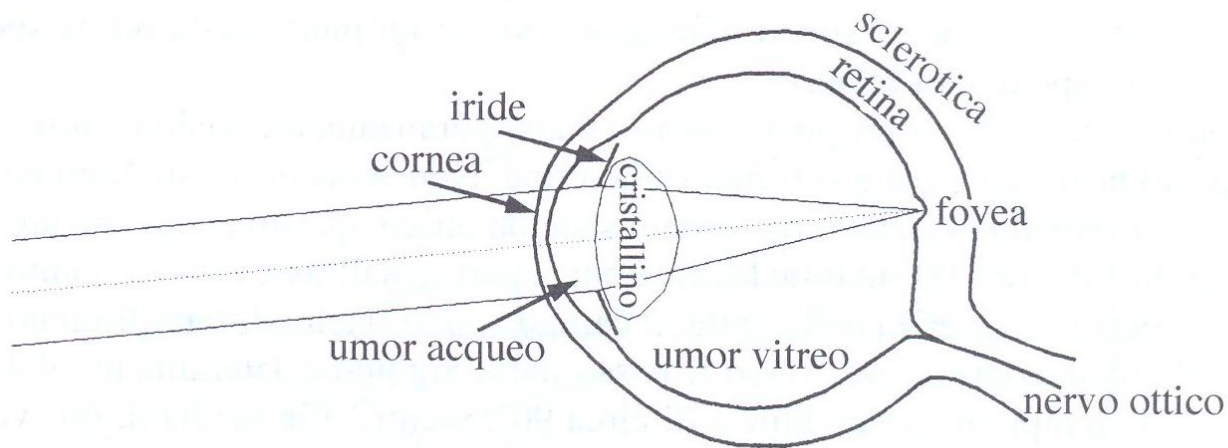
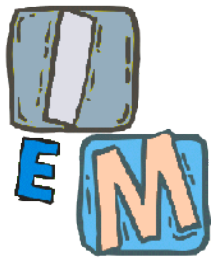


# L'occhio

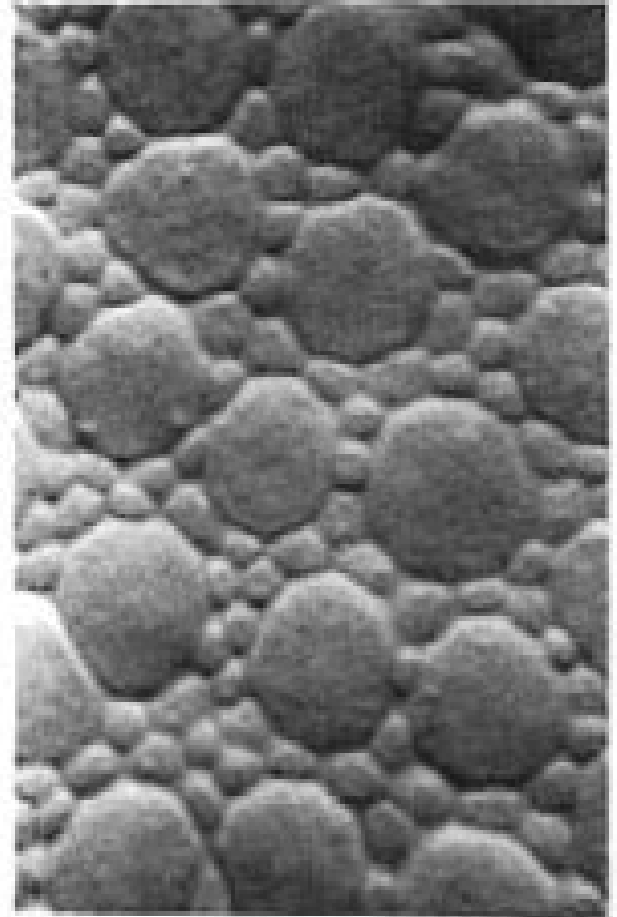
- A noi interessa molto la RETINA.
- È una membrana che ricopre la parte posteriore dell'occhio
- È formata da coni e bastoncelli che sono i fotorecettori.

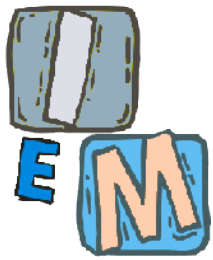




## I coni

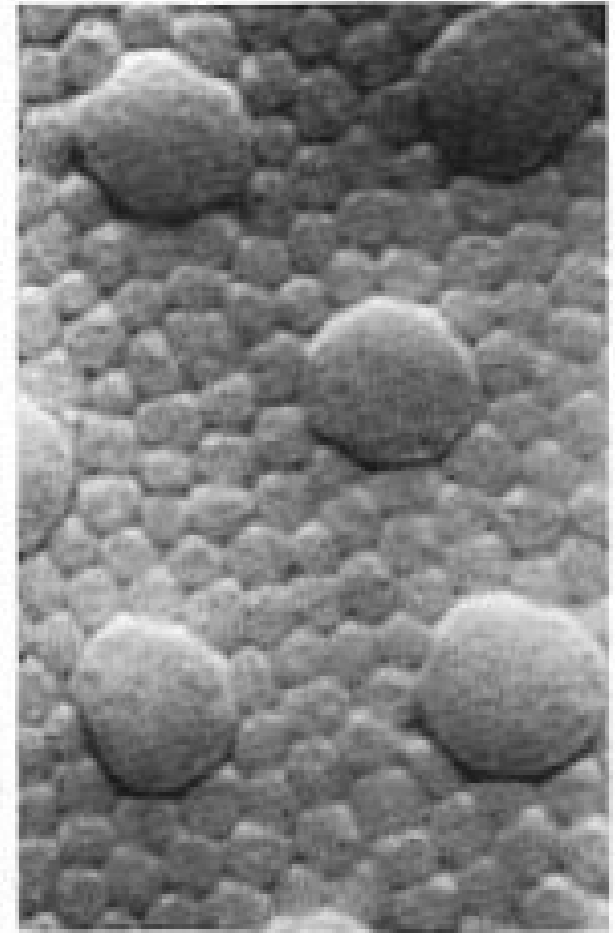
- I coni sono circa 6/7 milioni e sono concentrati in una zona centrale della retina, la fovea.
- Sono fortemente sensibili al colore ed ogni cono è collegato ad un nervo ottico.
- I coni sono responsabili della vista FOTOTICA o policroma.

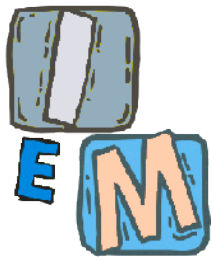




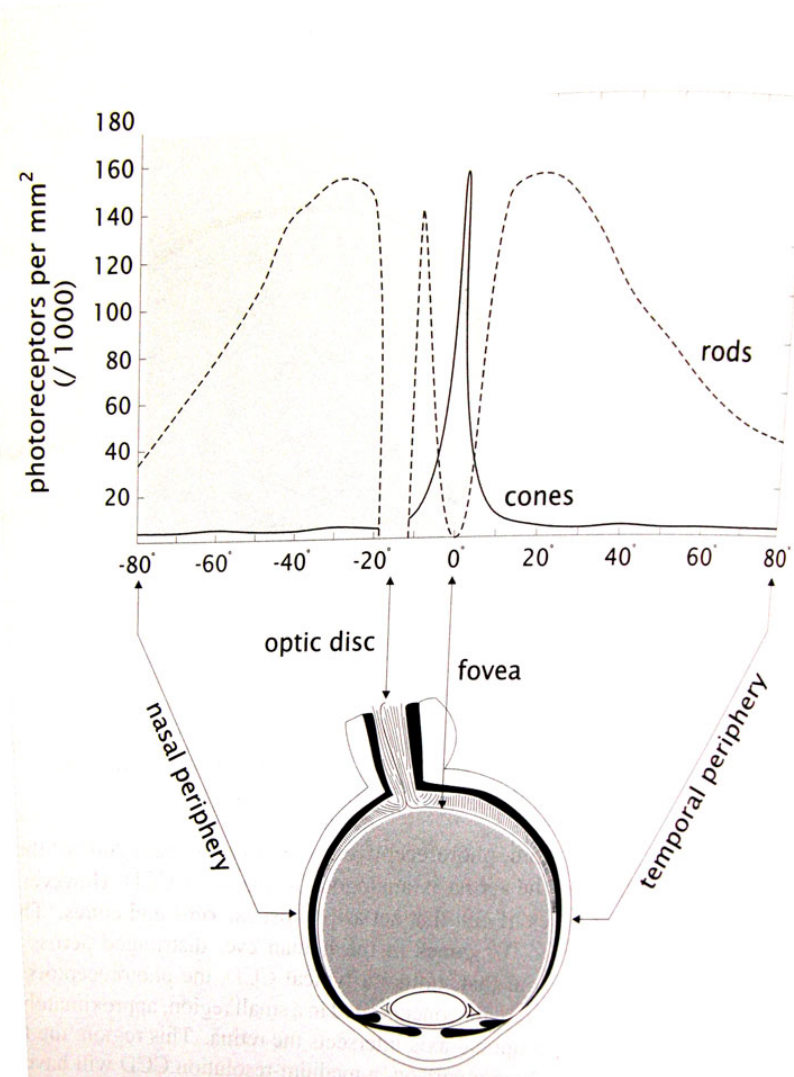
# I bastoncelli

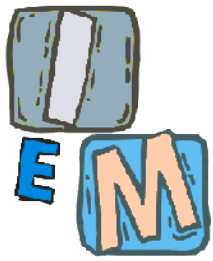
- I bastoncelli sono circa 75/150 milioni e sono distribuiti su tutta la retina.
- Sono poco sensibili al colore ed sono collegati a gruppi ad un nervo ottico.
- I bastoncelli sono responsabili della vista SCOTOPICA o monocroma.





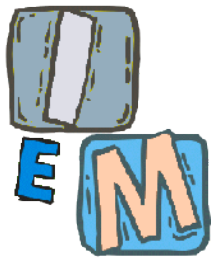
# Disposizione dei sensori sulla retina



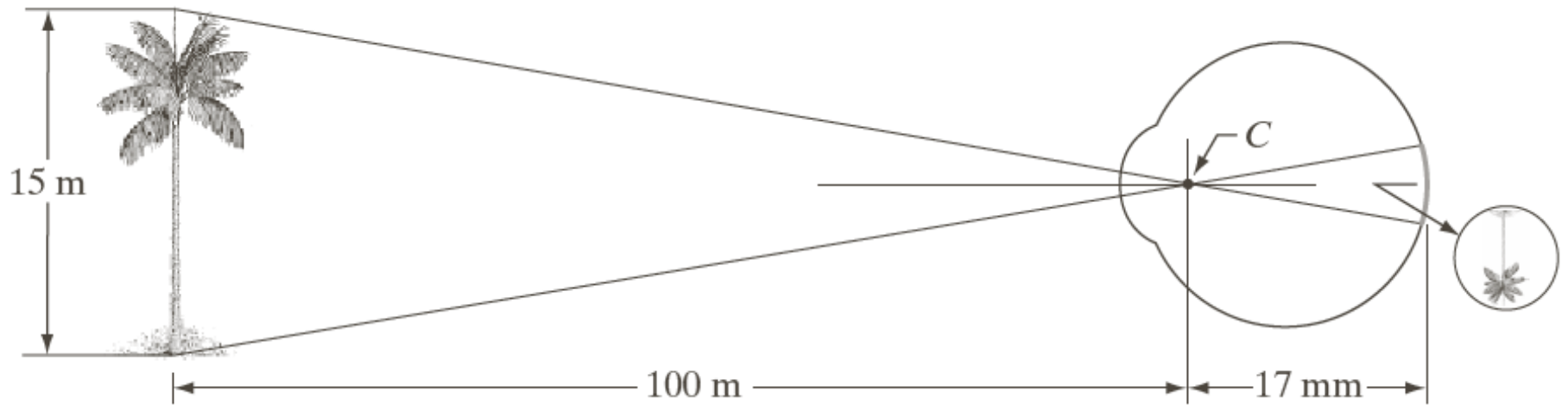


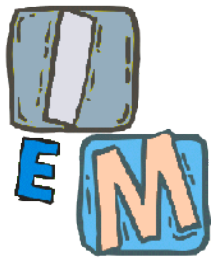
## Da ricordare!

- La fovea è una regione di 1,5 mm x 1,5 mm
- Ed ha una popolazione di coni di circa 150.000 elementi per mm<sup>2</sup>
- Il numero di coni nella fovea è di circa 337.500 elementi;
- Un CCD può contenere lo stesso numero di recettori in non meno di 5 mm x 5 mm!!



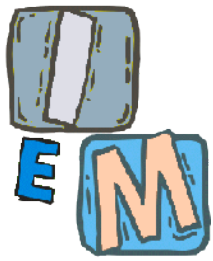
# Formazione dell'immagine



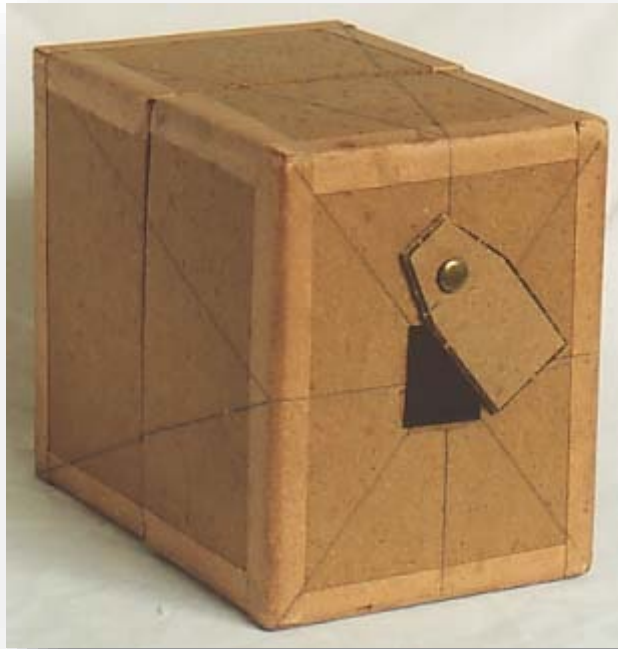


# Come si forma l'immagine nell'occhio?

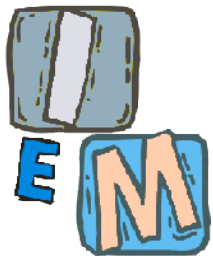
- Per comprendere come si forma l'immagine nell'occhio occorre astrarre il problema e considerare il modello del PINHOLE
- Si tratta di un modello teorico in cui si approssima l'occhio con una scatola.
- All'interno della scatola, su una parete, viene posizionata una pellicola sensibile alla luce.
- Nella parete opposta si pratica un foro con uno spillo (pin hole)!



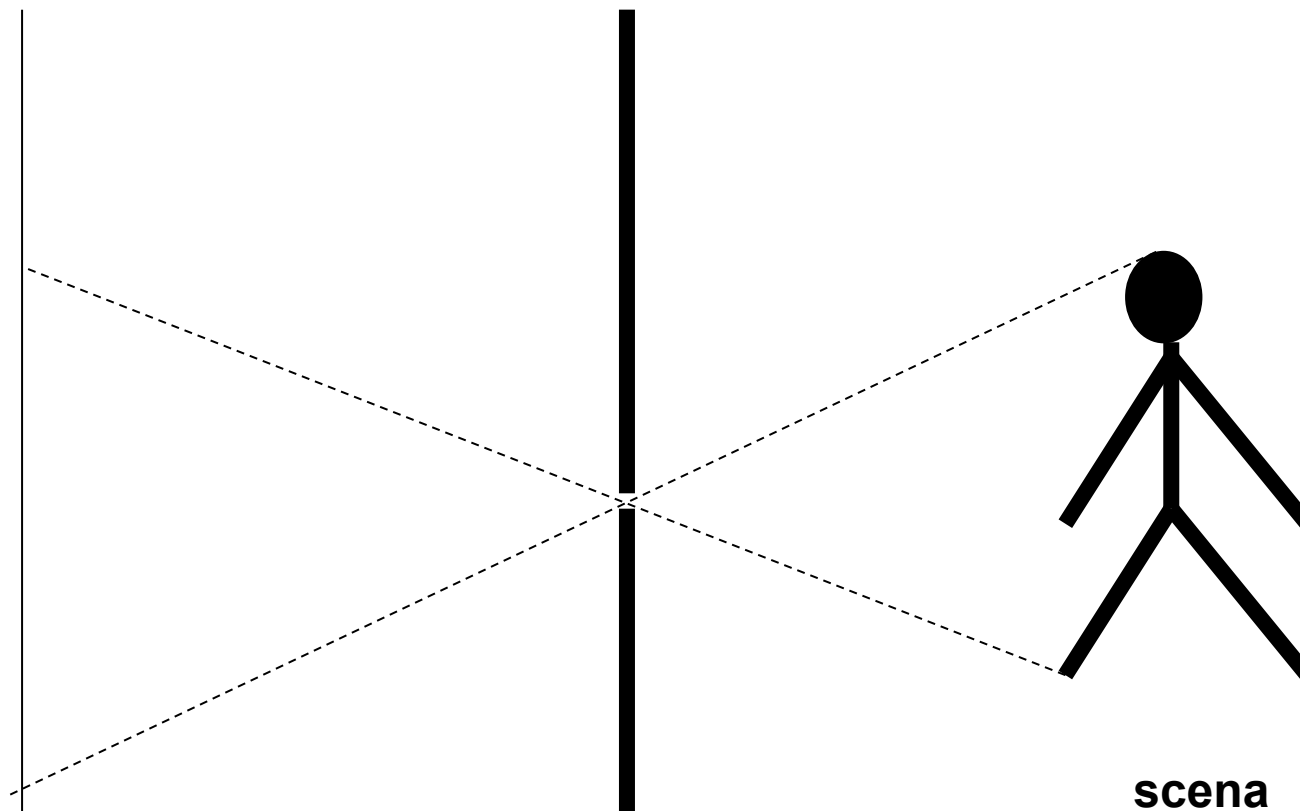
# Il pinhole





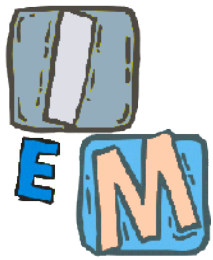


# In sezione

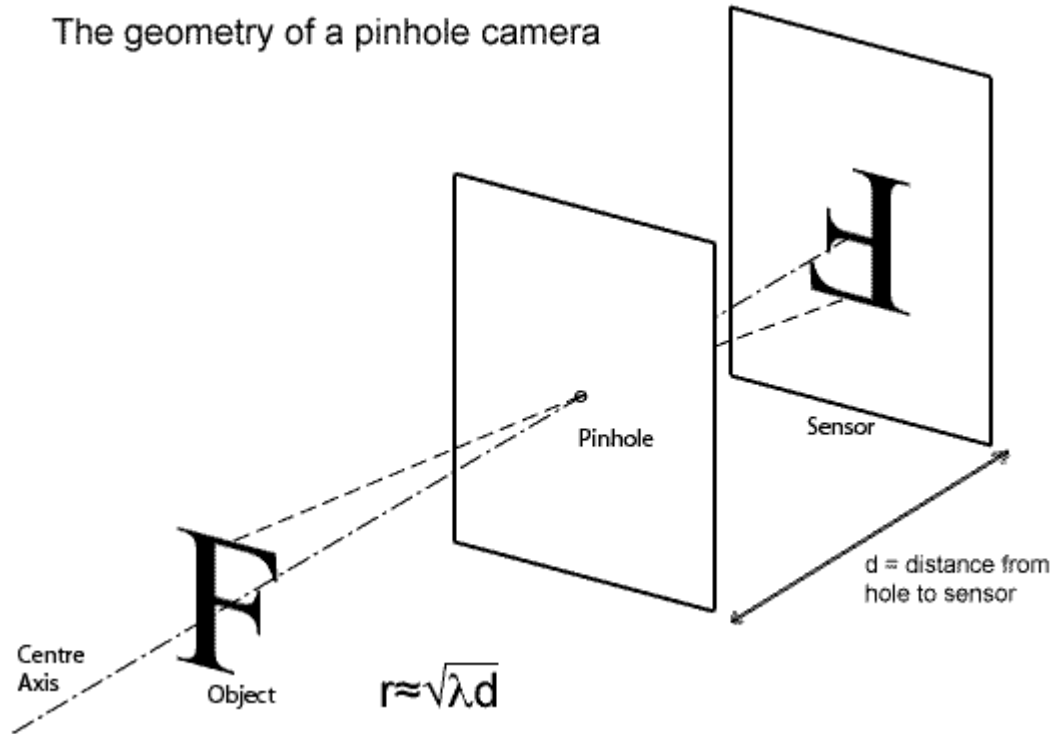


**Piano dei sensori o  
di formazione  
dell'immagine**

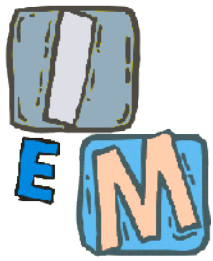
**Schermo con  
pinhole**



The geometry of a pinhole camera



- Il raggio del foro è proporzionale alla radice quadrata della distanza per la lunghezza d'onda della luce emessa.

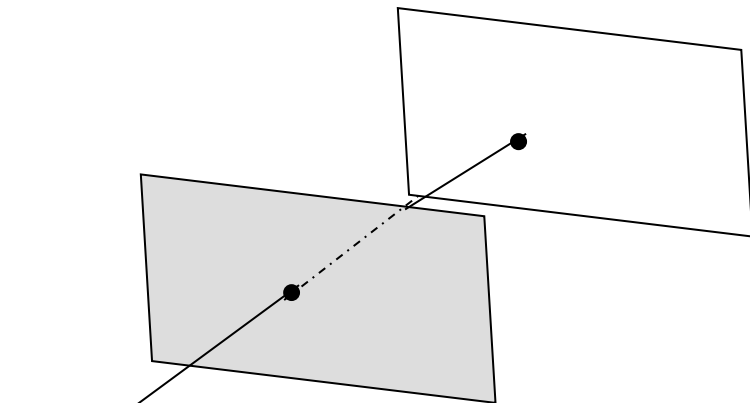


# Pinhole ideale e reale

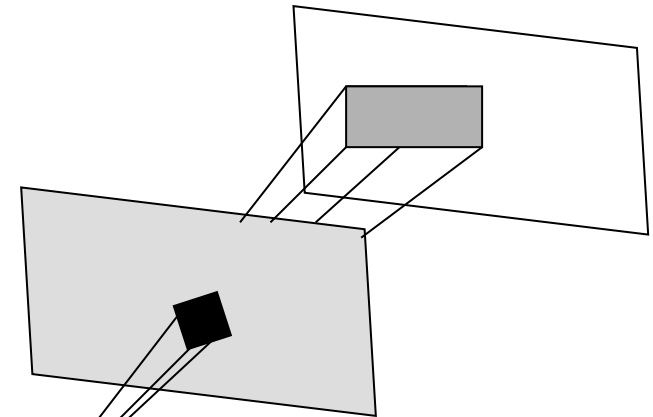
Un foro puntiforme infinitesimo (quindi senza estensione) non fa passare un numero sufficiente di fotoni per “attivare” i sensori.

Un foro puntiforme troppo piccolo genera fenomeni di diffrazione.

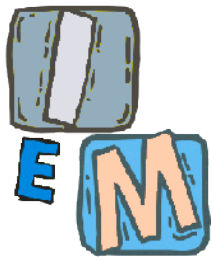
Un pinhole reale presenterà un foro con una precisa forma geometrica.



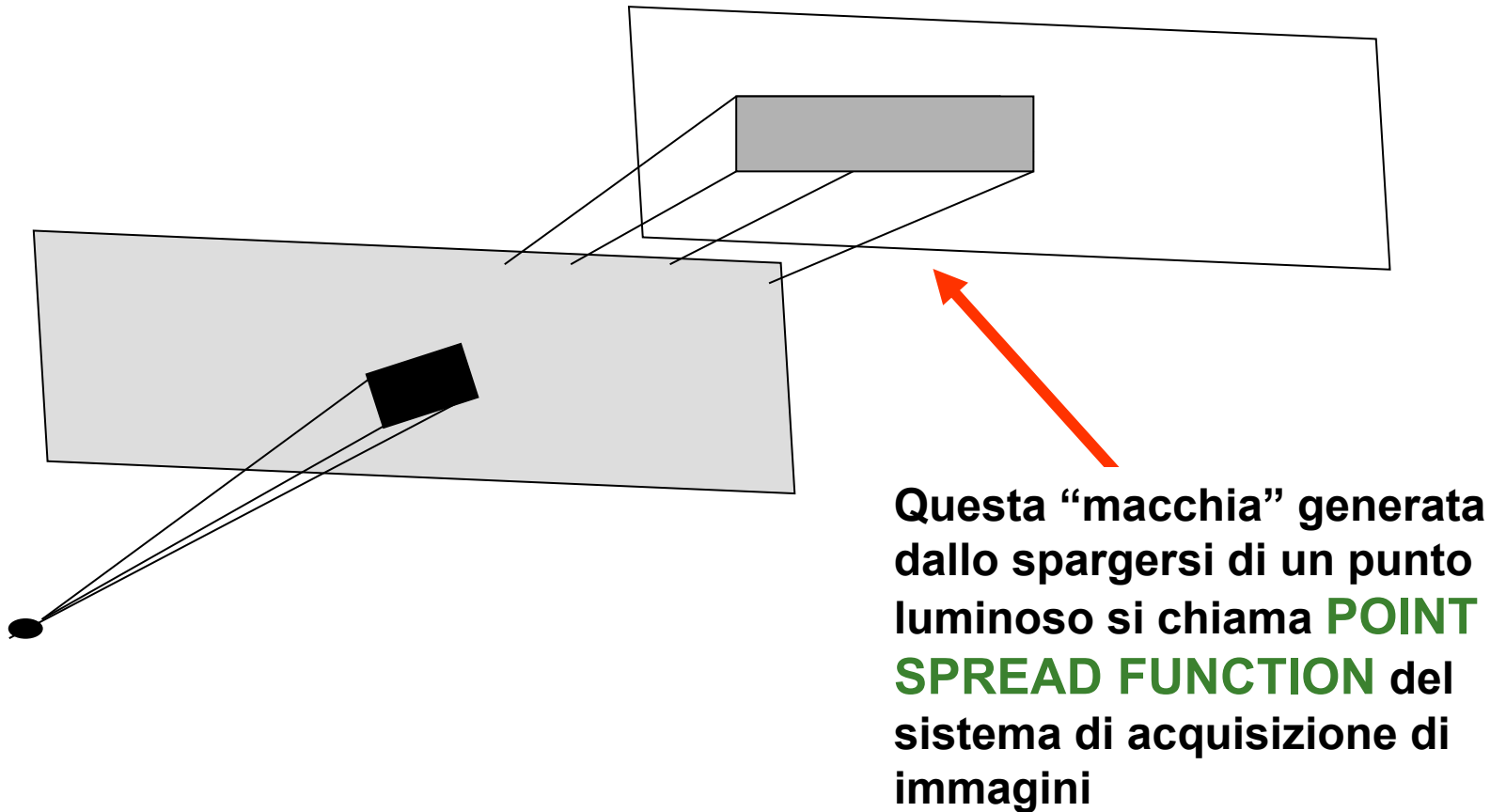
Un punto luminoso (**impulso**)  
produce un punto se passa  
attraverso un pinhole ideale

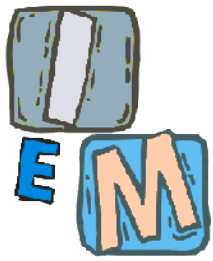


Un punto luminoso (**impulso**)  
produce un'area attraverso  
un pinhole reale



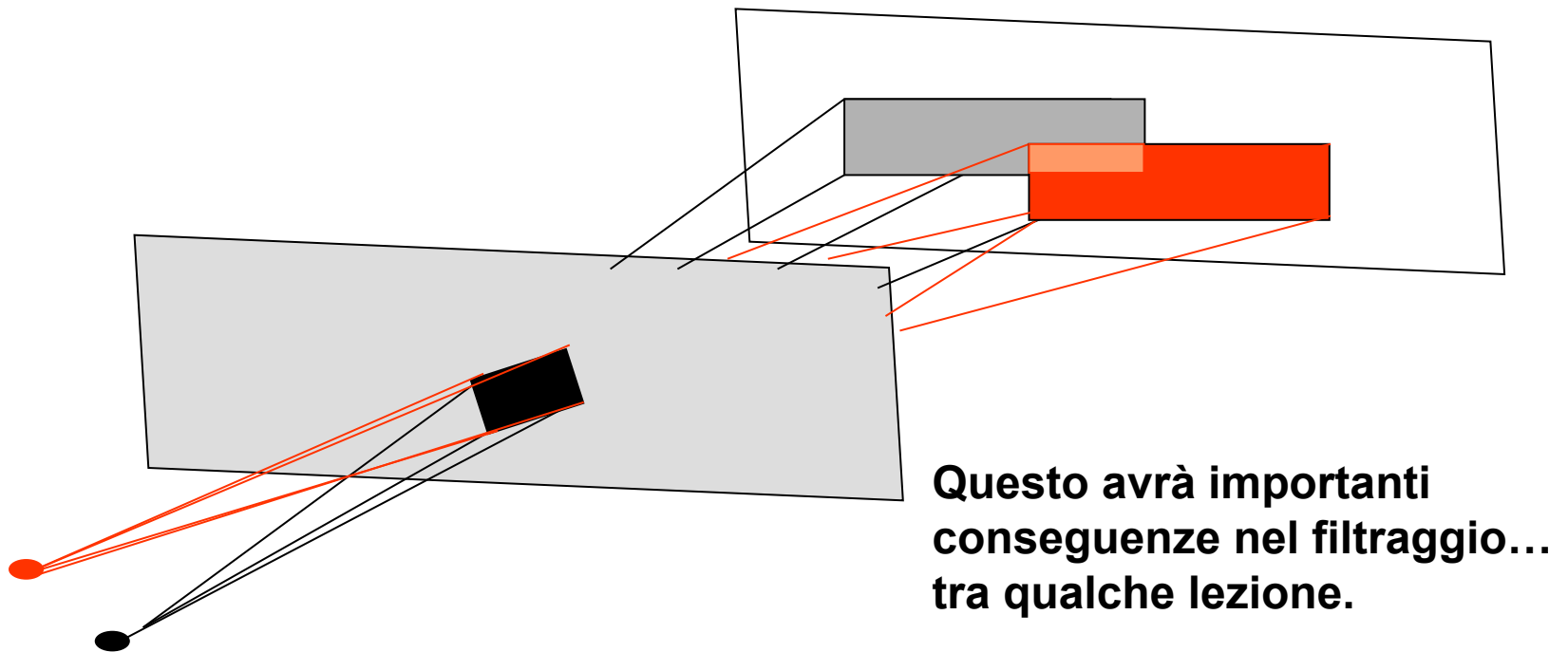
Un pinhole reale “spalma” la luce proveniente da un punto infinitesimo (detto impulso) su una area finita.

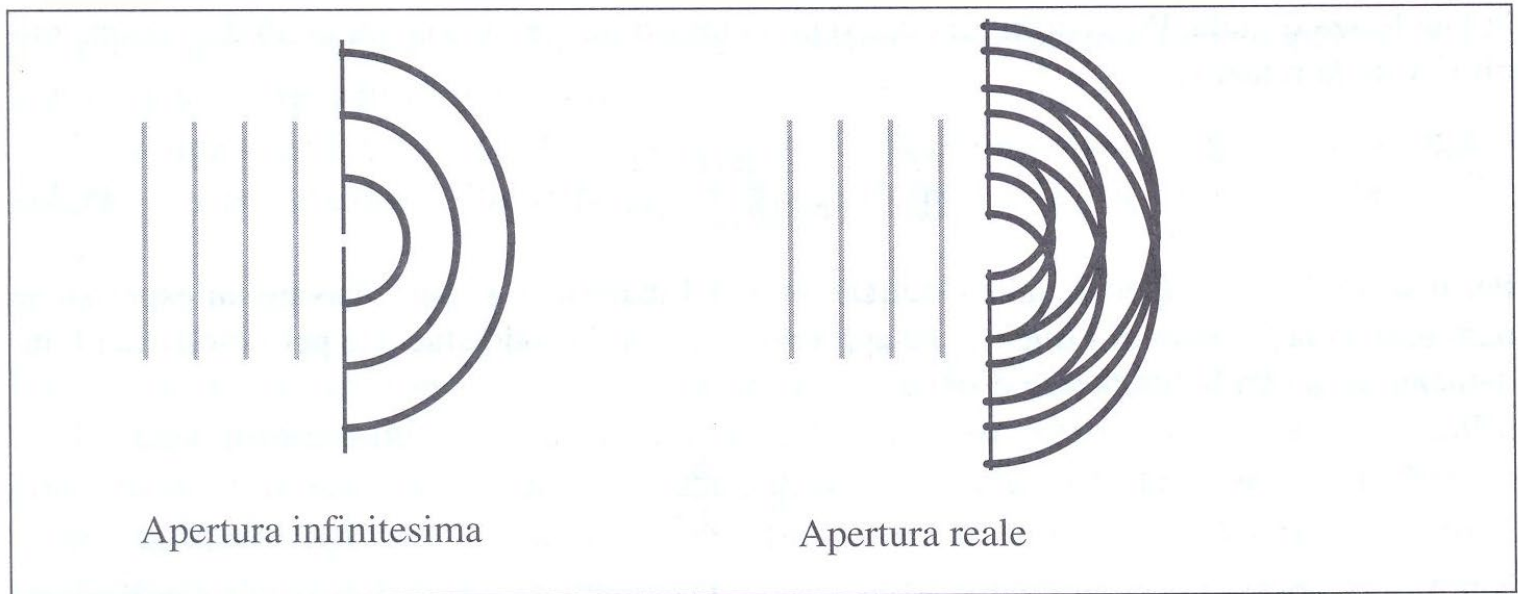
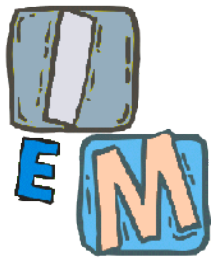


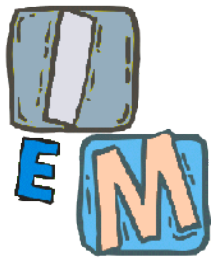


# Principio di sovrapposizione

**L'effetto di più sorgenti puntiformi vicine si “sovrappone”:**

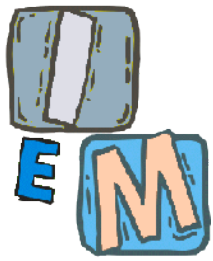






## Lenti sottili

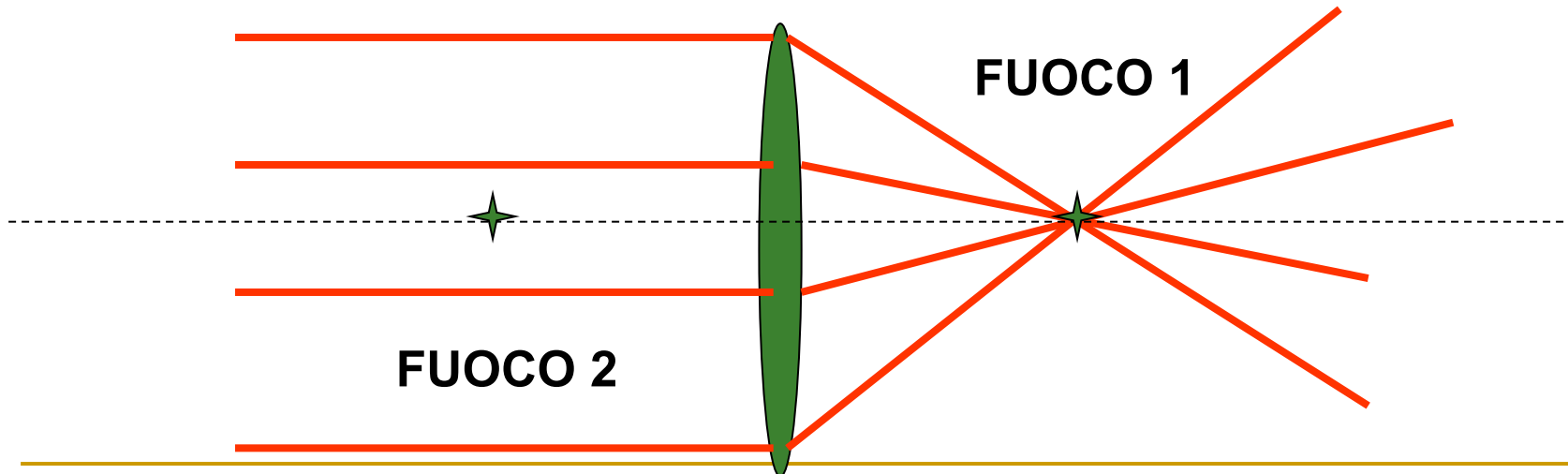
- In pratica i forellini sono inadeguati: raccolgono troppe poche radiazioni per consentire ai sensori misurazioni precise.
- Sin dal *rinascimento* si è diffuso, probabilmente osservando la rifrazione attraverso gocce d'acqua o particelle di ghiaccio, l'uso di lenti di vetro con forma lenticolare il cui diametro è in ordine di grandezza maggiore del loro massimo spessore (lente sottile).
- Tali lenti hanno proprietà simili ai pinhole



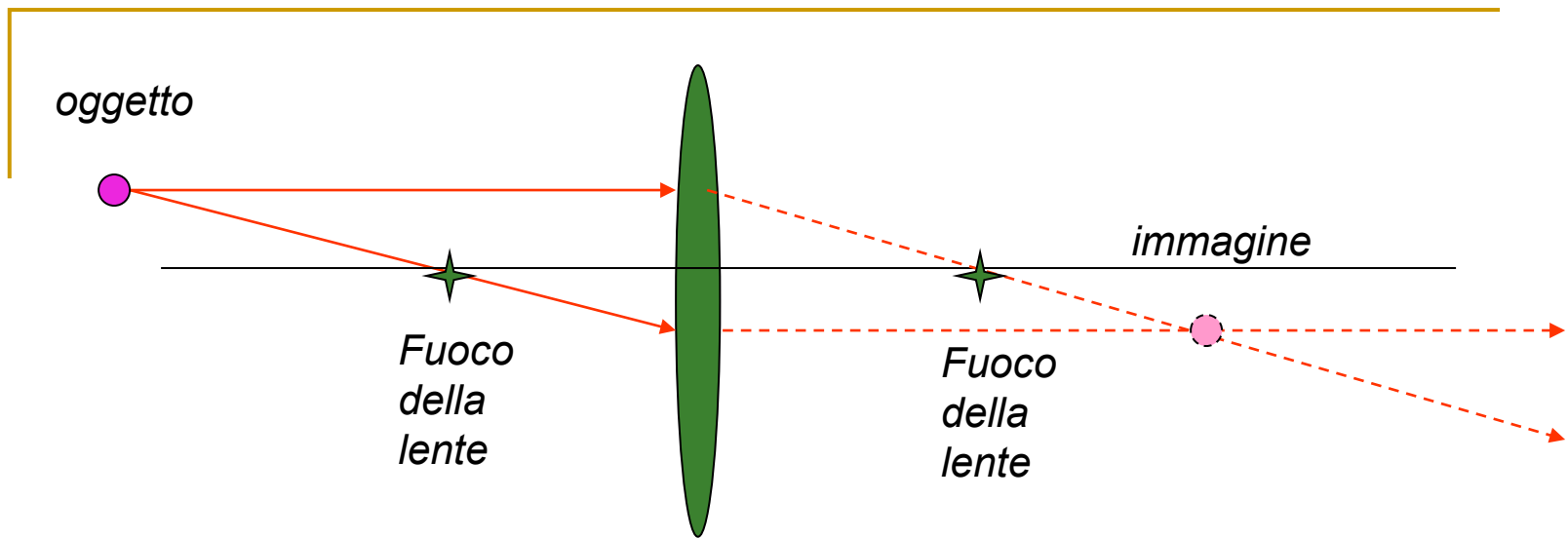
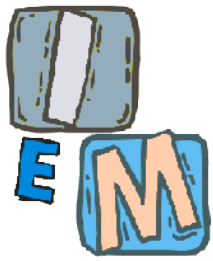
# Definizione geometrica

Una lente sottile è definita da una proprietà geometrica importante che si può enunciare come due parti “speculari” l’una all’altra:

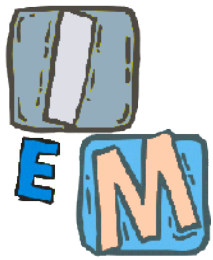
- a) raggi paralleli all’asse della lente sottile vengono concentrati in un unico punto detto FUOCO, posto a distanza  $F$  dalla lente;
- b) raggi che si dipartono dal FUOCO vengono ri-trasmessi tutti paralleli nella direzione dell’asse della lente.
- c) una lente sottile ha due fuochi equidistanti da essa.



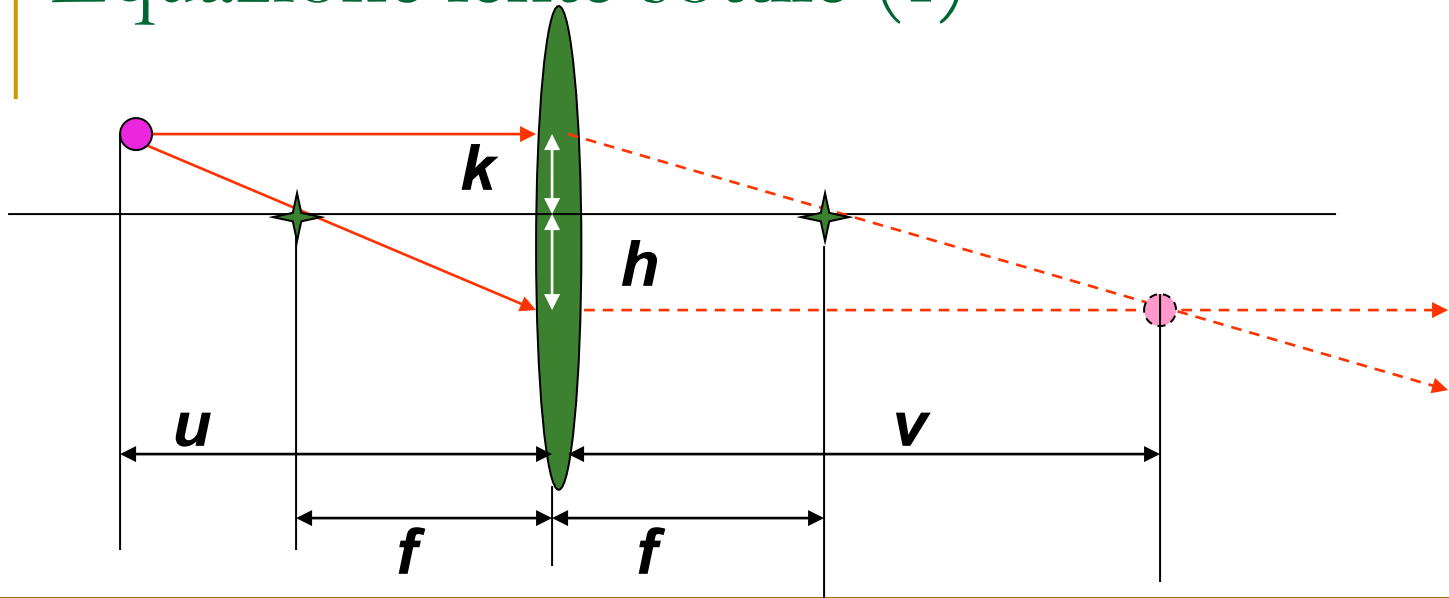




- Un oggetto puntiforme, emette raggi luminosi in ogni direzione, solo uno è parallelo all'asse ottico e la lente lo farà passare per il fuoco.
- Solo uno passa per il fuoco e la lente lo farà passare in un raggio parallelo alla lente.
- Il punto in cui i due raggi si reincontrano è il punto di formazione della immagine dell'oggetto puntiforme.
- Si può dimostrare (per una lente ideale) che anche gli altri raggi si “reincontrano” in tale punto.
- Se si pone il piano dei sensori più avanti o più indietro del piano che contiene l'immagine si ottiene una immagine SFOCATA dell'oggetto originale.



# Equazione lente sottile (1)



Vogliamo ottenere la relazione che lega tra loro  $u$ ,  $v$  ed  $f$ . Ci aiuteremo con le due quantità  $h$  e  $k$  come in figura.

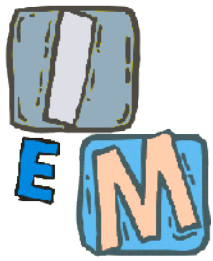
Il triangolo di base  $u$  e altezza  $h+k$  e quello di base  $f$  e altezza  $h$  (sulla sinistra della lente) sono simili da cui:

$$u:(h+k)=f:h \text{ da cui si ricava che } (h+k)=uh/f$$

Il triangolo di base  $v$  e altezza  $h+k$  e quello di base  $f$  e altezza  $k$  (sulla destra della lente) sono simili da cui:

$$v:(h+k)=f:k \text{ da cui si ricava che } (h+k)=vk/f$$

Eguagliando le due relazioni ed eliminando  $f$  si ottiene che  $h/v=k/u$ . Ora da  $(h+k)=uh/f$  possiamo dividere ambo i membri per  $u$  ed otteniamo  $h/u+k/u=h/f$  cioè ancora sostituendo  $h/u+h/v=h/f$  da cui eliminando il fattore comune  $h$  si giunge a  $1/u+1/v=1/f$ : equazione della lente sottile.

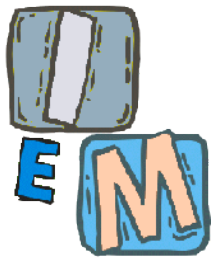


# Equazione lente sottile (2)

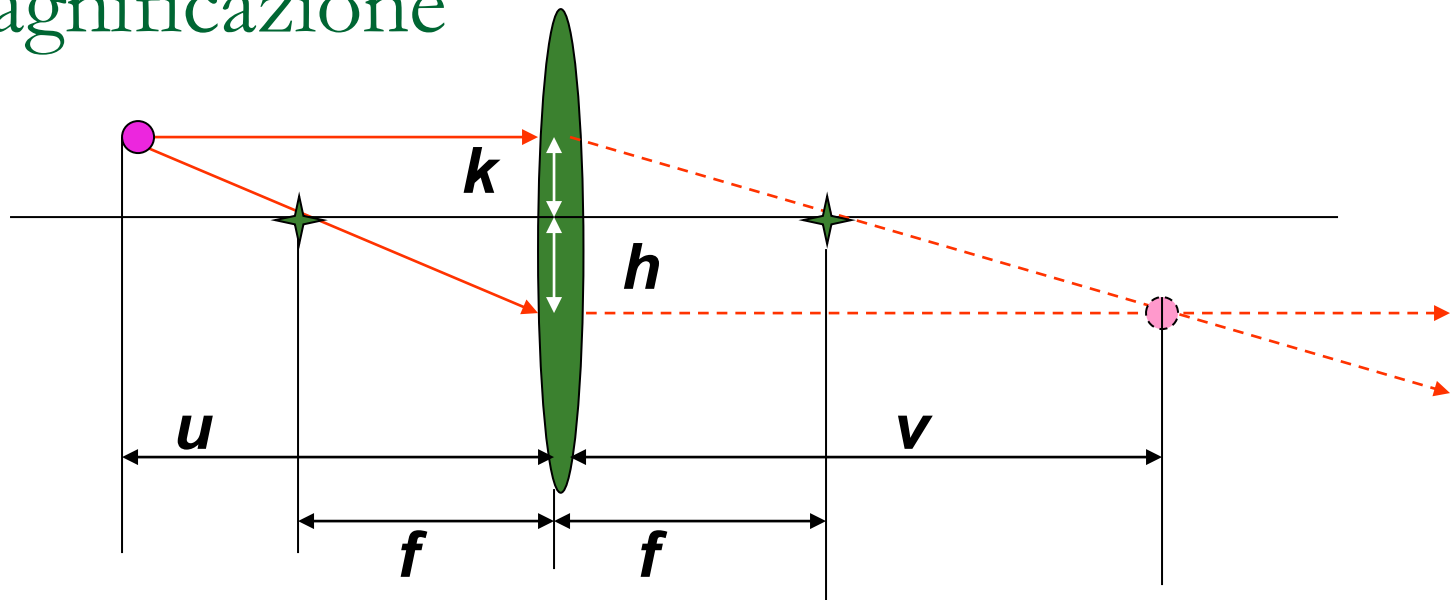
$$1/u + 1/v = 1/f$$

Se  $f$  si misura in metri la quantità  $1/\text{metro}$  si definisce pari ad una **diottria**.

- a) In una lente “fissa” la quantità  $f$  è costante. Se la distanza dell’oggetto dalla lente, cioè  $u$ , cresce, per la relazione di cui sopra  $v$  non può che diminuire: ecco perché la messa a fuoco richiede che il piano dei sensori possa essere avvicinato o allontanato dalla lente.
- b) Se il piano dei sensori non può essere mosso (caso della retina umana!) l’unica cosa da fare è **aggiustare la lunghezza focale** (ciò fanno i muscoli che mantengono in tensione il **cristallino**). La variabilità della lunghezza focale della lente si misura anche essa in diottrie.
- c) Se due oggetti sono a distanza  $u_1$  e  $u_2$  e entrambe queste quantità sono molto maggiori di  $f$  essi formano le loro immagini approssimativamente su un unico piano (i due valori corrispondenti  $v_1$  e  $v_2$  sono vicinissimi). Se  $u_1$  e  $u_2$  sono però differenti e comparabili (meno di 30 volte la distanza della lente) allora essi non possono essere focalizzati contemporaneamente: si manifesta il fenomeno della “**profondità di campo**” che risulta più accentuato se  $f$  è grande.

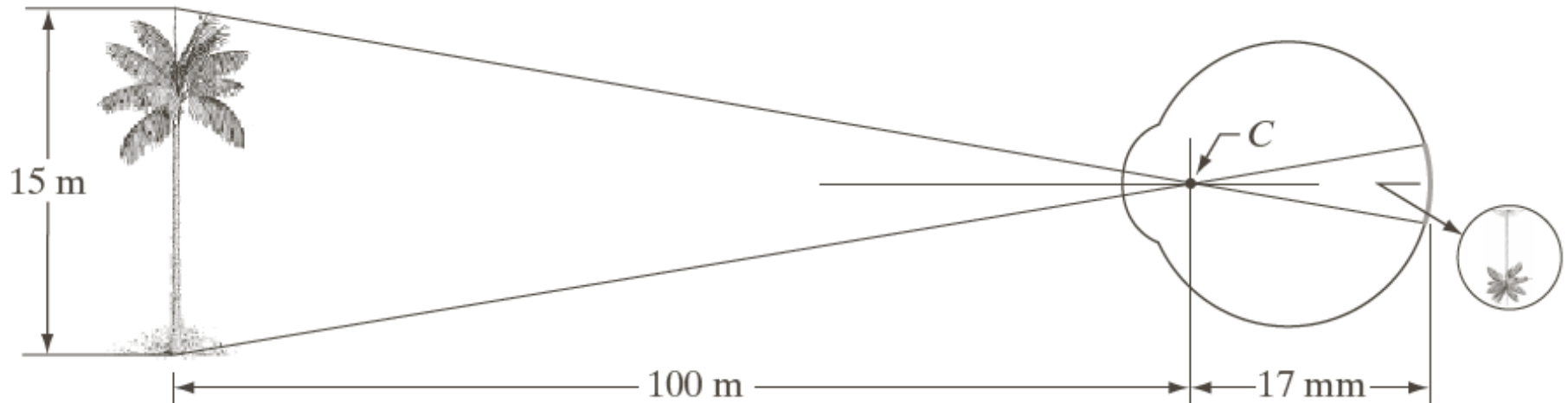
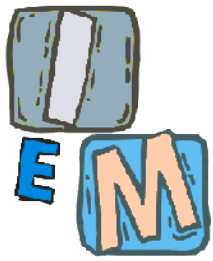


# Magnificazione

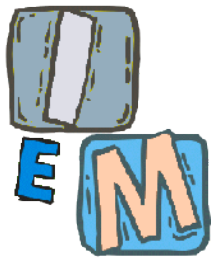


Come vengono trasformate le distanze dalla lente sottile? Vogliamo scoprire la relazione tra  $u$ , distanza dall'oggetto, e  $v$ , distanza dalla sua immagine. Poiché si può dimostrare che i due triangoli sono simili si ha facilmente che  $h/k = v/u = m$  fattore di magnificazione.

Partiamo dalla equazione della lente sottile:  $1/u + 1/v = 1/f$ . Moltiplico per  $v$  e ottengo:  $v/u + 1 = v/f$  cioè passando agli inversi  $f/v = 1/(m+1)$ . Moltiplicando per  $u$  si ha  $f/m = u/(m+1)$  da cui si giunge a  $f = um/(m+1)$ .



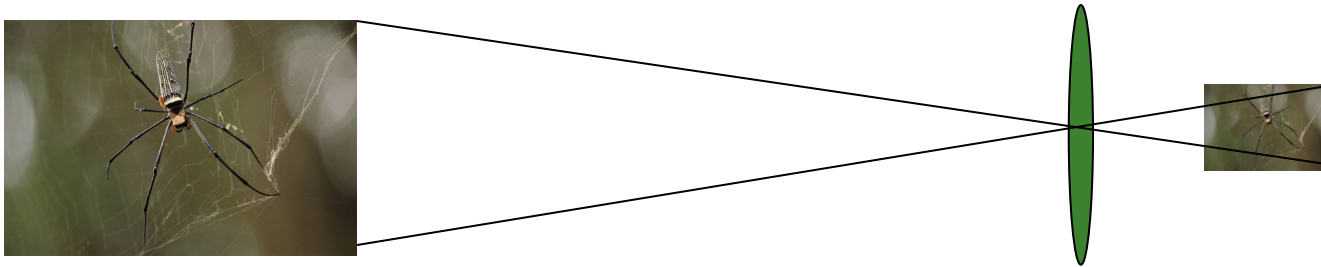
- Sempre per lo stesso principio, si ha che l'altezza  $h$  dell'immagine sulla retina è:  
$$15/100 = h/17 \text{ e cioè } h = 2,55 \text{ mm}$$



# Esempio di magnificazione

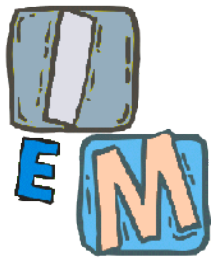
La relazione  $f = um/(m+1)$  è utile se si vuole fissare il fuoco in modo da garantire una magnificazione fissata.

Esempio: Un oggetto (il ragno) distante  $u=1\text{cm}$  è fotografato da una macchina digitale con “chip ccd” distante  $v=0.5\text{cm}$ . A quanto si deve fissare il fuoco per potere avere lo stesso effetto su una farfalla che si trova a  $u'=500\text{cm}$  dalla lente?



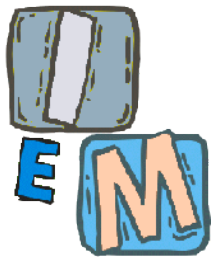
Il fattore di magnificazione è  $m=0.5/1=0.5$

$f = 500*0.5/1.5 = 166.66 \text{ cm}$  (un teleobiettivo con una focale di più di un metro e mezzo non è esattamente un oggetto comodo da portare nelle passeggiate nel bosco).



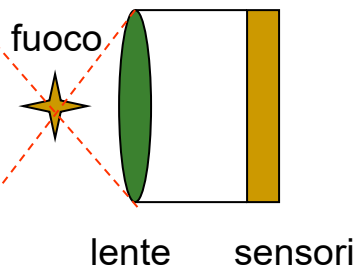
# Esempio di magnificazione

- **Altro scenario:** l'oggetto è sempre ad una distanza  $u=1\text{cm}$  e si usa una macchina analogica con  $v=2\text{cm}$ . Se la farfalla è a distanza  $u'=5\text{ cm}$  si ha che  $m=2/1=2$  e  $f=5*2/3=3.3\text{ cm}$
- **Ultimo scenario:** l'oggetto è sempre ad una distanza  $u=1\text{cm}$  e si usa una macchina digitale con CCD con  $v=1\text{cm}$ . Se la farfalla è a distanza  $u'=5\text{ cm}$  risulta  $m=1$  e  $f=5*1/2=2.5\text{ cm}$ .

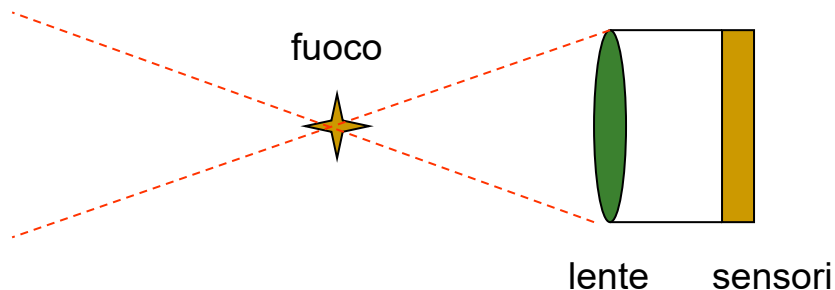


# Ampiezza di campo e focale

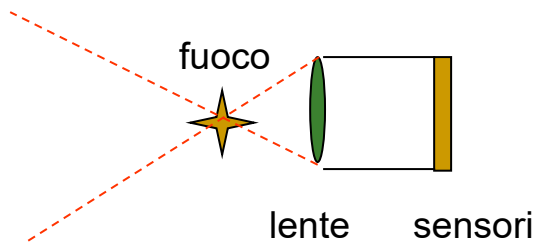
Focale piccola,  
grande campo



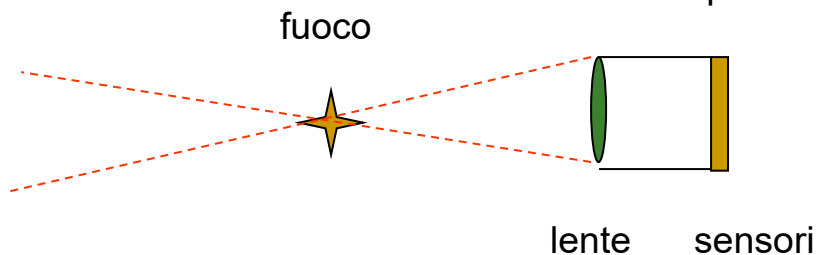
Focale grande,  
piccolo campo



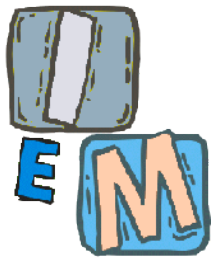
Focale piccola,  
area sensori piccola  
si riduce il campo



Focale grande,  
area sensori piccola  
si riduce il campo







# Combinando più lenti

