cone responds to the cumulative energy from a broad range of wavelengths, so that different combinations of light across all wavelengths can produce an equivalent receptor response. Using a spectrophotometer, you can measure how much light a target reflects across the spectrum. The resulting reflectance data is that color's "fingerprint". The green line crosses two times the graphic for the blue, green and red. It means that there are two wavelengths that have the same absorption for blue, green and red.



### 3.19 Color constancy

A feature of the human color perception system which ensures that the perceived color of objects remains relatively constant under varying illumination conditions. Objects tend to always appear the same color even though the lighting conditions change (doing so makes survival easier). A green apple looks green to us at midday, (white sunlight), and also at sunset (red illumination). Land's Retinex ("retina" and "cortex") theory, both the eye and the brain are involved in the color. Research suggests color constancy to be related changes in retinal cells as well as cortical areas related to vision

### 3.20 Land's Retinex Theory

"The visual system includes three separate eye-brain systems called retinexes, each with a peak sensitivity to long-wave light, medium-wave light, or short-wave light and inhibitory effects on the other systems. These assign a colour to each spot in the visual field according to the ratio, for each of the three retinexes, of light reflected from that spot to the average of the light reflected from its surround. The resulting triplet of ratios uniquely defining the colour at each spot." We have two main mechanisms involved in this process:

- **Spatial contrast:** The Retinex compares the 'red' light reflected from a surface with the spatial average of 'red' light reflected from surrounding surfaces, and then does the same for the green and blue
- **Color memory:** If you recognise a particular object as a banana, you may remember its typical yellow colour, and use any deviations from this memory colour to determine the illumination colour and then correct the colours of other objects.

### 3.21 Land's experiment(1974)

Land used a color collage made up of patches of different colors (red, green, blue, etc.) but carefully controlled the illumination on the patches. He illuminated these patches using red, green, and blue lights and could vary the intensity of each light. In one version of the experiment, he projected light of only a single color (e.g., red) onto the entire collage. Despite the fact that the only wavelength of light reaching the eyes was red, people still saw some patches as green, blue, or yellow. This indicated that color perception wasn't simply a matter of the wavelength of light entering the eye but was influenced by the brain interpreting the color based on the context. In another part of the experiment, Land used red, green, and blue lights in different combinations, mixing them in different intensities across the collage. He found that even though the spectral composition of the light reflected by each patch varied, observers consistently perceived the patches as having the same color under different lighting conditions. From these experiments, Land proposed the Retinex theory. The major findings of these experiments were, as said before, the color constancy and the contextual influence.

### 3.22 Spectroradiometer and Colorimeter

These are the definitions:

- **Spectroradiometer:** provides the reflectance spectrum of the observed surface.



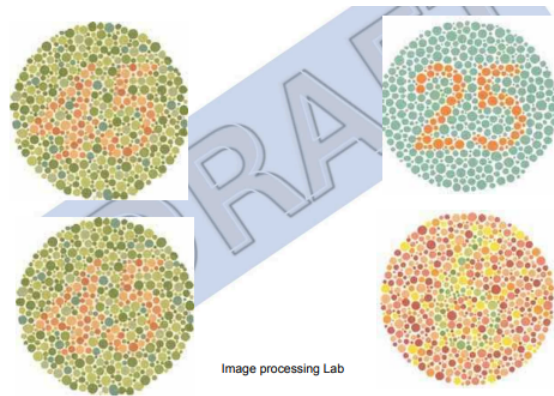
- **Colorimeter:** reflected light is analyzed by three different photocells sensitive to short, medium and long wavelengths. It does not detect metamerism

### 3.23 Dyschromatopsia (color blindness)

A condition in which the ability to perceive colors is not fully normal

- **Protaunopia:** there are no working red cone cells.
- **Deuteranopia:** there are no working green cone cells
- **Tritanopia:** lack of blue cone cells

We can recognize colour deficiency with the Ishihara test

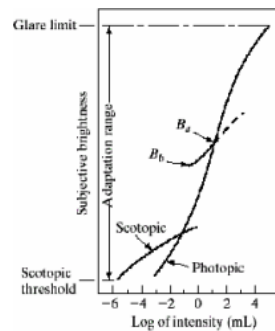


The total confusion between red and green is the most common form of color blindness.

### 3.24 Subjective brightness

The range of intensity levels at which the eye can adapt is enormous, of the order of  $10^{10}$ , from the scotopic threshold to the limit of glare.

The subjective brightness (i.e. the brightness perceived by the human visual system) is a logarithmic function of the intensity of the light incident on the eye.

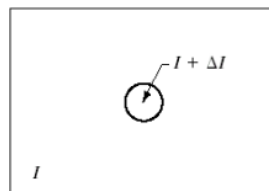


It is important to note that the eye does not work simultaneously on the full range of levels. Rather, the system goes through a series of levels of adaptation to the intensity of light.

If the eye is, under certain environmental conditions, at the level of adaptation  $B_a$ , the range of the levels that it can discriminate is only that indicated by the short curve, which has  $B_b$  as the limit below which no stimulus produces a different sensation from black. The dashed portion indicates that at levels higher than  $B_a$  the eye actually moves to a higher level of adaptation. The ability of the eye to discriminate between changes in brightness at different levels of adaptation is very important. A useful quantity, in quantitative terms, is the so-called Weber ratio

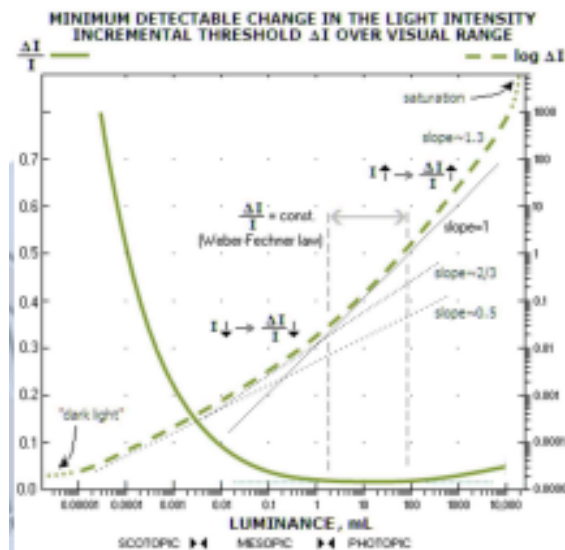
### 3.25 Weber ratio

Experiment to determine the ability of the eye to discriminate levels of brightness: at the centre of a uniformly illuminated area (intensity  $I$ ) that covers the entire visual area, an intensity increment ( $\Delta I$ ) is applied in the form of a short-term circular spot.  $\Delta I$  is increased until it is perceived 50 percent of the time by the observer.



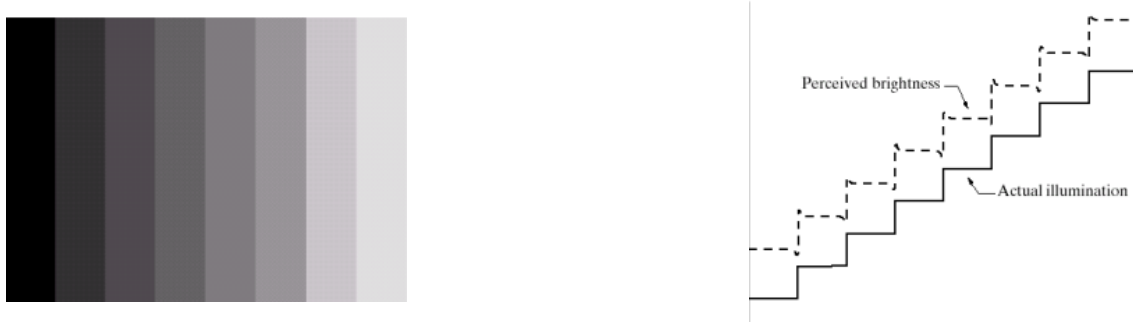
$I$  is the intensity to which the eye is adapted  
 $\Delta I$  is the increase in that intensity

A small value of  $\Delta I/I$  means that a small percentage variation of intensity is discriminable (therefore a good ability to discriminate variations). Differently, high values of Weber's report indicate the need for strong variations in brightness, so that the variations themselves are noticeable. The discrimination capacity improves as the lighting level increases (from rods to cones).



Basically, it tells us how much light intensity difference  $I$  we can perceive starting from a given value  $I$ . Human eyes can detect little differences in low light conditions, while the difference increases in strong light conditions.

The perceived brightness is not just a function of intensity. The human visual system tends to "get confused" at the border between zones of different intensity. Although in strips the intensity is constant, the sensation is of a pattern of variable luminosity, particularly at the border between the stripes.



### 3.26 Cornsweet effect

The brain tends to "fill in" and exaggerate the contrast from the edges into the surrounding areas, creating a false perception of brightness differences. In a typical Cornsweet illusion image, two large regions may seem to have very different levels of brightness at a glance. However, if you cover the edge between the regions (where the slight gradient is located), you'll see that the two regions are almost identical in brightness. The contrast illusion occurs only because of the enhancement of the luminance change at the boundary.

### 3.27 Simultaneous contrast

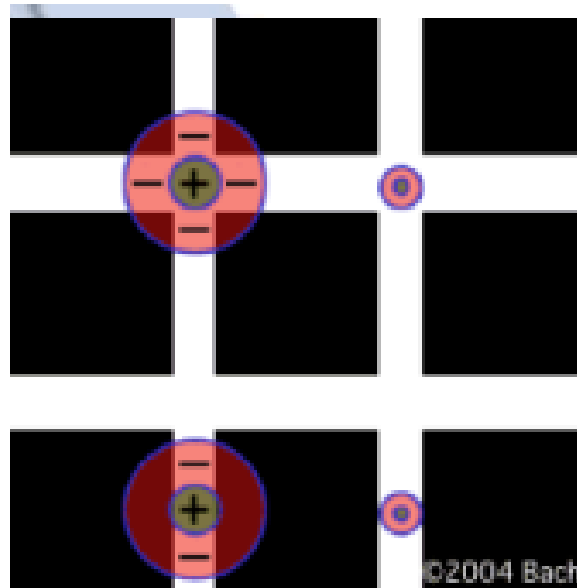
The context contributes to determining the brightness of a region. The squares have the same intensity, but the one on a dark background appears lighter than the one on a light background. They only appear the same when they are in contact.



**FIGURE 2.8** Examples of simultaneous contrast. All the inner squares have the same intensity, but they appear progressively darker as the background becomes lighter.

### 3.28 Lateral inhibition

The most active cells "switch off" the sensitivity of the neighboring ones, making them less active. The result is that the signal of one side of the border between black and white is amplified, while the one on the other side decreases, creating a greater contrast than what actually exists. An example of this phenomenon is the Hermann Grid.



Your retina is partially composed of many small nerves, which function as receptors of light. It was discovered that if you illuminate a single receptor (A) you will get a large response; however, when you add illumination to A's neighbors, the response in A decreases. In other words, the illumination of the receptors "inhibits" the activation of nearby receptors.

In the case of the Hermann grid, there is light coming from the four sides of the intersection, but from only two sides of a band going away from the intersection. The region viewing the intersection is more inhibited than the region of the band going away. Thus the intersection appears darker than the other section.

Why don't we see the patches when we look right at them? In the fovea the receptive fields are much smaller (see the small reddish disks on the right of the left figure). With such small receptive fields it obviously does not matter whether they are at the crossings or not.

### 3.29 Color contrast

The color depends on the context. If the background is dark, the color becomes lighter. If the background is clear, the color becomes darker.

### 3.30 Color assimilation

Based on the color of the background, I distinguish a different color on the stripes that cross the balls.

### 3.31 Kirschmann's (1891) formulation of color contrast

- The smaller the test area, the larger the effect.
- Color contrast occurs even if there is a spatial gap between the two fields. But the larger the gap, the smaller the effect.
- The effect is maximum when brightness contrast is absent or weak.
- The larger the size of the inducer, the larger the effect.
- The higher the saturation of the inducer, the larger the effect

### 3.32 Illusions

A visual stimuli that is perceived by the eyes and then comprehended by the brain in a way that is different from reality. A cognitive illusion happens when the brain perceives an object based on prior knowledge or assumptions.

- **Optical Illusions:** the brain wants to understand these images based on other images it has seen before, it creates its own version of these images
- **Multistable perception:** Image too ambiguous for one interpretation
- **Literal Optical Illusions:** is an image created by smaller images that are not related to the larger, overall image created
- **Physiological illusions:** The theory is that stimuli have individual dedicated neural paths in the outer visual cortex of an organism for the early stages of visual processing; repetitive stimulation of only a few channels misleads the visual system.
- **Pareidolia:** The brain detects a face or something similar to a human when there isn't.

### 3.33 Troxler's fading:

If we could perfectly fixate on some point in our visual field by suppressing saccadic movement, a static scene would slowly fade from view after a few seconds due to the local neural adaptation of the rods, cones and ganglion cells in the retina. Any constant light stimulus will cause an individual neuron to become desensitized to that stimulus, and hence reduce the strength of its signal to the brain.

### 3.34 Gestalt theory of perception

*"The whole is greater than the sum of its parts."* (what this actually means is the whole exists independently from the component parts.)

The Gestalt Principles are a set of laws arising from 1920s' psychology, that describe (but do not explain) how humans typically see objects by grouping similar elements, recognizing patterns and simplifying complex images. These principles try to explain when and how our minds perceive different visual components as being part of the same group. Forms are detected on the basis of

innate perceptive laws, related to the nervous system behaviour.

The main idea is that when we perceive the world there are many different signals coming in at the same time, but we organize them as unitary forms or groups. How does your mind automatically perceive the face of a person you know well? (his face is made up of the same core features as any other: nose, ears, eyes, etc.) Your mind makes sense of several features as a whole.

The ability to perceive an object is related to the ability of the nervous system to "process" and not to a banal image focused by the retina

The perception is organized, in an unconscious way, through processes of imitation, learning and sharing and some rules of organization of the perceived data.

### 3.35 Gestalt Laws of perceptual

Your brain is always trying to make sense of the world by comparing previous experiences or visual patterns. The Gestalt principles attempt to describe how people perceive visual elements when certain conditions apply. The main laws of organization of perceived data are:

- **Simplicity:** Every stimulus is perceived in its most simple form: More regular, symmetrical, cohesive, homogeneous, balanced, simple, concise they are, the greater the probability they have of imposing to our perception.
- **Proximity:** Objects or shapes that are close to one another appear to form groups. The elements of the visual field are united in forms with greater cohesion the smaller the distance between them. We can use the Proximity principle in UI design for grouping similar information, organizing content and decluttering layouts. Its correct use will have a positive impact on visual communication and user experience. Items that are related should stay close to each other, while the unrelated items should stay further apart.
- **Similarity:** Elements sharing similar visual characteristics are perceived to be more related than those not sharing similar characteristics. There are different ways of making elements perceived as being similar, and thus, related. These include similarity of colour, size, shape, texture, dimension, and orientation. Using elements, colors or symbols that visually link information to another helps to make a site with large amounts of content accessible and easily navigable.
- **Common Fate:** The lines with the same direction or orientation or movement, tend to unify according to the most consistent trend, in defense of the simplest and most balanced forms.
- **Law Of Closure:** Things are grouped together if they seem to complete some entity. Our brains often ignore contradictory information and fill in gaps in information.
- **Law Of Continuity:** Points that are connected by straight or curving lines are seen in a way that follows the smoothest path.
- **Figure-Ground:** The "figure" is the element in focus, while the "ground" is the background behind the figure. two related principles: -Area: The mind often perceives the smallest object in the composition as the figure, and the larger as the ground.  
-Convexity: Convex elements are associated with figures more often than concave.

## 4 Sensors and Acquisition

There are a few characteristics that define a sensor:

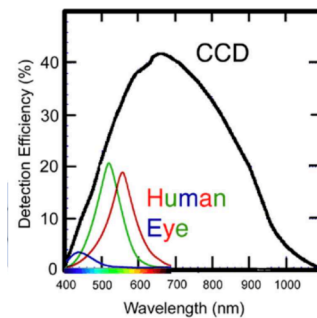
- Quantum efficiency
- Spectral sensitivity
- Reciprocity failure
- Logarithmic compensation
- Demosaicing
- Dark current

### 4.1 Quantum efficiency

A CCD sensor transforms the photons that hit it during the exposure into electrons. The ratio between the number of electrons produced and the number of incident photons is called quantum efficiency: for example, a quantum efficiency of 0.5 (50 %) indicates that the sensor generates and stores one electron every two incident photons.

### 4.2 Spectral Sensitivity

Spectral sensitivity is the ability of a sensor to respond to different wavelengths of electromagnetic radiation, including visible light, infrared, and ultraviolet light. Cameras can acquire also to wavelengths of 1000 nm, so we always apply a IR filter on the camera, avoiding to capture something that human eye can't see.

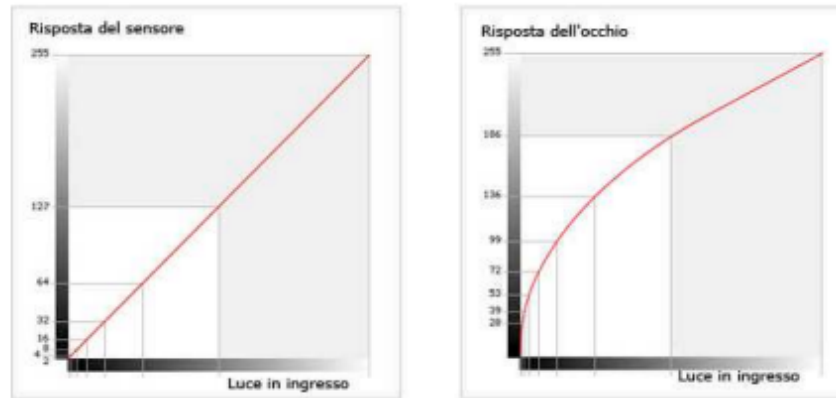


### 4.3 Reciprocity failure

The quantum efficiency of the CCD remains constant regardless of the shutter speed, while that of the photographic emulsion decreases with increasing exposure time (reciprocity failure). This is only for older cameras, with mechanical sensor.

## 4.4 Logarithmic compensation

The eye photoreceptors have a sensitivity that varies with intensity in a logarithmic way, so we have the perception of a very wide range of signal levels. CCDs have a linear behaviour based on counting photons, so they need logarithmic compensation.



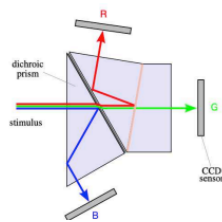
## 4.5 Sensor for color image

The majority of color cameras are equipped with a single sensor array. The surface of such a sensor is covered by a color filter array (CFA), which consists in a mosaic of spectrally selective filters, so that each element samples only one of the three color components Red (R), Green (G) or Blue (B). To estimate the color (R,G,B) of each pixel in a true color image, one has to determine the values of the two missing color components at each pixel in the CFA image. This process is commonly referred to as CFA demosaicing, and its result as the demosaiced image.

## 4.6 Mono-CCD technology outline

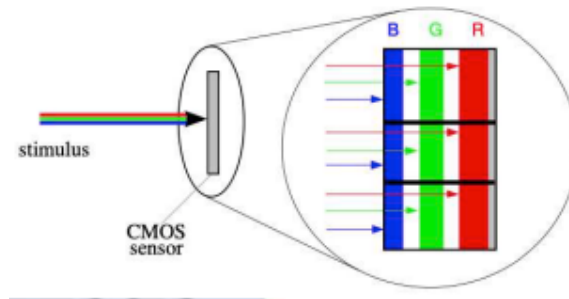
I can have different kind of technologies to have a color image:

- **Dichroic prism:** The ray of light is splitted into component for red, green and blue and each component goes to a specific sensor. The green passes straight.

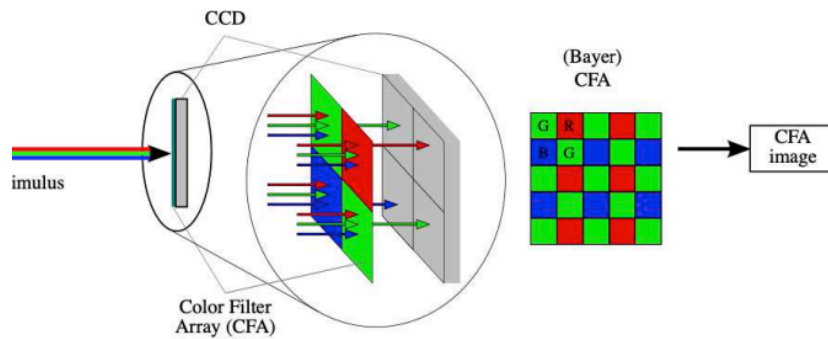




- **Layered sensor:** We have three layers in the sensors, one for each component of the ray of light.

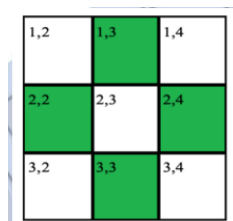


- **Bayer Color Filter:** For each pixel, I have info for only one component. I have more green pixels because the human eye is more sensible to green. The distribution, in a 10 million pixel image, is 2.5 million pixels for red, 2.5 for blue and 5 million for green



## 4.7 Demosaicing

For Bayer filter, we need to do an interpolation between the values of neighbours pixel in order to have a color image with realistic colors. This interpolation is called *Bilinear interpolation*. For green we have:



$$G(2,3) = \frac{1}{4}G(1,3) + \frac{1}{4}G(2,2) + \frac{1}{4}G(2,4) + \frac{1}{4}G(3,3)$$

For red and blue we have: Bilinear interpolation, acceptable only in areas of uniform color,

1,2	1,3	1,4
2,2	2,3	2,4
3,2	3,3	3,4

$$R(2, 2) = \frac{1}{2} [R(1, 2) + R(3, 2)]$$

$$R(2, 4) = \frac{1}{2} [R(1, 4) + R(3, 4)]$$

$$R(1, 3) = \frac{1}{2} [R(1, 2) + R(1, 4)]$$

$$R(3, 3) = \frac{1}{2} [R(3, 2) + R(3, 4)]$$

$$R(2, 3) = \frac{1}{4} [R(1, 3) + R(2, 2) + R(2, 4) + R(3, 3)]$$

introduces many errors along the contours and in high frequency areas. An example is *Zipper Effect*



Each 2x2 array of red, green and blue can be considered as a single full color pixel halving the resolution in both the horizontal and vertical directions.

#### 4.8 Foveon vs Bayer based sensor

Each of the three Foveon layers responds to the whole visible light spectrum albeit non-linearly. The "RGB" designations refer to the point of maximum QE for each layer. There is no color filter, Foveon requires quite severe raw-to-RGB conversion algorithms (slow and noisy).

Foveon stacked layers are not transparent and lead to a light loss (the bottom layer receives less light). To compensate for this drawback, Foveon sensor pixel is larger than pixel in high end Bayer sensors. So, Foveon sensors need good exposure and under or over exposure leads to poor results. Furthermore, Raw files are very large.

Bayer type sensor is inherently more sensitive to light for all colors. This means that these cameras will be more sensitive to light and inherently less noisy. Sensors have a single sensitivity, higher ISO levels are created by amplifying the signal. A noisy signal can't be amplified as much as a

signal that is cleaner, so this limits the effective maximum ISO that can be used.

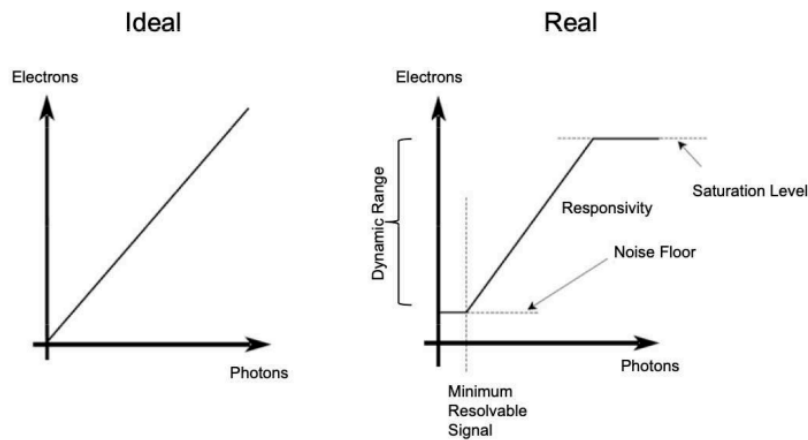
In Foveon, the quality is more "accurate" simply because the Foveon conversion to RGB does not involve interpolation "demosaicing". There is no AA filter over the sensor because there is no color aliasing. However there is still luminance aliasing that could be quite visible, if well-focused with a sharp lens.

Foveon X3 has a ratio of 01:01:04 between the number of pixels for red, green and blue, respectively. The top layer captures brightness and color information (luminance and chrominance), while the last two layers acquire only color information.

## 4.9 CCD Sensor Noise

These are the characteristics of ideal image sensors:

- Infinite number of pixels
- No sensor noise
- Infinite dynamic range
- High (spectral) responsivity
- Infinite high frame rate
- Zero energy consumption
- Low manufacturing cost



The more pixel I have, the higher is the saturation level. The dynamic range is the range between the noise floor (minimum detectable signal) and the saturation level (maximum signal). We need a minimum signal in order to convert the photons in voltage, that is the Minimum resolvable signal. The Noise floor is due mainly to thermal noise, produced by the sensor itself.

Maximum signal can be intended as the full-well capacity (electrons) or as the saturation signal

(mV). The minimum signal is intended as the noise floor electrons, as the noise equivalent illumination or the minimum illumination.

For CCD sensors, and image sensors in general, is considered as noise everything which does not correspond to the image. There are many and various origins: conversion of the charge into voltage, thermal effects, overflow of the wells on the neighbours, etc.

## 4.10 Perception of noise

Perception based differentiation of noise in image sensors:

- **Random noise:** Location and time of occurrence not predictable (not so bad cause our eyes can average the values). It can also enhance the quality of the image because of the average from the eyes.
- **Fixed pattern noise (FPN)**

Perception in still imaging:

- Underexposed images contain more visible noise due to proximity to noise floor
- Random noise averaged by eye
- Stationary noise more noticeable
- Random noise of 5
- Noise less noticeable at high temporal frequency
- Noise less noticeable at high spatial frequency

## 4.11 Quantifying FPN

FPN (also called nonuniformity) is quantified by the standard deviation of the spatial variation in pixel outputs under uniform illumination due to device and interconnect parameter variations (mismatches) across the sensor. It is fixed for a given sensor, but varies from sensor to sensor. It is typically reported as a % of voltage swing (or well capacity). Experimentally, FPN is measured as follows:

1. Set a constant uniform illumination level (including no illumination)
2. Take many images
3. For each pixel compute the average output value (to average out temporal noise)
4. Estimate the standard deviation of the average pixel values
5. Repeat the procedure for several uniform illumination levels

FPN consists of:

- **DSNU (Dark Signal Non-Uniformity):** offset from the average across the imaging array at a particular setting (temperature, integration time) but no external illumination.
- **PRNU (Pixel Response Non-Uniformity):** ratio between optical power on a pixel versus the electrical signal output.

#### 4.12 DSNU - Dark Signal Non-Uniformity

DSNU is seen as an offset between pixels in dark and is corrected by subtracting a dark frame (an image that is taken in complete darkness conditions. The dark frame should have the same exposure time as the raw image). It is measured in the absence of light and is defined as the peak-to-peak difference between the minimum and maximum measured values for all active pixels in the array (measured with sensors in the darkness).

#### 4.13 PRNU - Pixel Response Non-Uniformity

Deviations between pixels with a fixed gain applied. This is caused by the fact that individual pixels have different sensitivity curves, so we have a responsivity variation between pixels under illumination. It is corrected by offset and gain for each pixel (FFC, Flat Field Correction). Increases with illumination, but causes more degradation in image quality at low illumination.

#### 4.14 Flat Field Correction (FFC)

Flat Field Correction (FFC) is a technique for reducing the effects of sensor pattern noise (FPN Fixed Pattern Noise, and PRNU – Photo-Response NonUniformity) and lighting non-uniformities due to the differences of light sensitivity between the pixel sensors of a camera and the differences in the transmission of light through the lens (for instance: vignetting, that is the difference in brightness in the center of the image or in the corner). This correction is achieved by applying the following operation to each pixel of the raw image:

$$\text{CorrectedPixel} = (\text{RawPixel} - \text{Offset}) \times \text{Gain}$$

where both Offset and Gain coefficients are specific values for each pixel evaluated by a calibration procedure. The calibration procedure is as follows:

- **Dark Image Acquisition:** acquire several dark images and compute the average response for each pixel of the array. The Offset coefficient for each pixel, is actually the pixel value of the Dark Image (dark-frame subtraction).
- **Flat Image Acquisition:** Place a uniform target wide enough to cover the whole field-of-view. Adjust the lens aperture and the illumination intensity to obtain the brightest possible image providing that no pixels are saturated. Acquire several images and compute the average response for each pixel of the array.

So we can calculate the gain coefficient:

$$\text{average(Flat)} - \text{average(Dark)} = (\text{FlatPixel} - \text{DarkPixel}) \times \text{Gain}$$

$$\text{Gain} = \frac{\text{average(Flat)} - \text{average(Dark)}}{\text{FlatPixel} - \text{DarkPixel}}$$

## 4.15 Sensor Calibration

We can define the bias as follows: *“The bias level of a CCD frame is an artificially induced electronic offset which ensures that the Analogue-to-Digital Converter (ADC) always receives a positive signal. All CCD data has such an offset which must be removed if the data values are to be truly representative of the counts recorded per pixel”.*

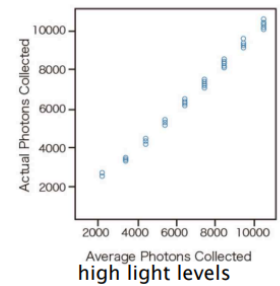
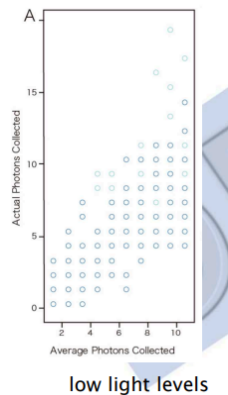
If objects are often very weak, their signal at the end of the exposure could still be overwhelmed by electronic noise and thus lead to a truncation of the result by the A/D converter (zero sum between signal and noise). Adding offset to the signal before conversion, we obtain a number that will always exceed that of the electronic noise. The offset value must be high enough to produce the desired effect (avoid data truncation), but not excessive as it would actually reduce the dynamic range of our camera.

## 4.16 Shot Noise (Photon Noise)

A source for sensor noise is the light itself. The detection of photons by the CCD is a statistical process. If images are taken over several (equal) time periods, then the intensity (the number of photons recorded) will not be the same for each image but will vary slightly. The deviation in intensity found for each image follows the Poisson distribution (the square root of the signal intensity measured).

$$\sigma_{\text{shot}} = \sqrt{S} \quad (1)$$

So a 10,000 electron exposure will have a shot noise of 100 electrons. This implies that the best signal-to-noise ratio possible for a 10,000 electron signal is  $10,000/100 = 100$ . The shot noise is related to the discreteness of photons and electrons. Photons are quantum particles, that they can only come in whole numbers and the sensor can never collect fractions of photons. Because of this and random statistical fluctuations, when collecting photons from an unvarying source over a set amount of time (a set of random equal intervals) it is highly unlikely to collect the same number of photons every single time.



### 4.17 Dark Current and Thermal Current

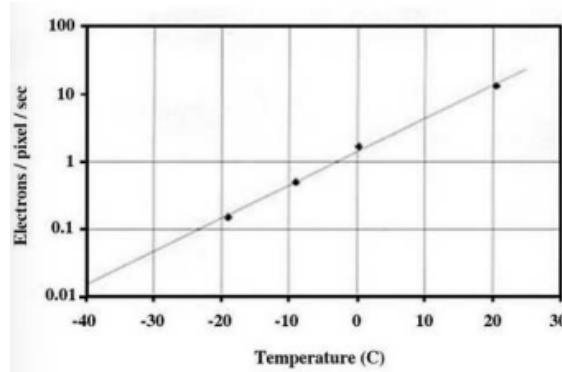
The CCD output is proportional to the exposure,

$$\text{Exposure} = \text{ER} * T_{\text{int}} \quad (2)$$

The output signal can be enhanced by increasing the integration time  $T_{\text{int}}$ . Long integration times are generally used for low light level applications. This approach is limited by the generation of dark current, which is integrated such as photocurrent.

CCDs spontaneously produces and accumulates electrons, even when their surface is shielded by incident light. Dark current is the result of imperfections or impurities in the depleted bulk silicon or at the silicon-silicon dioxide interface that provide a path for valence electrons to sneak into the conduction band, adding to the signal measured in the pixel. The generation of dark current is a thermal process wherein electrons use thermal energy to hop to an intermediate state, from which they are emitted into the conduction band.

The Dark Current produced depends on the temperature of the sensor: it generally decreases by a factor of 2 for every 6 ° C. The simplest way to reduce the dark current is to cool the CCD as dark current generation is temperature related.



This phenomenon is perfectly reproducible. In identical conditions of temperature and duration of an exposure, a given sensor always generates the same number of electrons (less than a statistical dispersion factor, Thermal Noise). To handle noisy photographs, camera acquires a second photograph right after the exposure with similar conditions (ISO, shutter speed) without light exposure so it can detect noisy pixels and adjust them.

### 4.18 Dark Noise

Dark noise is statistical variation in the number of electrons thermally generated within the pixel in a photon-independent fashion. It is the electron equivalent of photon shot noise.

$$\text{Dark noise} = \sqrt{\text{Dark current} * \text{Integration time}} \quad (3)$$

### 4.19 Readout Noise

Read noise is created within the camera electronics during the readout process as the electrons are subjected to the analog to digital conversion, amplification and processing steps that enable an

image to be produced.

Readout noise is the accuracy with which we can read the number of photons that were captured. This is a constant number, which depends on the sensor. Read-out noise increases in proportion to read-out speed.

**Example:** set the Rn to  $\pm 100$  We do the 30 s at ISO 100 exposure and the sensor has registered 10,000 photons. Then the readout may then be anywhere between 9,900 and 10,100. The signal-to-noise ratio is  $10000/200=50$  (noise level is 2%). Now we do a ISO 10,000 exposure. Since we only expose the sensor one hundredth as long, we only capture 100 photons. The readout noise remains the same so the readout can be anywhere between zero and 200 photons, In this case, the signal-to-noise ratio is  $100/200 = 0.5$  the noise completely overwhelms the signal.

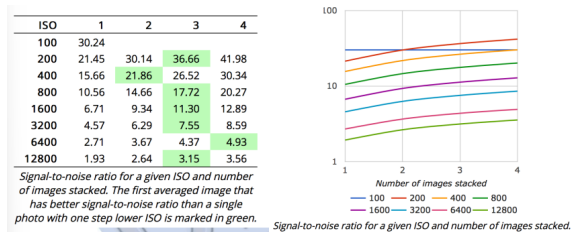
## 4.20 Image Stacking

Taking photos of the starry sky (fixed mount), if the exposure time is short there are no star trails:

- increase the sensor gain (ISO) increasing the noise too
- increase the exposure time with a lower ISO and thus with lower noise levels, but the sky will be smeared out due to the rotation of the Earth.

The rule of thumb is that the maximum exposure time for full frame cameras should be "600 / focal length".

How many exposures at a given ISO do I need to average to get the same noise level as I get at ISO 100?



Stacking is a term for adding/averaging multiple images together to reduce apparent noise (improve the signal-to-noise ratio) of the combined image. The signal-to-noise ratio, or S/N, increases by the square root of the number of images in the stack.