

# Sistema visivo umano

---



Politecnico  
di Torino



ig

# Sistema visivo umano

---

- Il sistema percettivo umano comprende
  - ◆ Percezione visiva
  - ◆ Percezione uditiva
  - ◆ Percezione tattile
  - ◆ Percezione gustativa
  - ◆ Percezione olfattiva
- I sistemi di Realtà Virtuale cercano oggi di ricreare i diversi sensi: il più importante resta la vista
- Il compito della Computer Graphics è quello di creare immagini ed animazioni per gli esseri umani
- Risulta quindi essenziale capire come funziona il sistema visivo

# Sistema visivo umano

---

- Influenzato da diversi fattori percettivi
  - ◆ Percezione del colore
  - ◆ Acutezza o acuità visiva (visus), capacità dell'occhio di risolvere e percepire dettagli fini
  - ◆ Percezione della profondità (tridimensionalità)
  - ◆ Percezione dei livelli di luminosità
  - ◆ Sensibilità alle variazioni temporali
  - ◆ Campo visivo (field of view, FOV)
- Sistema estremamente complesso
  - ◆ Dati grezzi forniti dagli occhi sono pesantemente elaborati dal cervello
  - ◆ Molti dei dettagli di questa elaborazione sono tuttora sconosciuti

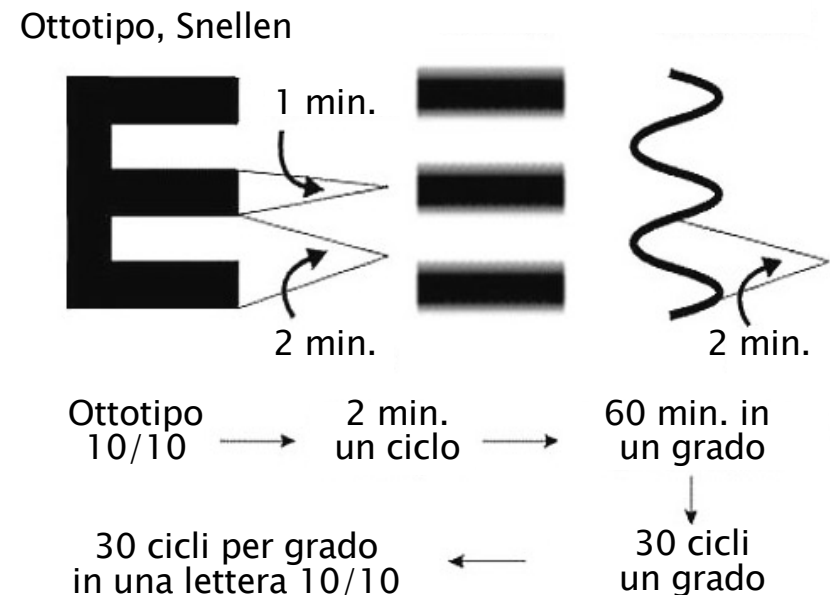
# Risoluzione spaziale

---

- Diversi aspetti, es. acutezza di visibilità, di allineamento, di riconoscimento (tavola ottotipica)
- Acutezza di risoluzione
  - ♦ Definita come la capacità dell'occhio di percepire (discriminare) i dettagli fini di un oggetto
  - ♦ Inverso delle dimensioni angolari minime che un oggetto deve avere per poter essere percepito correttamente
- Fondamentale per la progettazione dei dispositivi di output grafici
  - ♦ Produrre pixel più piccoli della risoluzione spaziale sarebbe particolarmente costoso (ed inutile)
- Dipende anche dalla luminosità e dal contrasto

# Risoluzione spaziale

- Osservabile sperimentalmente
  - ◆ Guardando un pattern composto di righe bianche e nere alternate sino a quando queste non scompaiono
- Risultato
  - ◆ Limite di 60 cicli/grado, ovv.  $\frac{1}{2}$  min d'arco (la piena ha un diametro di circa trenta minuti o mezzo grado)
  - ◆ Corrispondono a 600 dpi a 12" o 300 dpi a 24"
  - ◆ Ruolo della distribuzione dei recettori



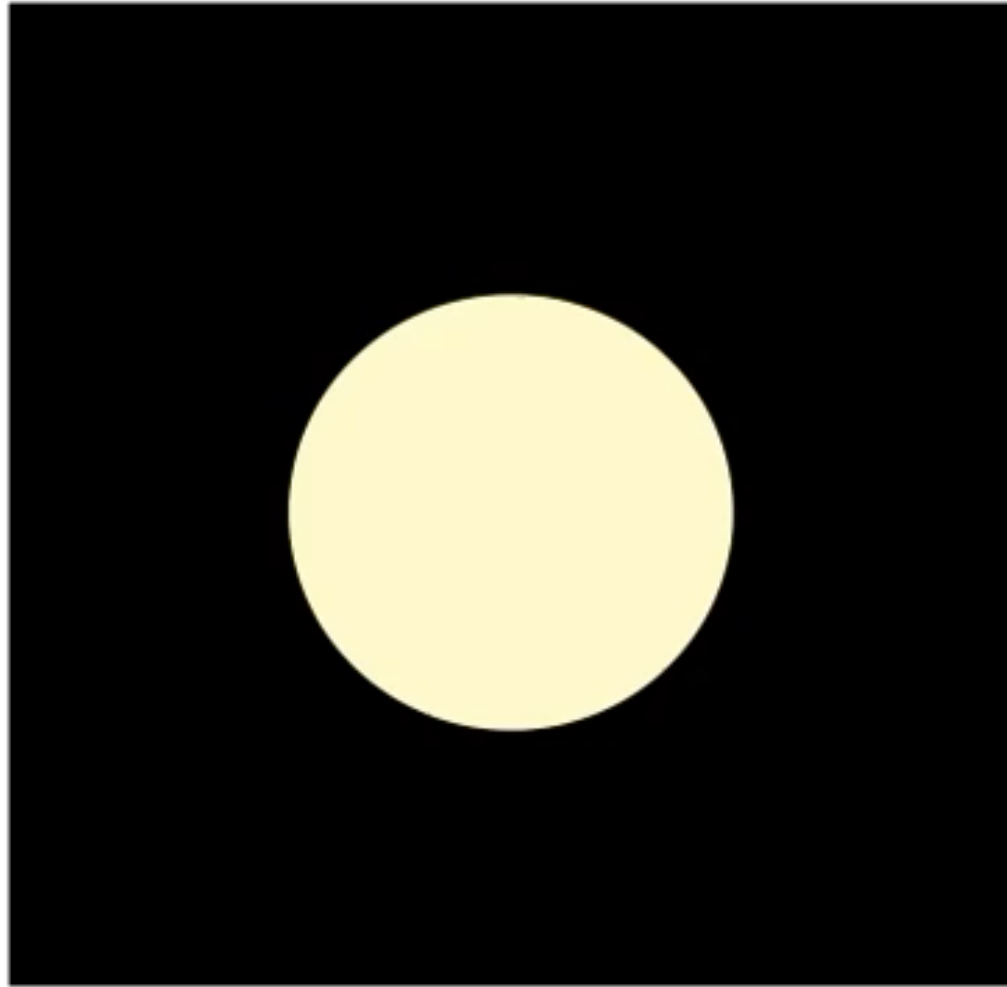
# Risoluzione spaziale

---

- Per avere la risoluzione dell'occhio umano, uno schermo da 20" (orizzontali) a 24" dall'osservatore dovrebbe avere circa 6000x6000 pixel
  - ◆ La risoluzione degli schermi è comunemente di circa 70–100 dpi
  - ◆ Schermi “retina” posseggono risoluzioni superiori, es. Apple iPhone 6 Plus (401 dpi), iPad (264 dpi), iMac 5K (218 dpi)
  - ◆ Le stampanti hanno una risoluzione tipica di 300–600 dpi
  - ◆ Le più alte risoluzioni spaziali sono comuni nelle macchine per la foto-composizione, 2500 dpi e oltre

# Risoluzione temporale

---



# Risoluzione temporale

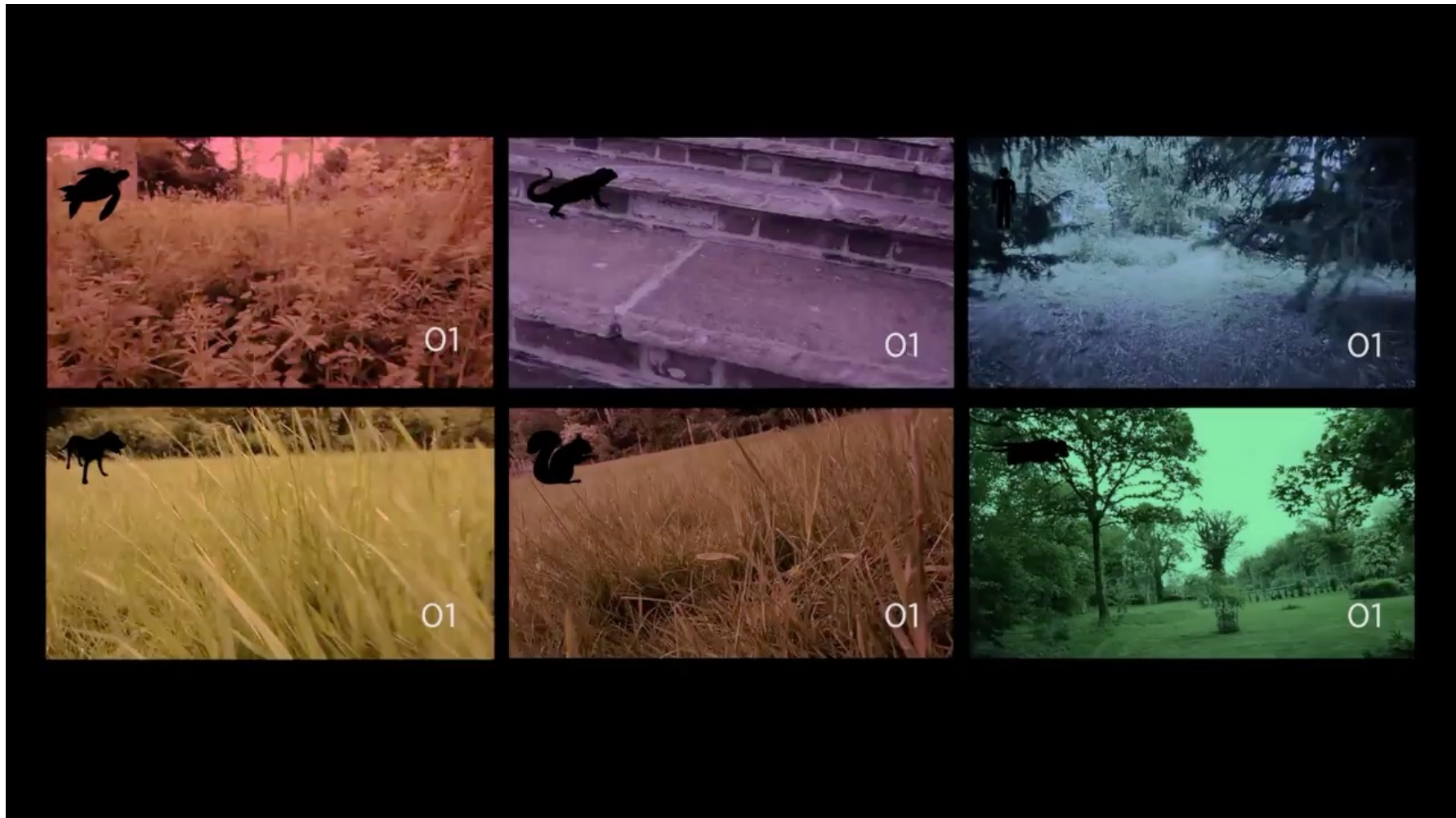
---

- Frequenza critica di fusione (del **flicker**), CFF
  - ◆ Frequenza sopra la quale l'osservatore medio non è in grado di osservare variazioni dovute ad uno stimolo luminoso intermittente (al di sotto di questa frequenza, l'occhio umano percepisce uno **sfarfallio**)
  - ◆ CFF dipende da diversi fattori: luminosità dello schermo, luce ambiente, posizione nel campo visivo, 35–60 Hz
- Due aspetti
  - ◆ Immagini senza sfarfallii (**refresh rate**)
    - Cicli di attiv./disattivazione delle tecnologie di visualizzazione
    - La frequenza di aggiornamento deve essere superiore a CFF (es. 60 Hz per schermi CRT, fino a valori molto più elevati)
  - ◆ Animazioni fluide, da sequenza di immagini (**frame rate**)
    - La frequenza di aggiornamento deve essere superiore a CFF (es., 24 Hz, fotogrammi proiettati due/tre volte, 48/72 Hz)



# Risoluzione temporale

---



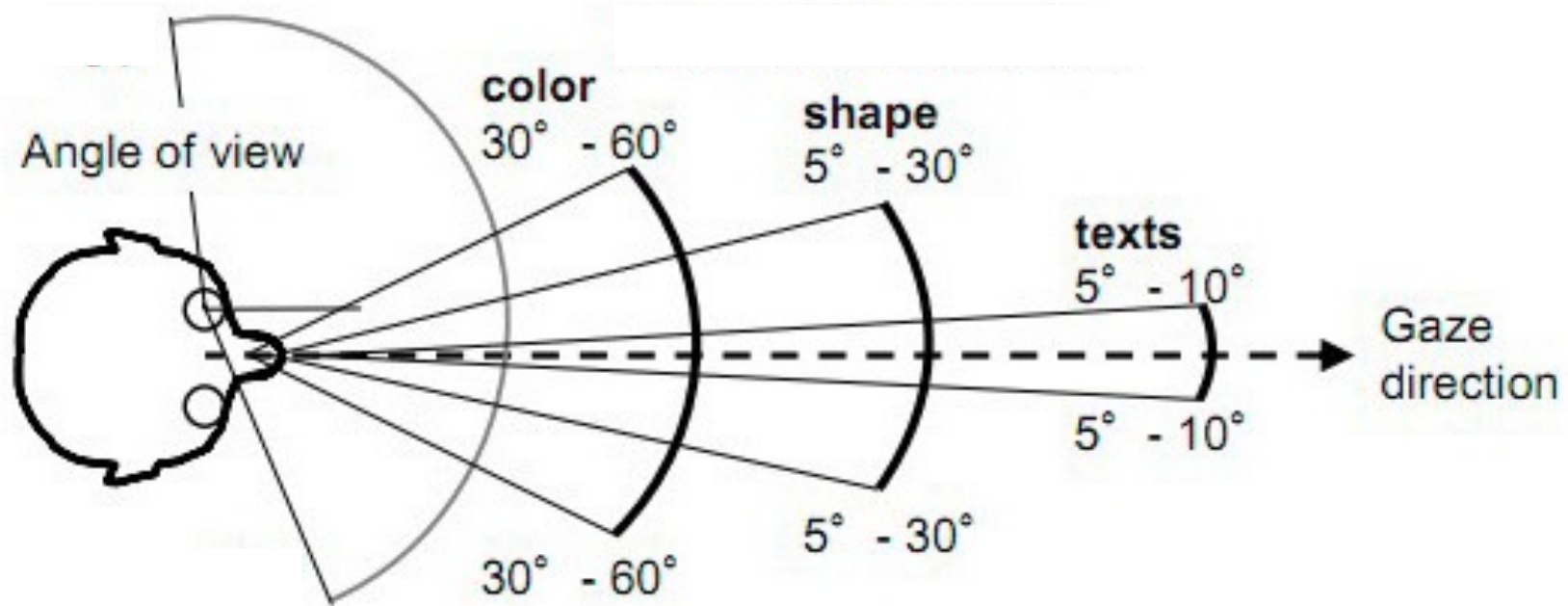
# Campo visivo

---

- Angolo sotteso dalla superficie visibile dal punto di vista dell'osservatore
  - ♦ Campo visivo di un singolo occhio:  $150^\circ$
  - ♦ I campi visivi degli occhi si sovrappongono parzialmente in orizzontale (campo visivo binoculare)
  - ♦ Area di sovrapposizione:  $120^\circ$  con  $30\text{--}35^\circ$  di visione monoculare su entrambi i lati
  - ♦ Campo visivo orizzontale combinato:  $180\text{--}200^\circ$
  - ♦ Campo visivo verticale:  $120\text{--}135^\circ$  per entrambi gli occhi
  - ♦ Schermo desktop tipico:  $40^\circ \times 32^\circ$  a 46 cm
  - ♦ L'essere umano usa occhi, testa e movimenti del corpo per mantenere gli oggetti all'interno della cosiddetta **regione foveale** (a massima risoluzione)

# Campo visivo

---



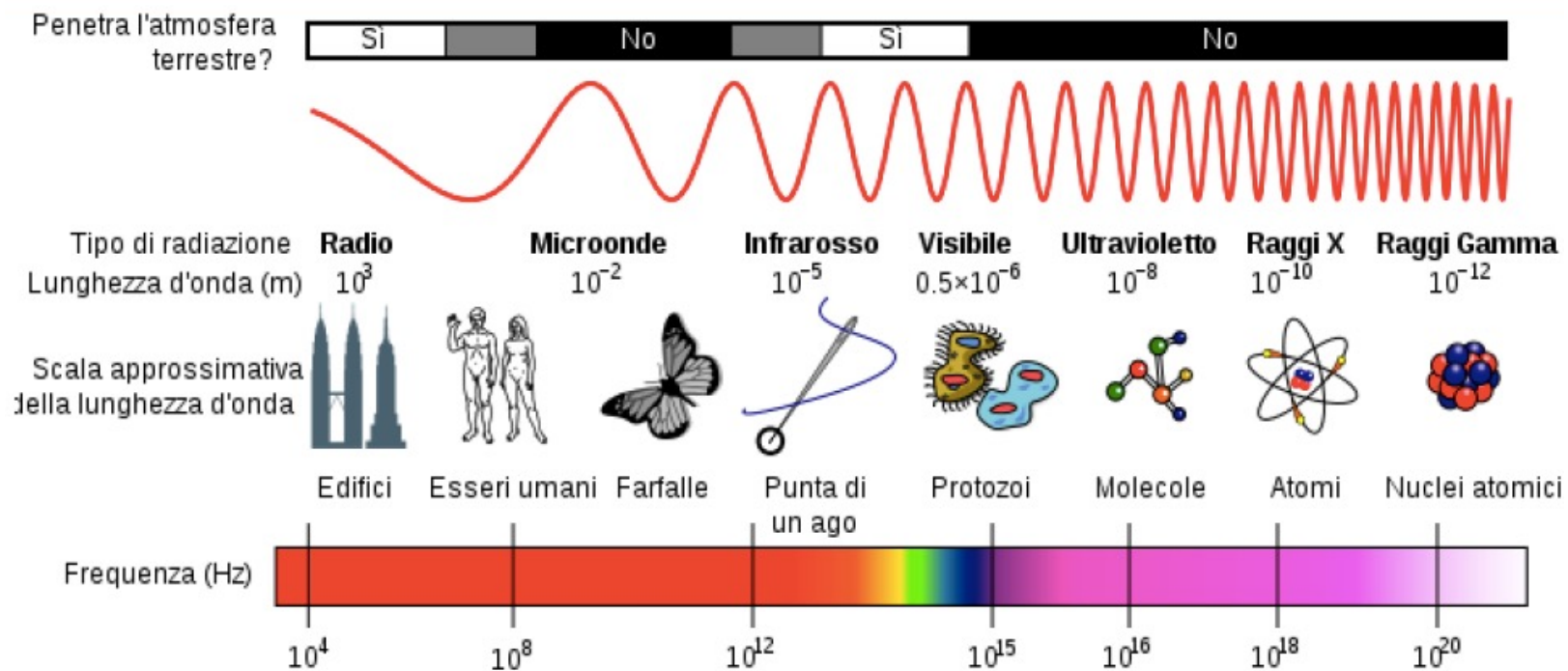
# Campo visivo

---



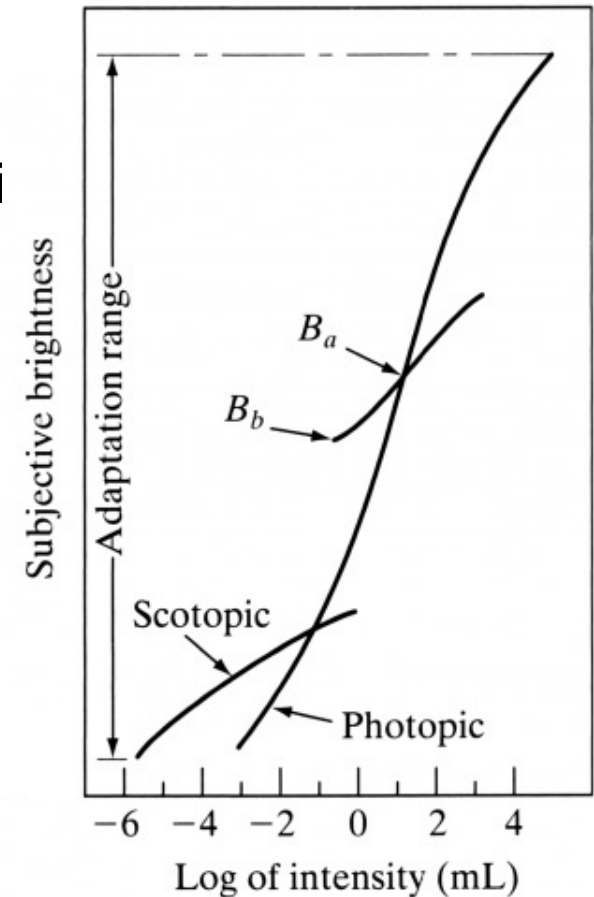
# Frequenze e range dinamico

- L'occhio umano è in grado di rispondere ad una banda ristretta della radiazione elettromagnetica
  - ◆ Da 430 nm (violetto) a 790 nm (rosso), picco a 559 nm
  - ◆ Allineata all'emissione spettrale della luce solare



# Frequenze e range dinamico

- Livelli di luminosità percepibili
  - ◆ Da pochi fotoni a livelli di luminosità di dieci ordini di grandezza più elevati
    - Nessuno schermo è in grado di raggiungere l'intero range percepibile dall'occhio umano
    - L'occhio non può operare contemporaneamente su questo range ed effettua un **adattamento**
- La luminosità soggettiva (percepita) è una funzione logaritmica di quella incidente
  - ◆ La curva  $B_a-B_b$  rappresenta il range di luminosità che l'occhio può percepire se adattato a quel livello





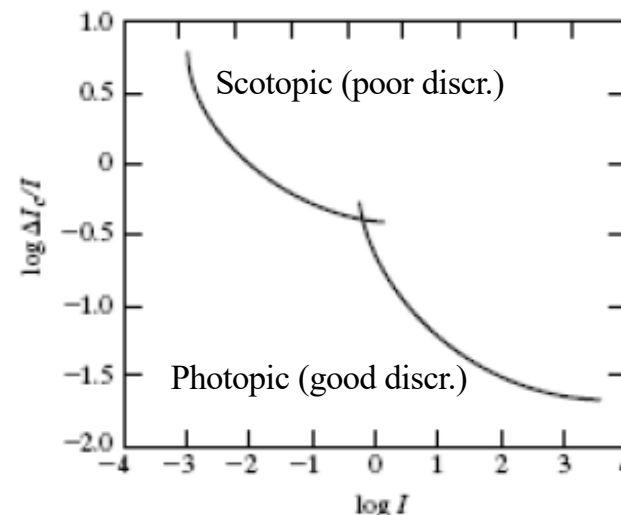
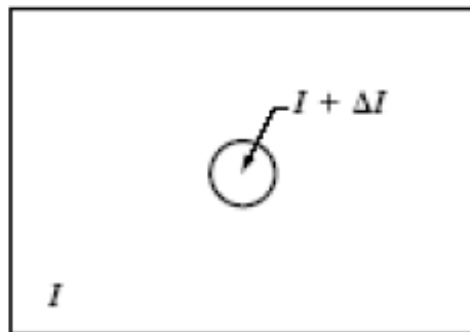
# Frequenze e range dinamico

---



# Livelli di luminosità

- Esperimento, sfondo costante, luce lampeggiante
  - ♦ La discriminazione dei livelli di luminosità (Weber ratio) è basso per bassi livelli di illuminazione e cresce in maniera significativa tanto più cresce l'illuminazione dello sfondo
  - ♦ Due curve
    - Per bassi livelli di luminosità la visione è affidata ad un certo tipo di recettori dell'occhio, per alti livelli a recettori diversi





# Livelli di luminosità

---



# Livelli di luminosità

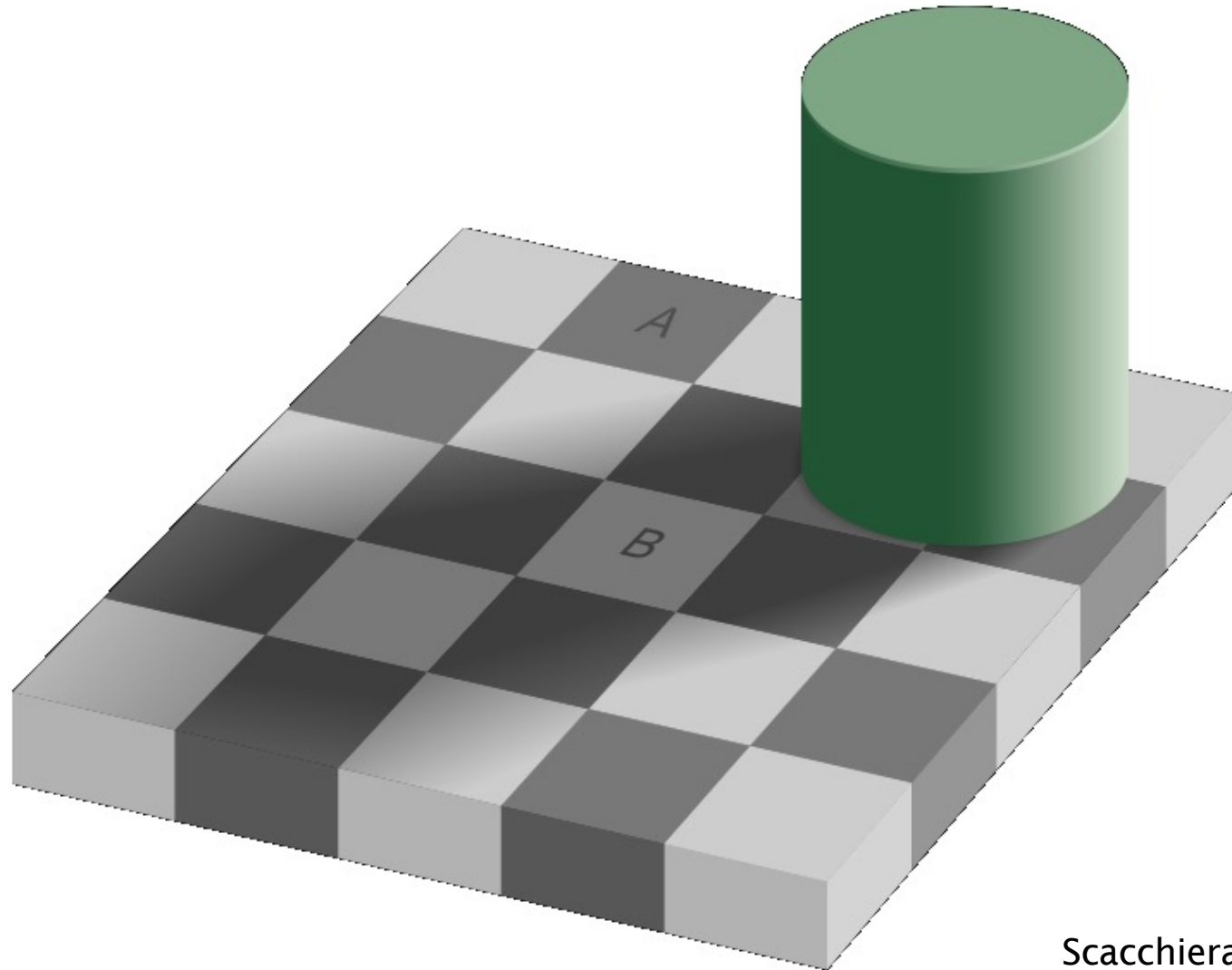
---



ig

# Livelli di luminosità

---



Scacchiera di Aldeson

# Livelli di luminosità

---

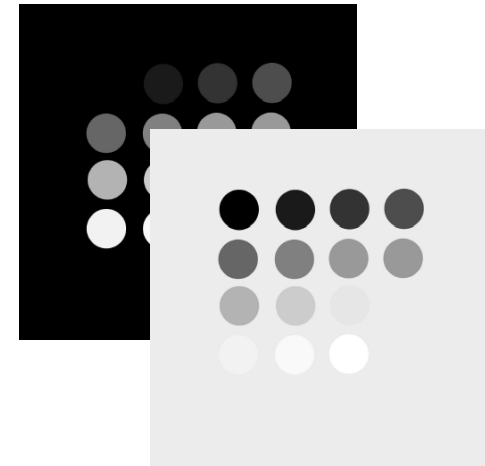
*A*

*B*

# Livelli di luminosità

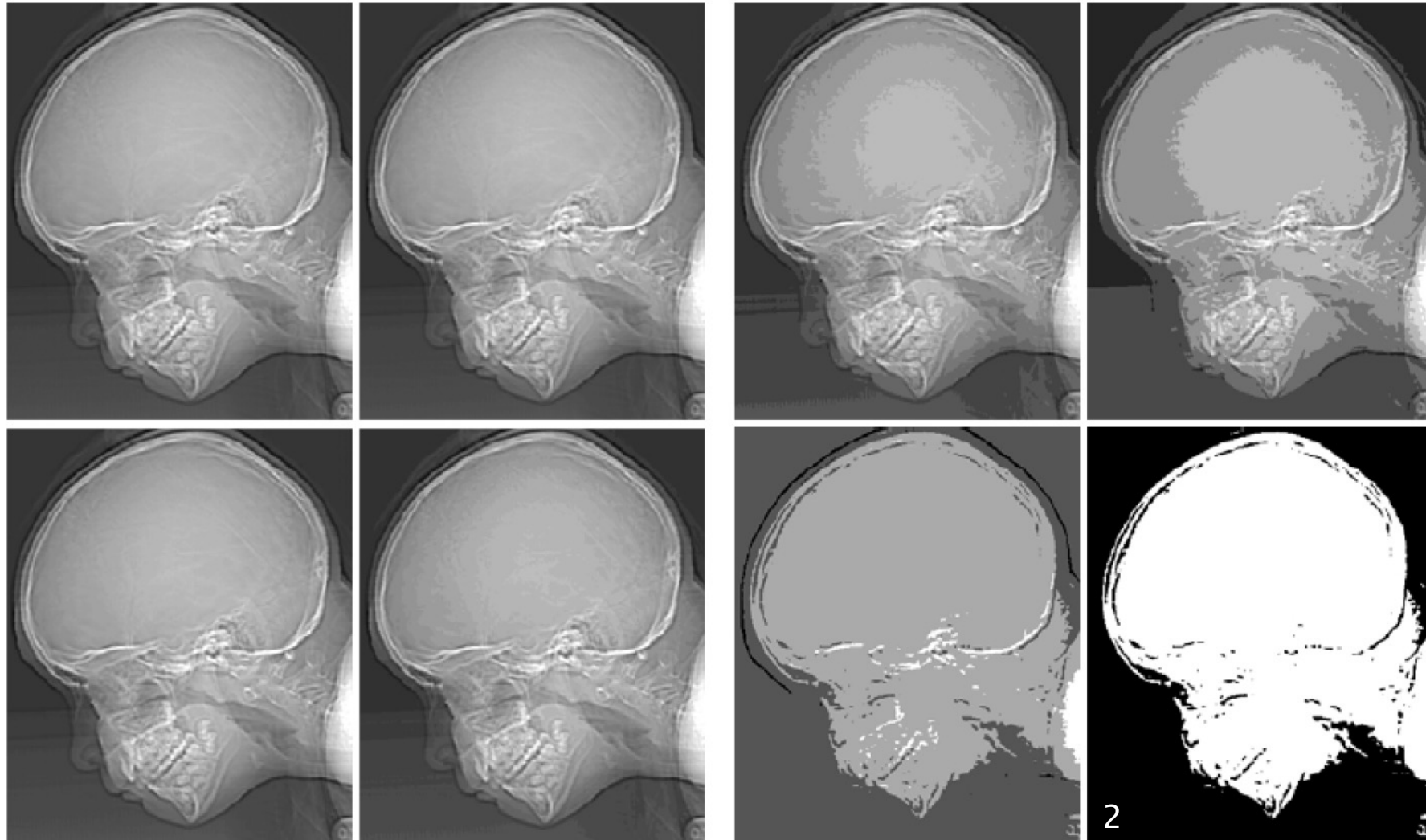
---

- Simili esperimenti (intensità della luce crescente) hanno dimostrato che il numero di livelli diversi che possono essere visti in un determinato punto di una immagine monocromatica è di poche decine
  - ◆ Ciò non significa che una immagine possa/debba essere rappresentata da così pochi valori di intensità: l'occhio si muove velocemente sull'intera immagine, l'intensità media dello sfondo cambia, e ciò permette di percepire un **insieme diverso** di livelli ad ogni adattamento
  - ◆ L'occhio è infatti capace di discriminare tra un insieme più ampio di intensità **globali** (poche centinaia)



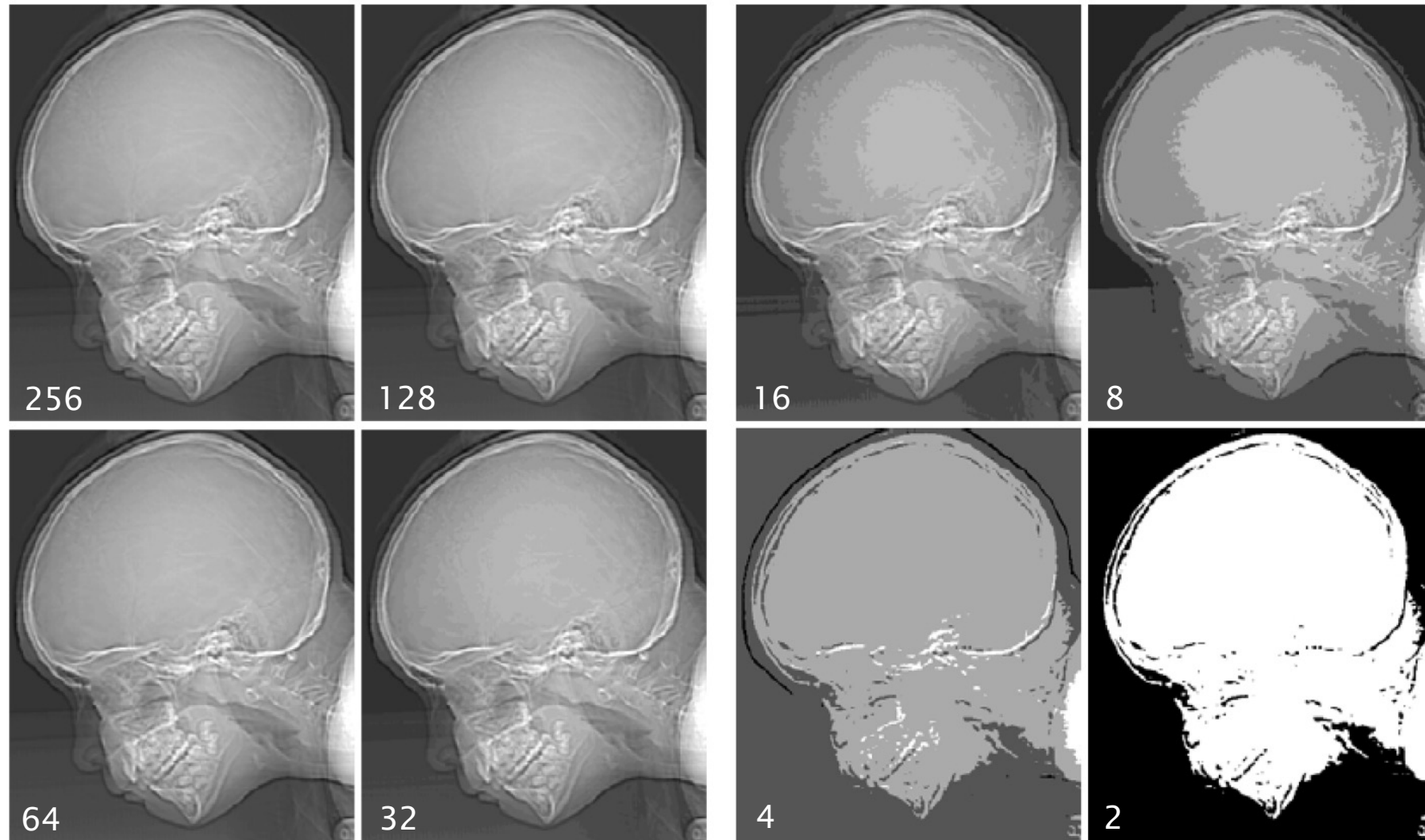
# Livelli di luminosità

---



# Livelli di luminosità

---



# Livelli di luminosità

---





# Livelli di luminosità

---

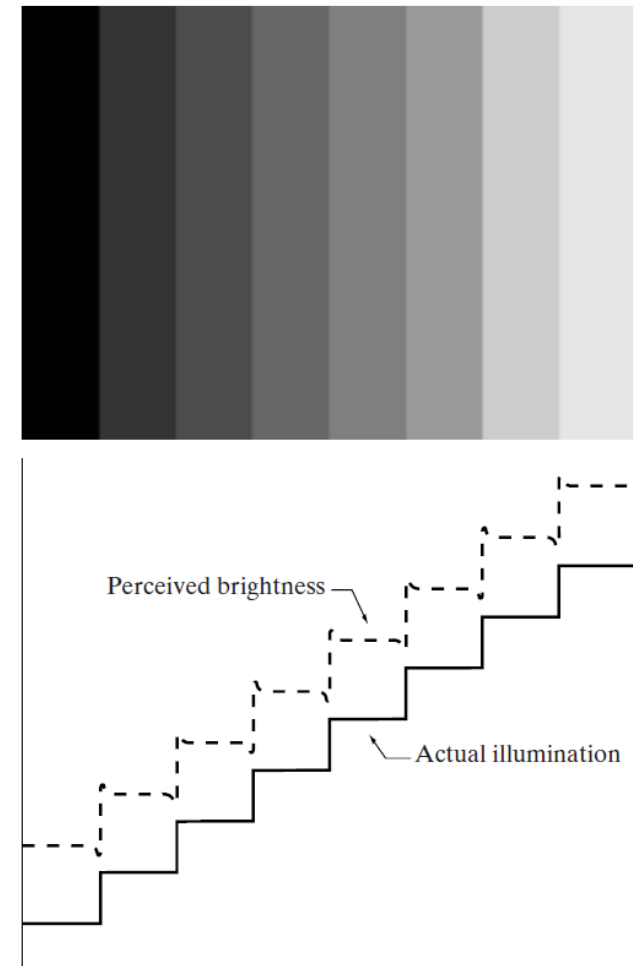
- In generale
  - ♦ Il numero di livelli per un'immagine a toni di grigio dipende dal range dinamico del dispositivo di visualizzazione (rapporto tra i livelli di intensità massimo e minimo  $I_M / I_m$ )
  - ♦ Assumendo 1,01 il rapporto minimo affinché due intensità siano indistinguibili, il numero teorico di livelli  $n$  è ottenuto come  $n^{1,01} = I_M / I_m$ , quindi  $n = \log_{1,01}(I_M / I_m)$

Dispositivo	Intervallo dinamico tipico	Numero di livelli $n$
CRT	50-200	400-530
Stampa fotografica (carta)	100	465
Stampa fotografica (diapositiva)	1000	700
Carta patinata (B/N)	100	465
Carta patinata (colori)	50	400
Quotidiano (B/N)	10	234

# Livelli di luminosità

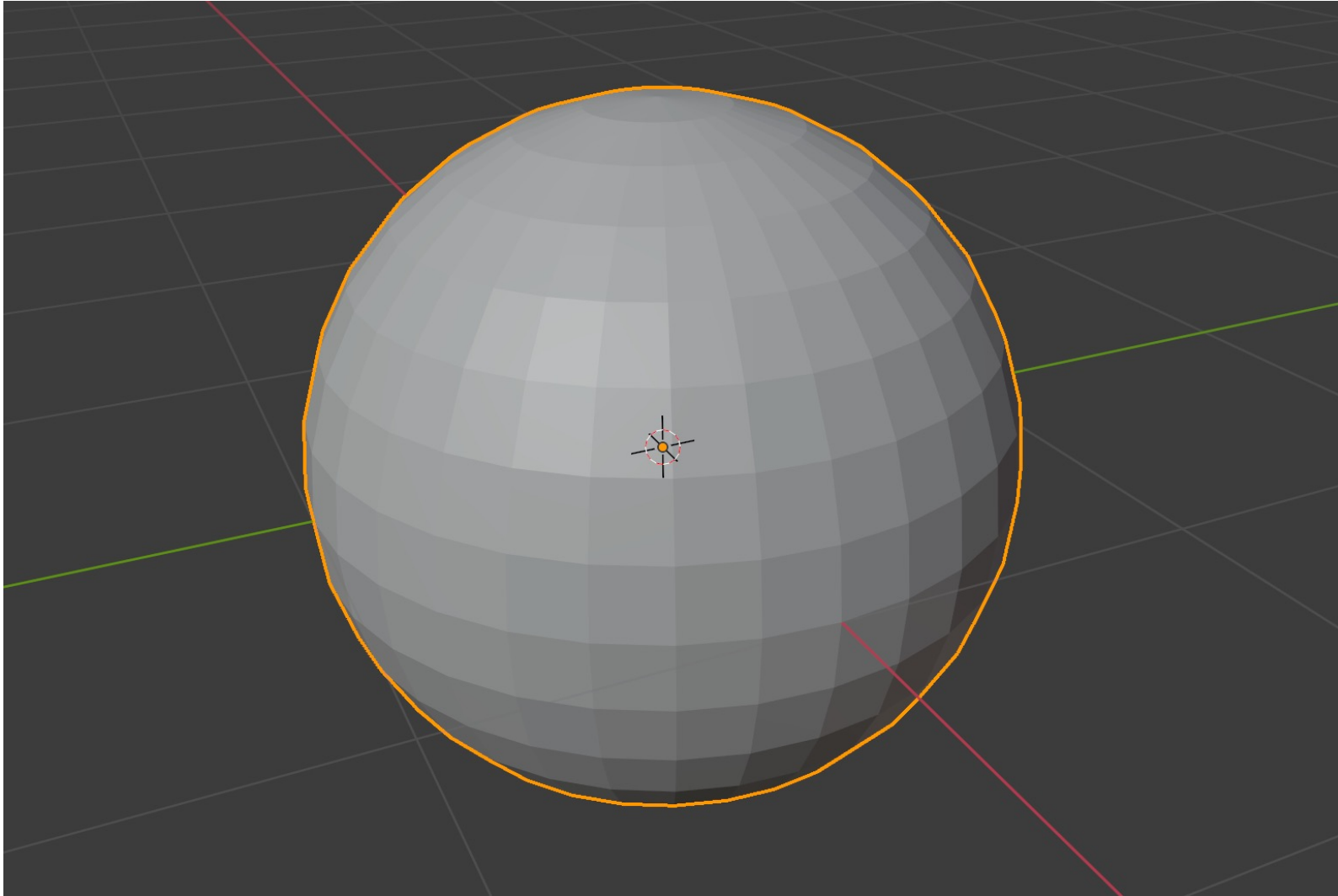
---

- Effetto Mach
  - Le strisce verticali hanno un tono di grigio omogeneo
  - Percezione diversa
  - L'effetto è dovuto al fatto che il sistema visivo tende a “esagerare” o “smorzare” la percezione al confine tra regioni con intensità diverse (neuroni, inibizione laterale)
  - ♦ Particolarmente rilevante per l'ombreggiatura di superfici poligonali



# Livelli di luminosità

---



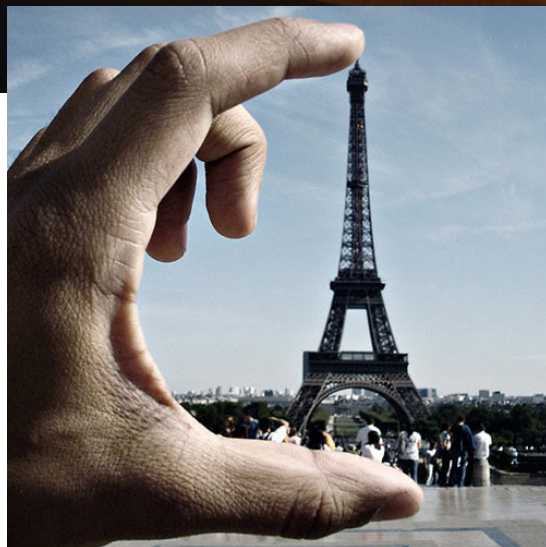
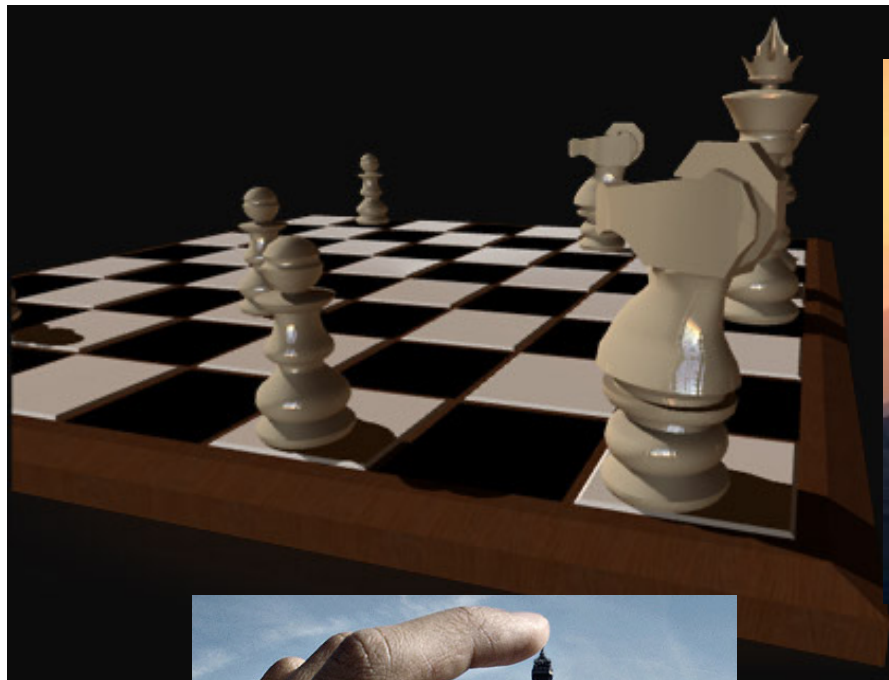
# Percezione della profondità

---

- Approccio basato su “suggerimenti” (**cues**)
  - ♦ Informazioni (es. 2D) permettono di percepire l'immagine come 3D
- Informazioni monoculari
  - ♦ Occlusioni
  - ♦ Ombre
  - ♦ Altezza/dimensioni relative
  - ♦ Dimensioni di oggetti comuni
  - ♦ Prospettiva atmosferica
  - ♦ Prospettiva lineare
  - ♦ Gradienti di texture

# Percezione della profondità

---



# Percezione della profondità

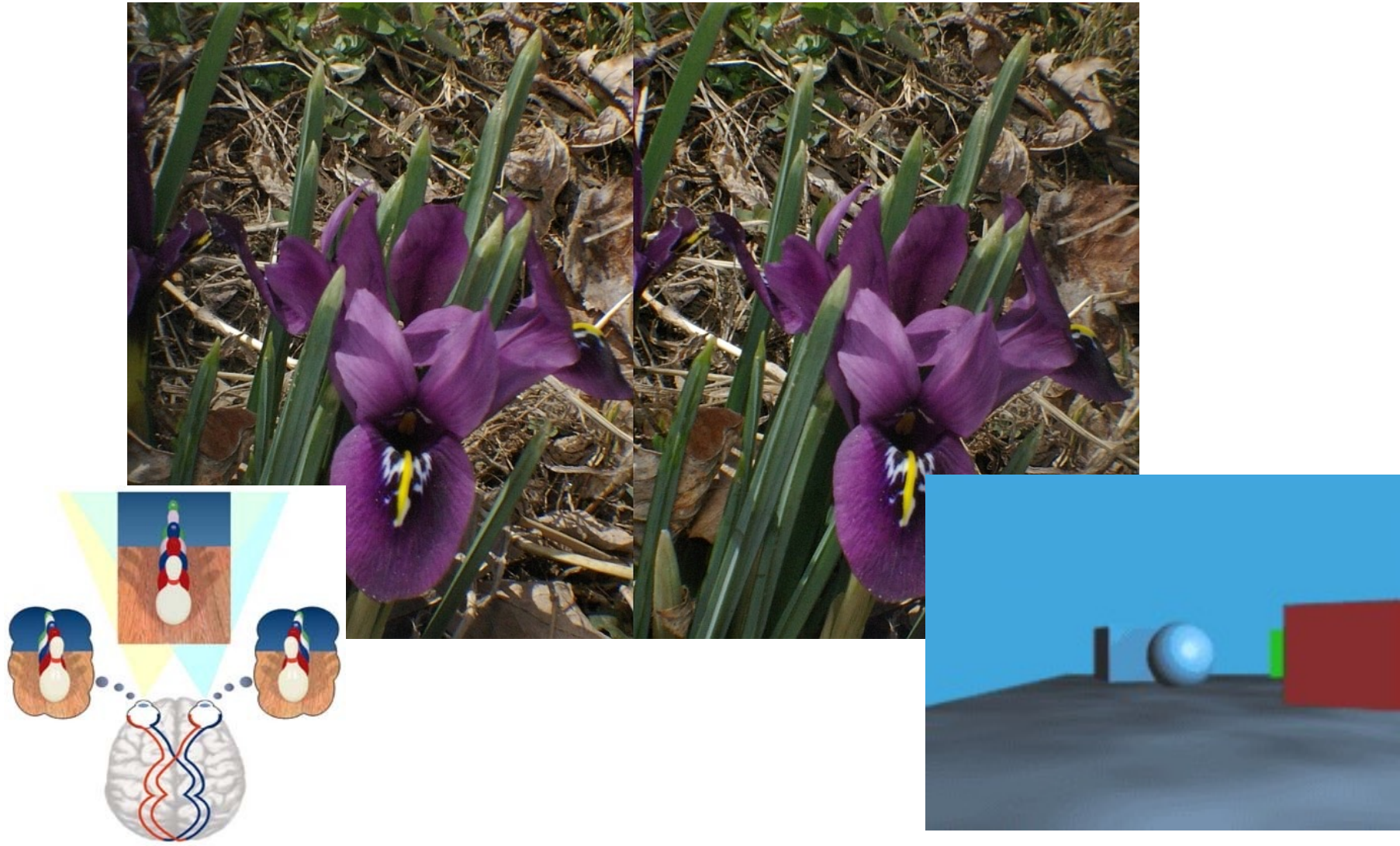
---

- Informazioni oculomotorie
  - ◆ Convergenza e accomodazione (fissazione e messa a fuoco): abilità di determinare la posizione degli occhi e la tensione muscolare
- Informazioni binoculari
  - ◆ Disparità binoculare
  - ◆ Stereopsi: capacità percettiva che consente di unire le immagini provenienti dai due occhi
- Informazioni derivate dal movimento
  - ◆ Parallasse



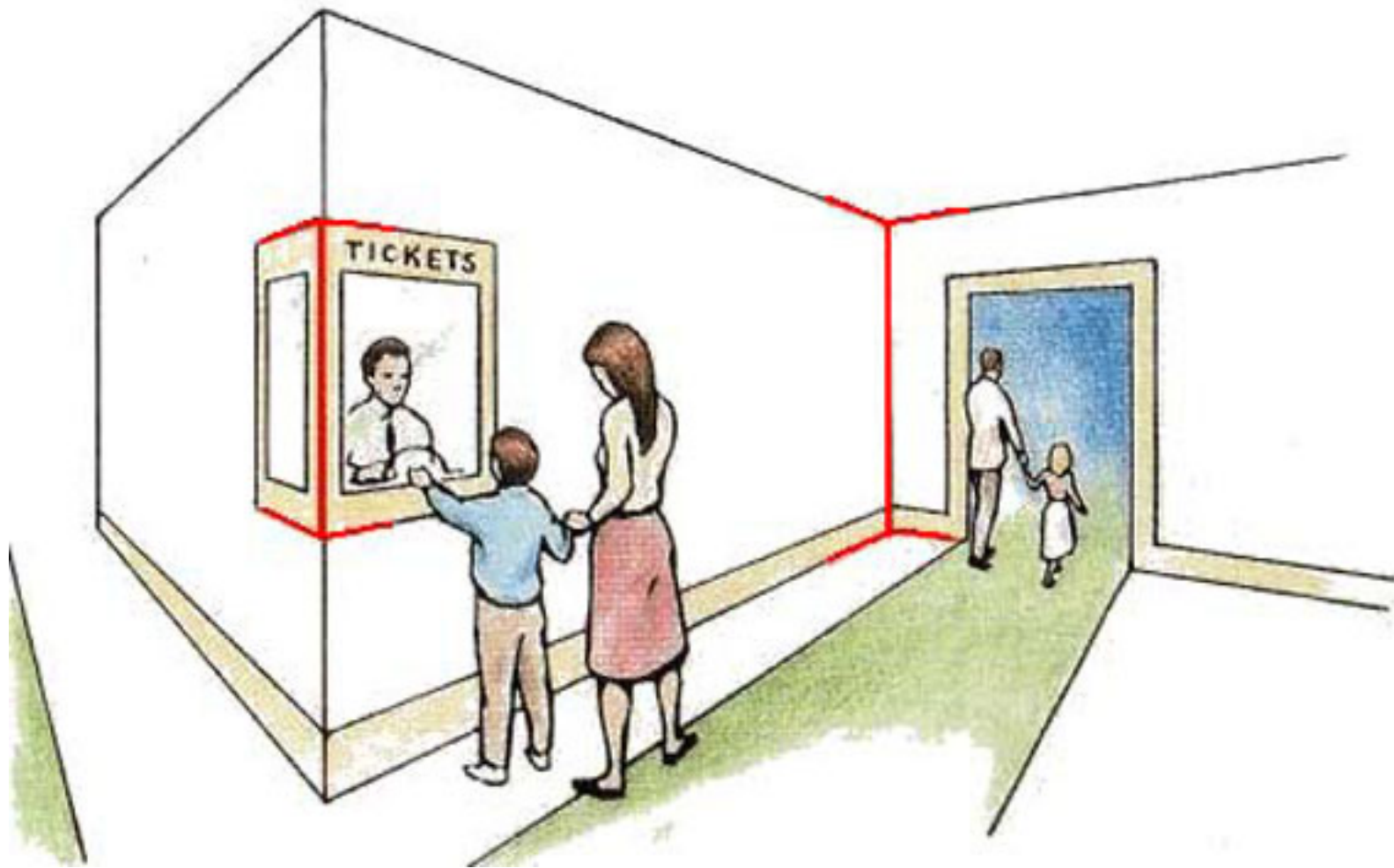
# Percezione della profondità

---



# Percezione della profondità

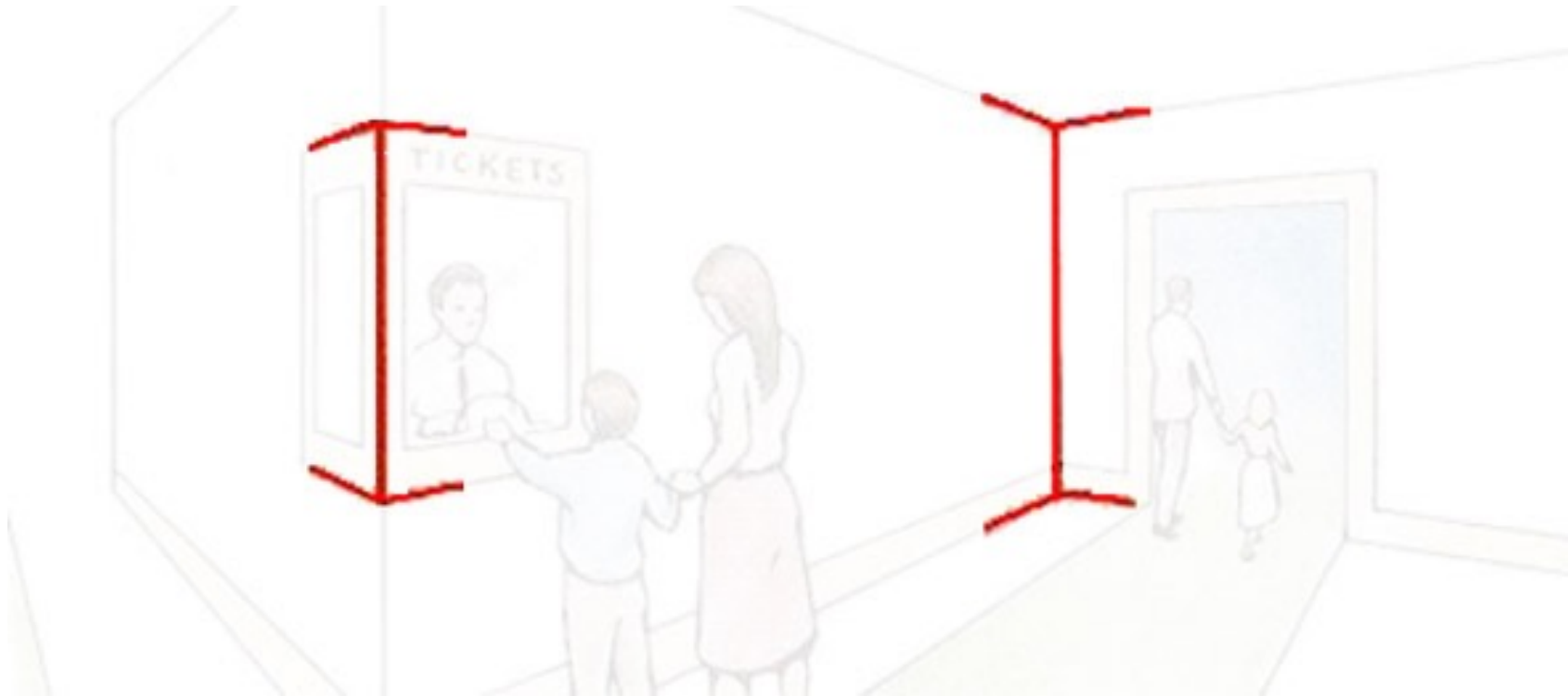
---





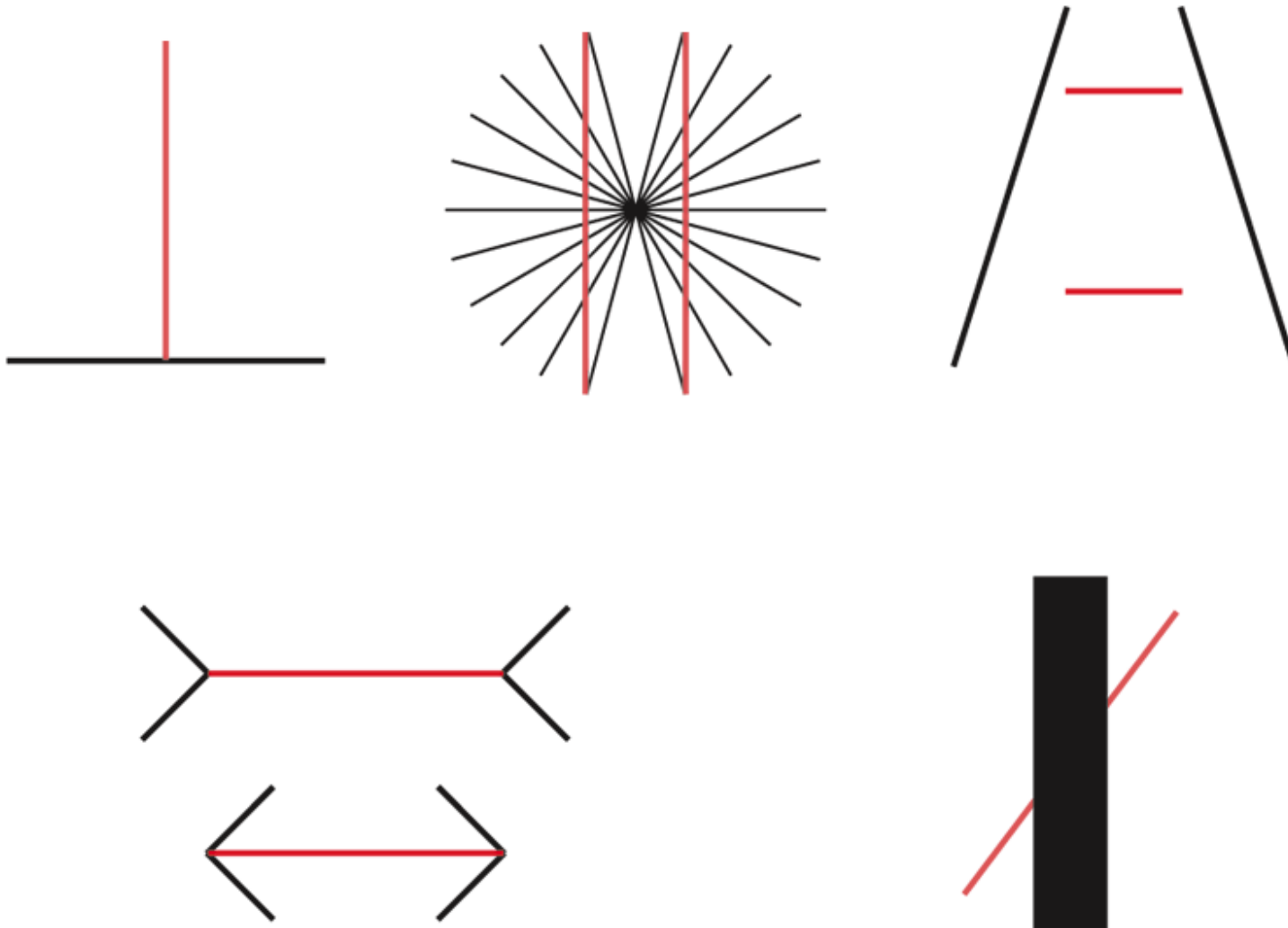
# Percezione della profondità

---



# Percezione della profondità

---



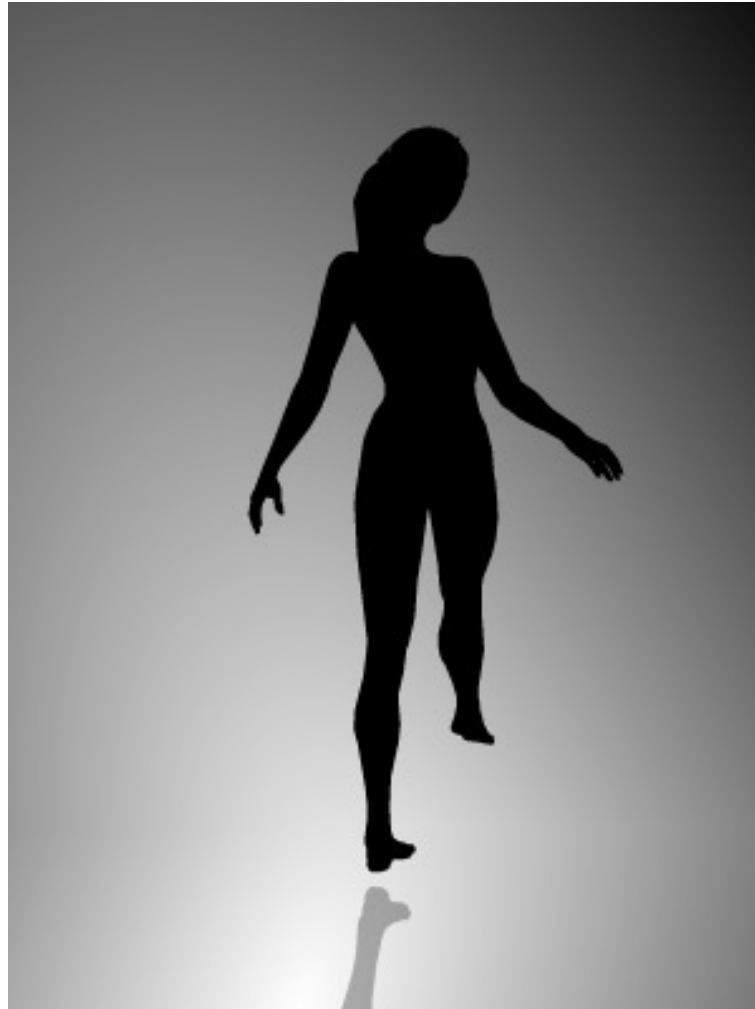
# Altri effetti della percezione



Stanza di Ames (geometrica/prospettica)

# Altri effetti della percezione

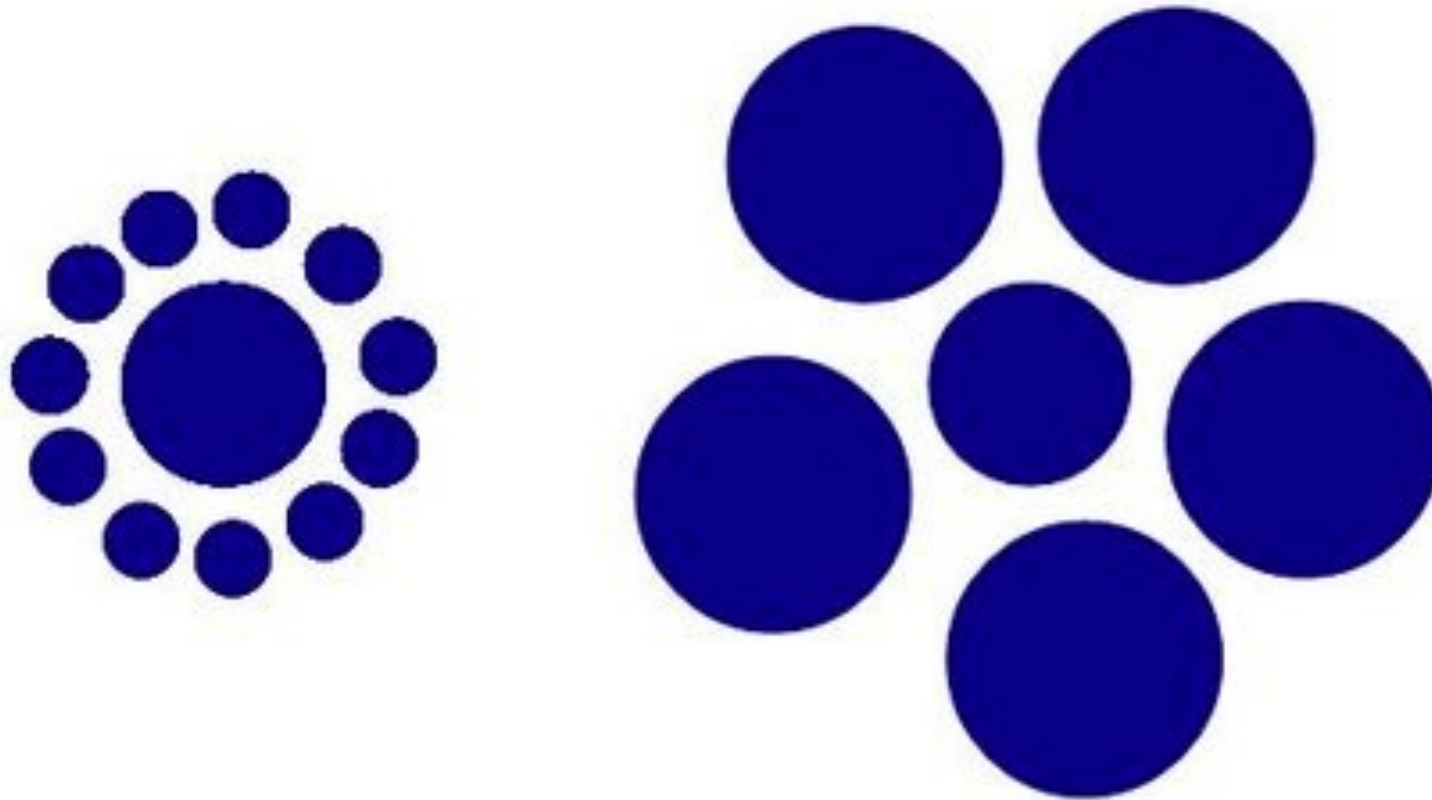
---



Spinning dancer, Nobuyuki Kayahara (assenza di indizi)

# Altri effetti della percezione

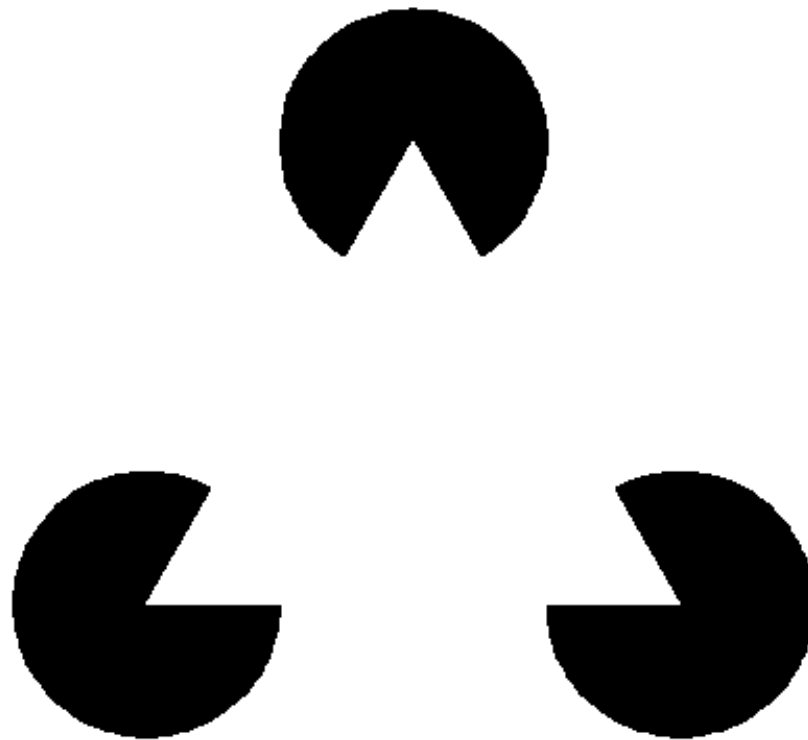
---



Illusione di Ebbinghaus

# Altri effetti della percezione

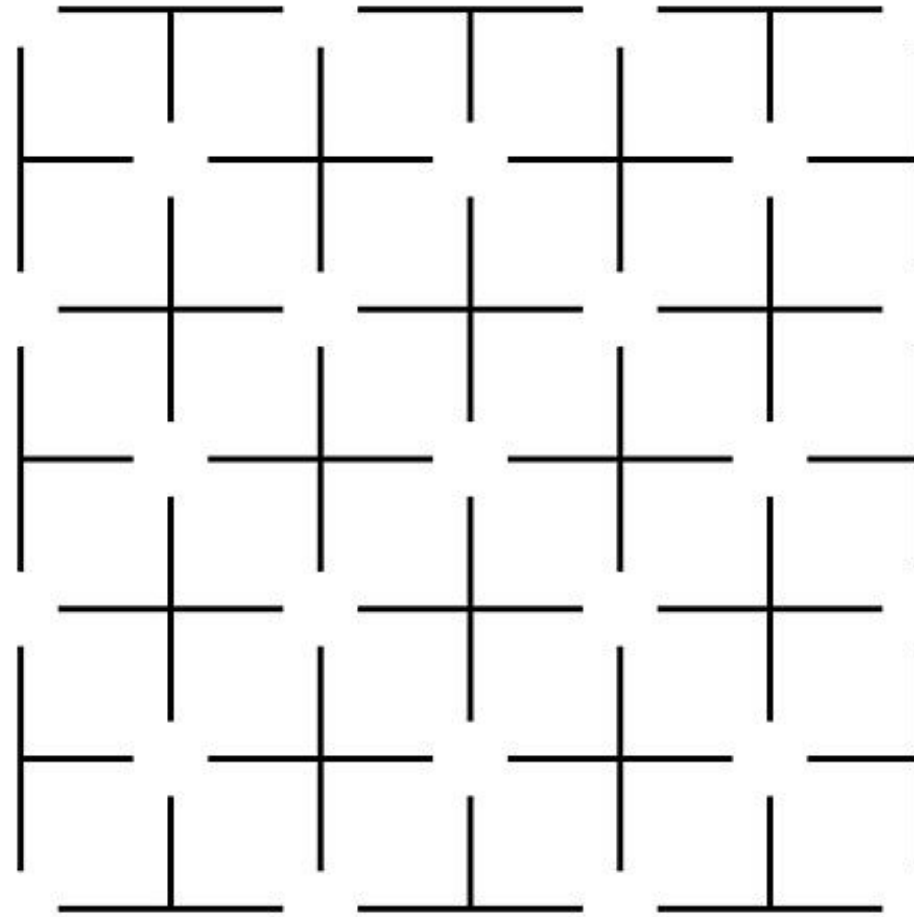
---



Triangolo di Kanizsa (completamento, figura/sfondo)

# Altri effetti della percezione

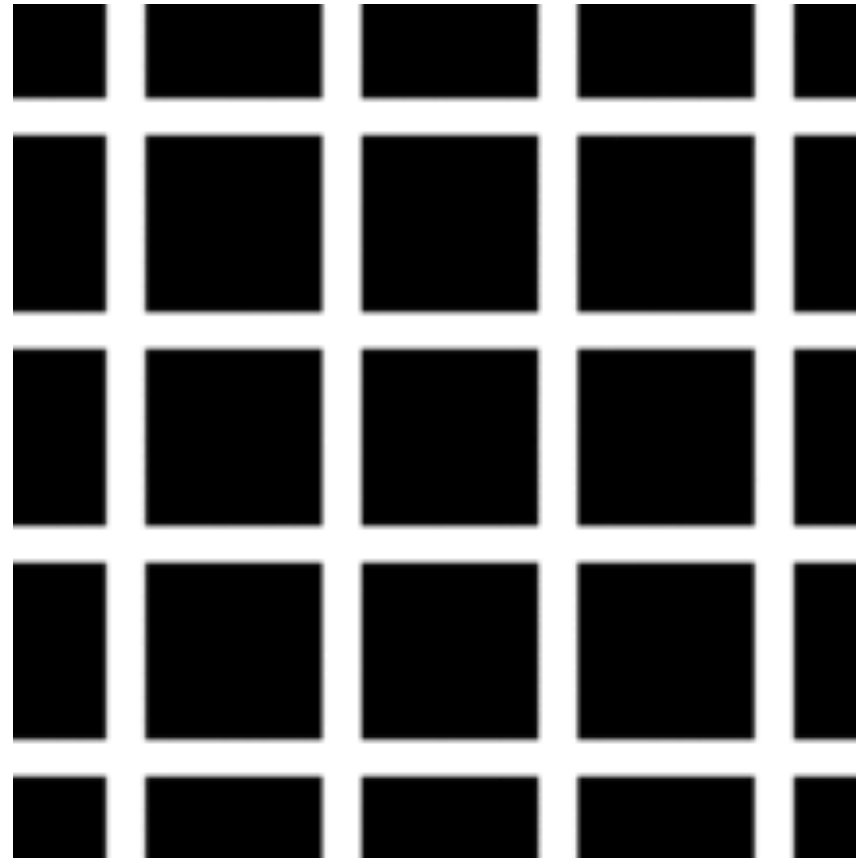
---



Cerchi inesistenti di Ehrenstein (completamento, figura/sfondo)

# Altri effetti della percezione

---

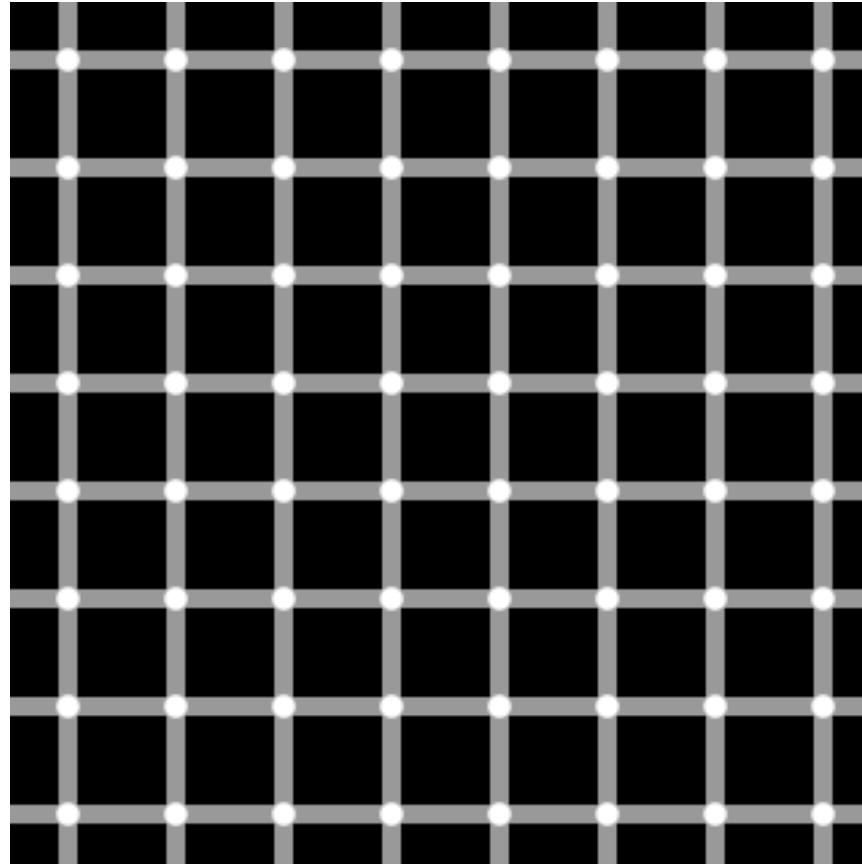


Griglia di Hermann (inibizione laterale)



# Altri effetti della percezione

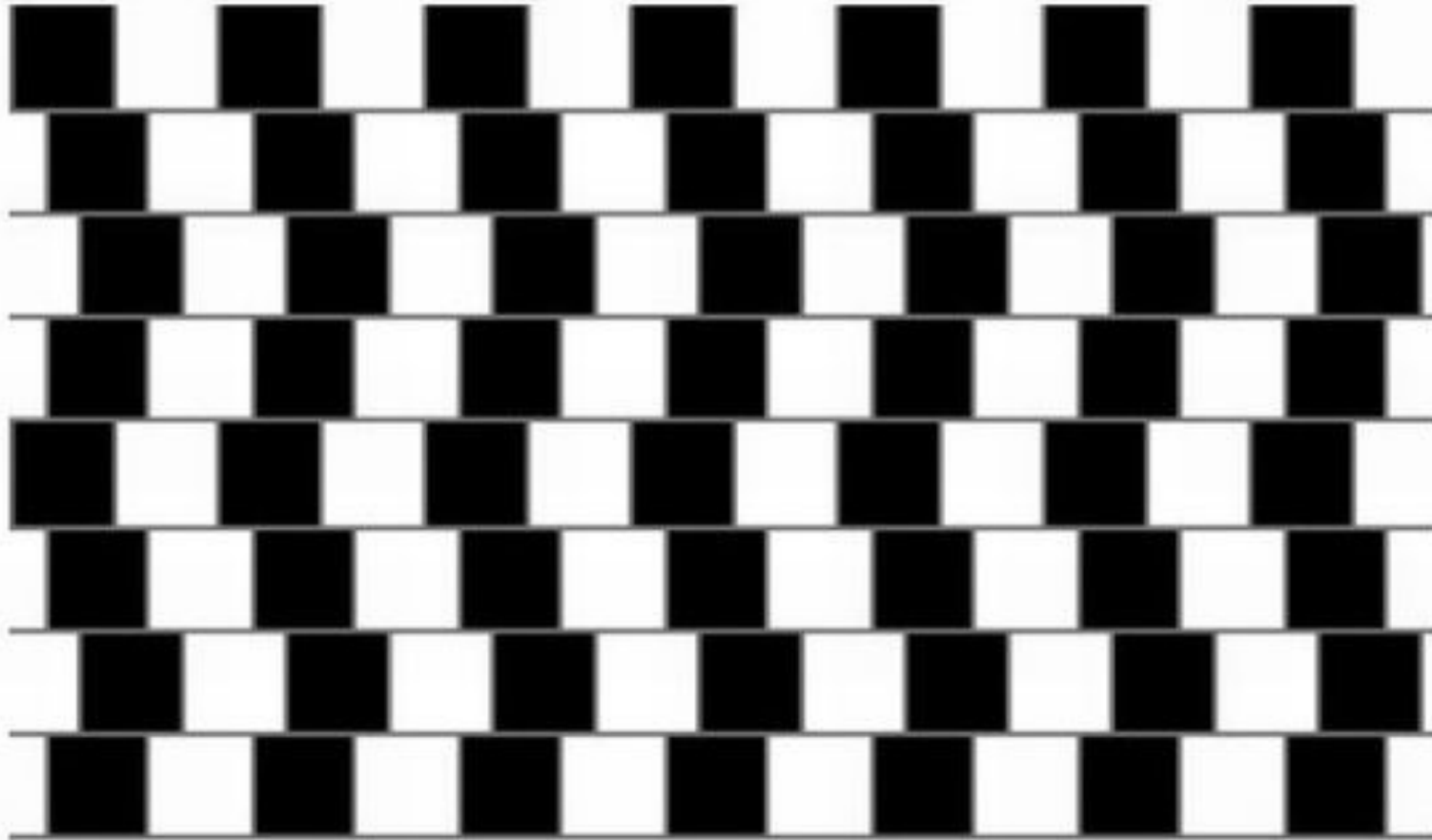
---



Griglia scintillante di Lingelbach (inibizione laterale)

# Altri effetti della percezione

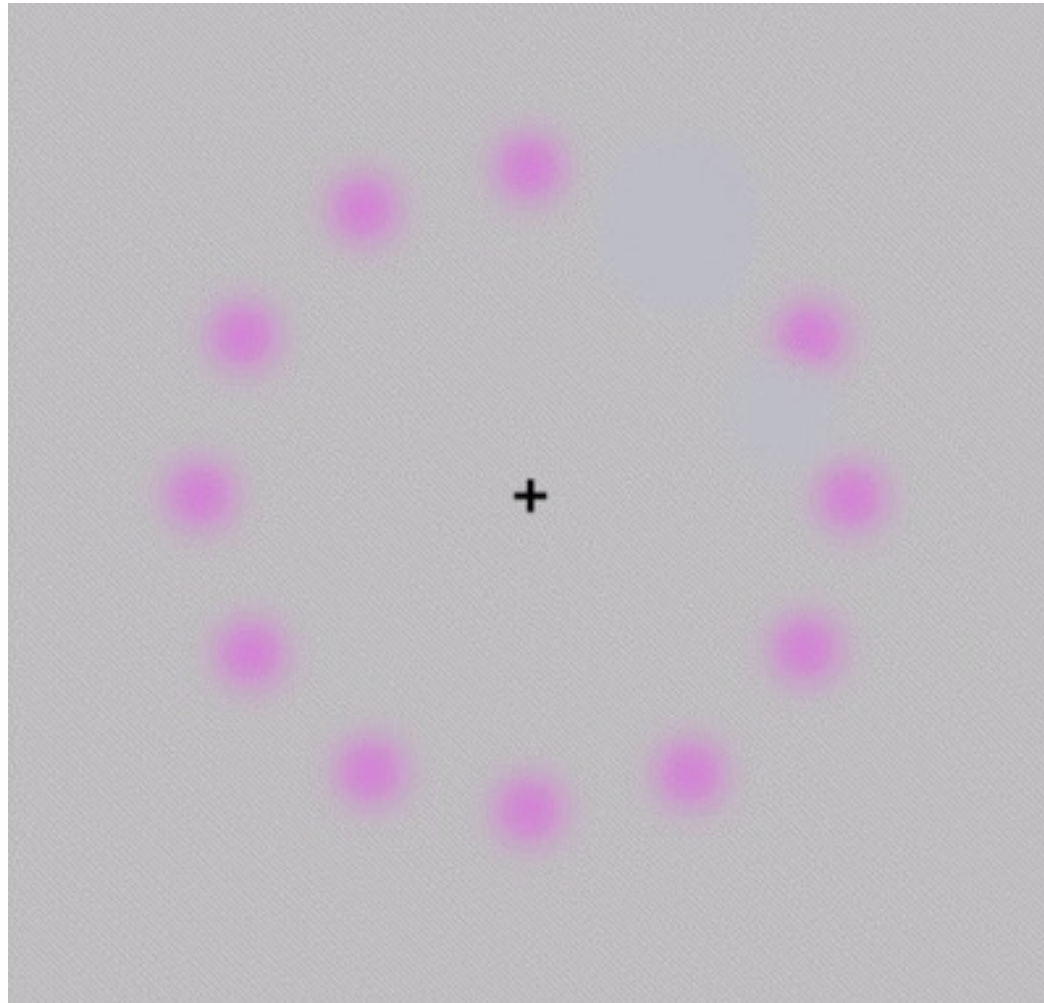
---



Café wall illusion (inibizione laterale o altre interazioni tra neuroni)

# Altri effetti della percezione

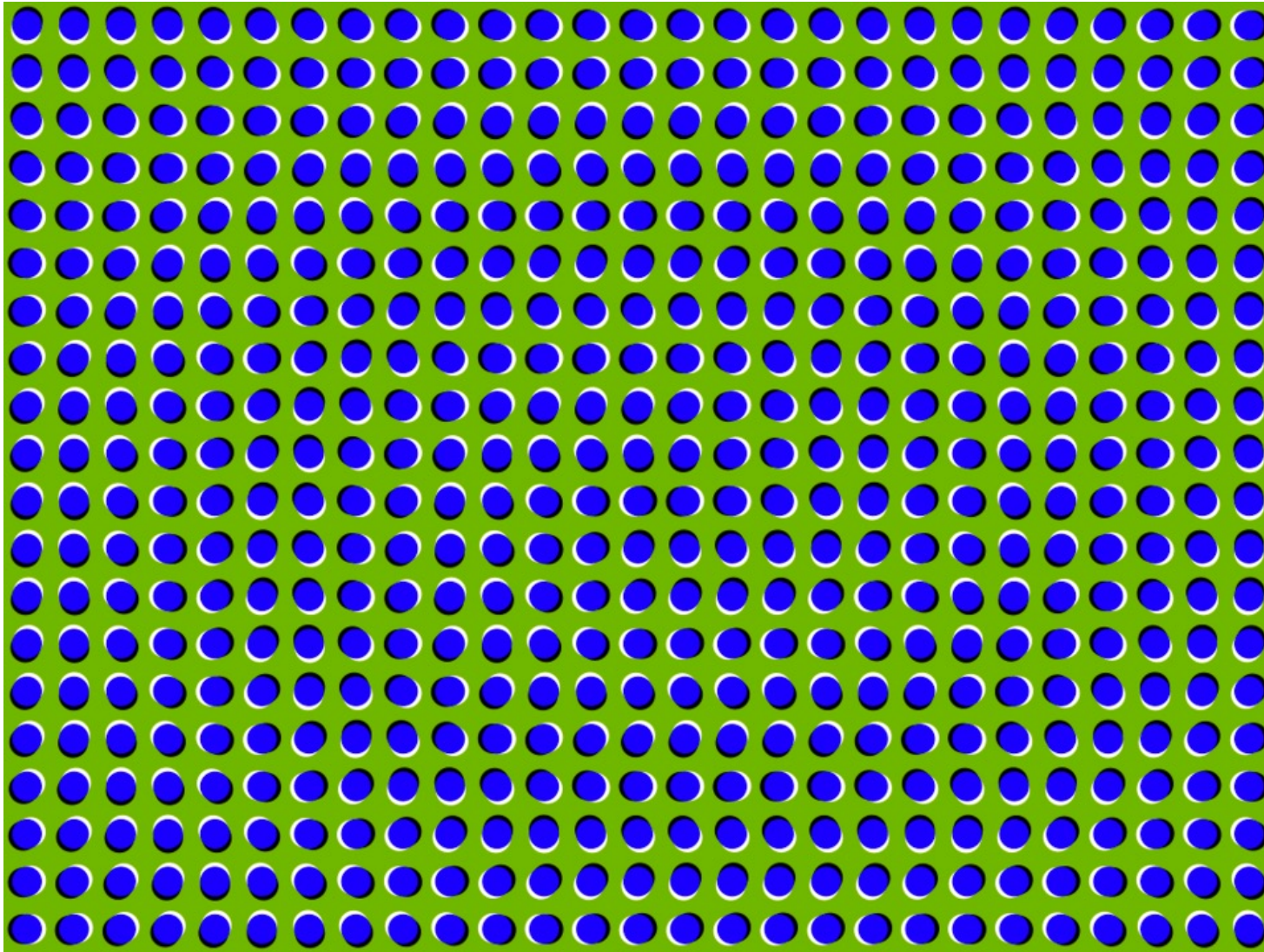
---



Pac-man illusion, Jeremy Hinton (adattamento recettori, complemento colore complementare)

# Altri effetti della percezione

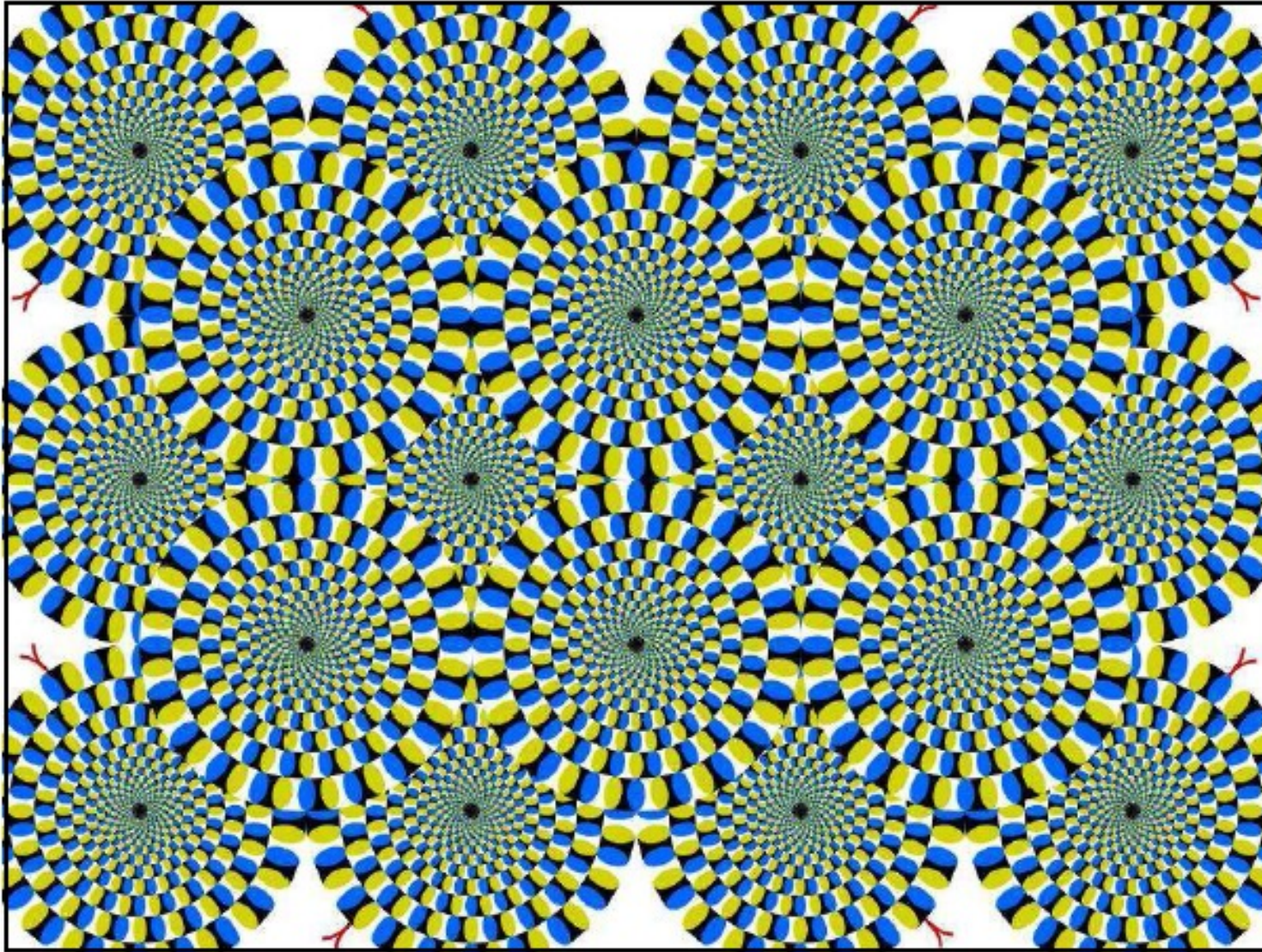
---





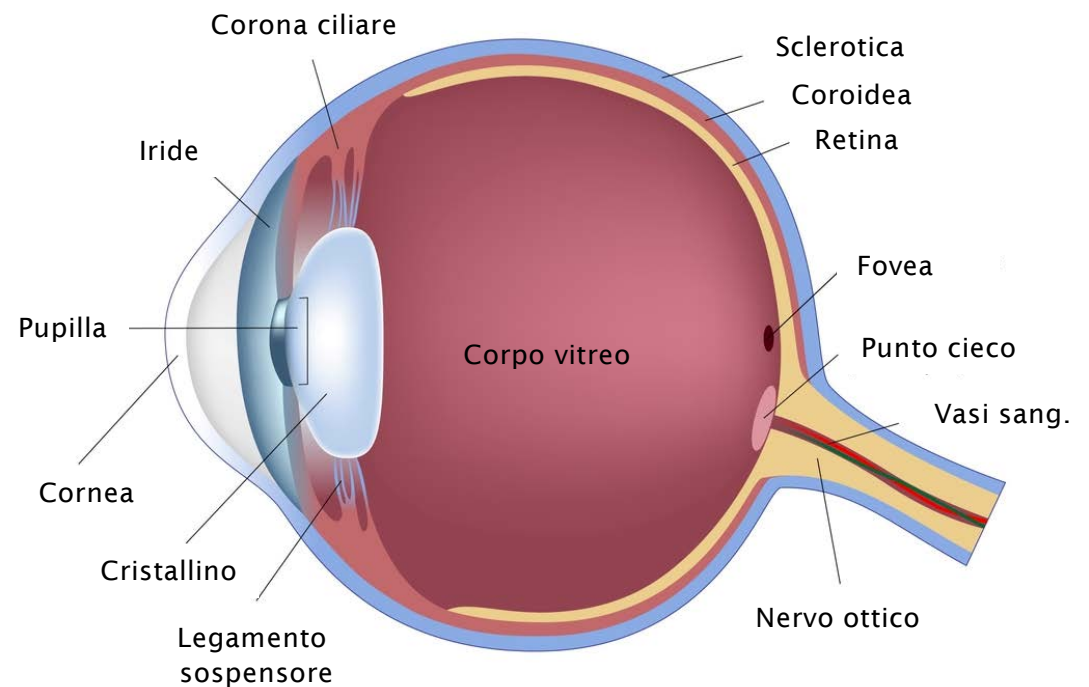
# Altri effetti della percezione

---



# Fisiologia del sistema visivo

- L'occhio umano è molto simile ad una sfera di diametro di circa 20 mm
- Quattro membrane racchiudono l'occhio
  - ◆ La cornea
  - ◆ La membrana sclerotica
  - ◆ La membrana corioidea
  - ◆ La retina



# Fisiologia del sistema visivo

---

- La cornea è un tessuto trasparente che copre la superficie anteriore dell'occhio, mentre la membrana sclerotica è un tessuto opaco contiguo alla cornea che ricopre il resto del bulbo oculare
- La membrana coroidea è immediatamente sotto quella sclerotica e contiene una ricca rete di vasi sanguigni, che costituiscono la principale “fonte di nutrimento” dell'occhio
- Nella parte anteriore la membrana coroidea si divide in corona ciliare e iride: quest'ultima si contrae o si allarga a seconda della quantità di luce che entra nell'occhio (apertura di una camera)
- L'apertura centrale dell'iride (pupilla) ha un diametro variabile da circa 2 mm a 8 mm



# Fisiologia del sistema visivo

---

- Corpo, o umor, vitreo: contribuisce al nutrimento dell'occhio ed a mantenere la forma sferica sotto pressione
- Il cristallino (lente) è costituito da strati concentrici di cellule fibrose ed è sospeso mediante fibre che si attaccano alla corona ciliare, per il 60–70 % contiene acqua, per il 6 % grasso, il resto proteine
- Il cristallino assorbe circa l'8 % della luce visibile, e l'assorbimento aumenta al diminuire della lunghezza d'onda
- Luci infrarosse e ultraviolette sono quasi totalmente assorbite dalle proteine presenti nel cristallino: una eccessiva esposizione a queste luci può danneggiare l'occhio

# Fisiologia del sistema visivo

---

- La retina è la membrana più interna dell'occhio ed è su di essa che si “forma” l'immagine: la formazione di un'immagine è prodotta da due tipi di recettori di luce: **coni** e **bastoncelli**
- I coni sono presenti in un occhio in un numero variabile dai 6 ai 7 milioni
- Essi sono principalmente localizzati nella parte centrale della retina (fovea) e sono altamente sensibili al colore e agli elevati livelli di illuminazione (**visione fotopica**)
- L'occhio umano risolve i dettagli più fini di una immagine proprio utilizzando i coni perché ognuno è connesso ad un nervo

# Fisiologia del sistema visivo

---

- I muscoli che controllano l'occhio lo fanno ruotare finché l'immagine che interessa non “cade” nella fovea
- Il numero dei bastoncelli è decisamente superiore a quello dei coni (dai 75 ai 150 milioni)
- I bastoncelli sono distribuiti su tutta la superficie della retina e, a differenza dei coni, sono connessi a gruppi ai nervi; questo riduce l'ammontare di dettagli distinguibili

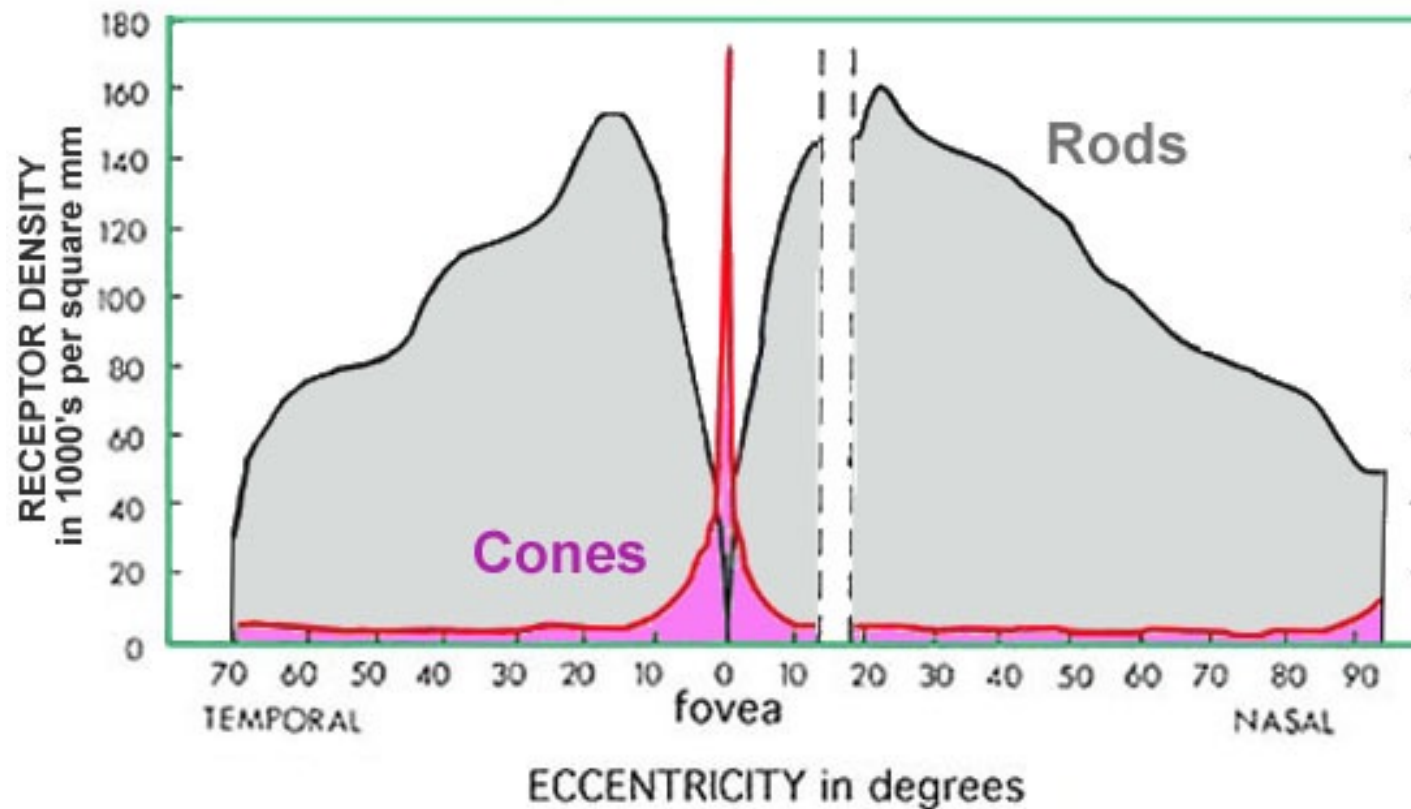
# Fisiologia del sistema visivo

---

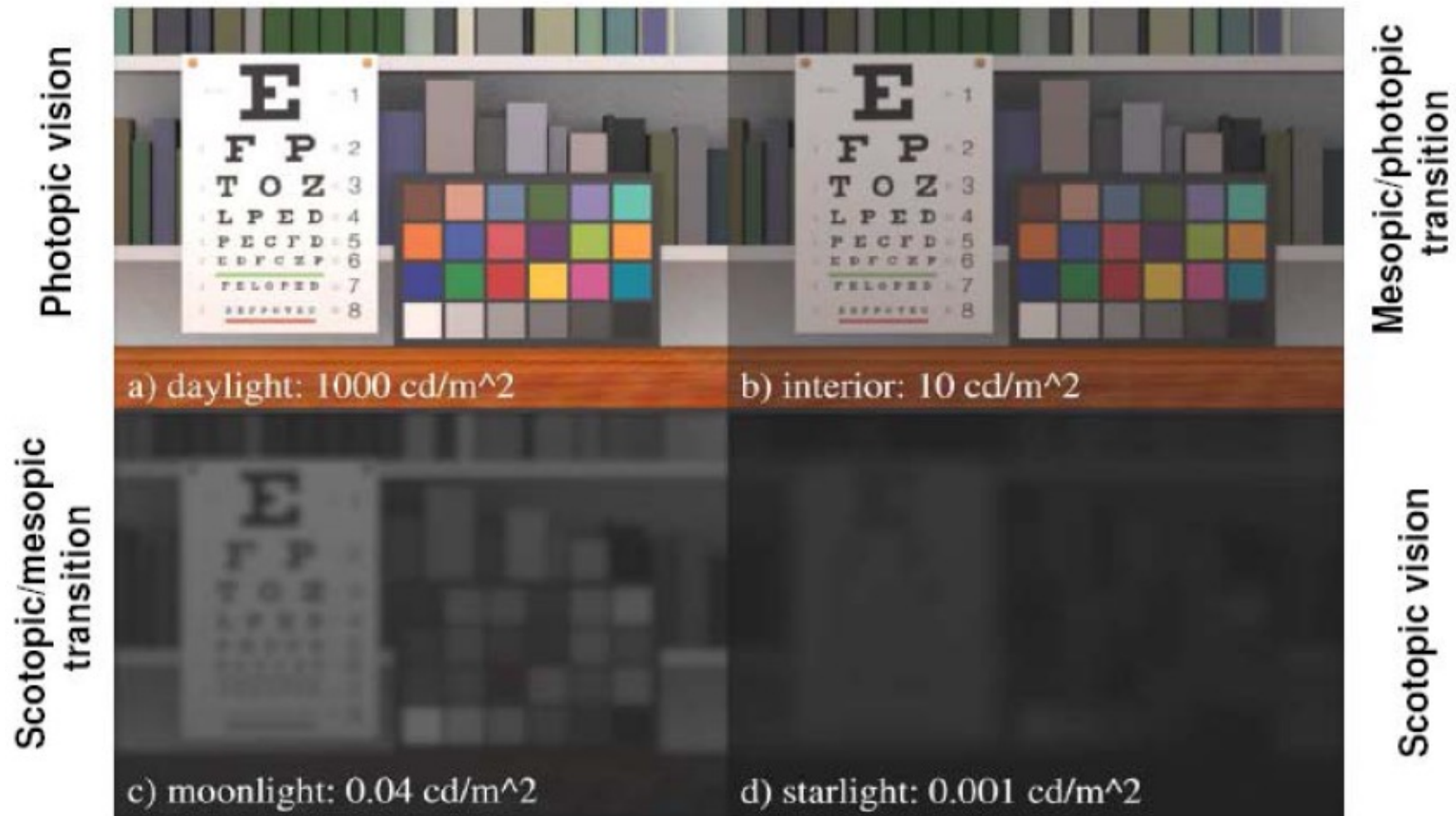
- I bastoncelli servono a dare una visione generale del campo di vista
- Non sono coinvolti nella visione del colore e sono sensibili a bassi livelli di illuminazione (**visione scotopica**)
- Ad esempio, oggetti che appaiono brillantemente colorati alla luce diurna, sembrano senza colore in presenza di bassi livelli di luce (es., luce notturna): questo perché solo i bastoncelli sono stimolati

# Fisiologia del sistema visivo

---



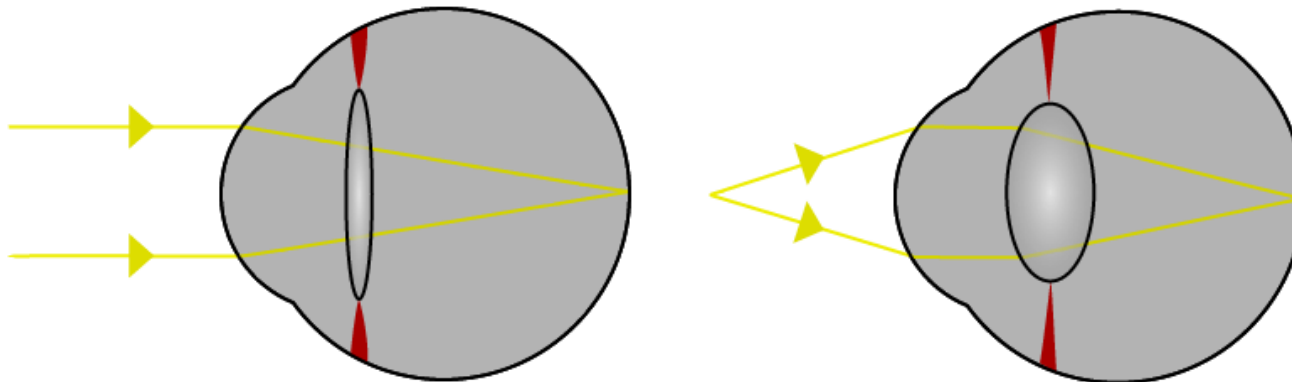
# Fisiologia del sistema visivo



# Fisiologia del sistema visivo

---

- La principale differenza tra il cristallino e una qualunque lente è che il cristallino è flessibile
  - ◆ I raggi di curvatura, anteriore e posteriore, del cristallino sono differenti e vengono controllati dalla tensione delle fibre nel corpo ciliare
  - ◆ Per focalizzare oggetti lontani, i muscoli ciliari fanno sì che il cristallino si “appiattisca”, mentre lo rendono più spesso per focalizzare oggetti vicino (accomodamento)



# Fisiologia del sistema visivo

---

- La distanza tra il centro focale del cristallino e la retina, detta **lunghezza focale**, varia da 17 mm a 14 mm (la massima distanza si ha quando l'occhio deve focalizzare oggetti lontani)
- Conoscendo la lunghezza focale è quindi possibile calcolare la dimensione dell'immagine che si forma sulla retina
- L'immagine viene visualizzata principalmente sulla fovea; dopodiché i recettori trasformano l'energia luminosa in impulsi elettrici che vengono trasmessi attraverso il nervo ottico al cervello e decodificati



# Fisiologia del sistema visivo

---

- Supponendo che un osservatore guardi un albero alto 15 m e lontano 100 m, la lunghezza focale sarà massima, quindi di circa 17 mm
- Proporzione:  $15/100 = h/17$  ( $h = 2.55$  mm)

