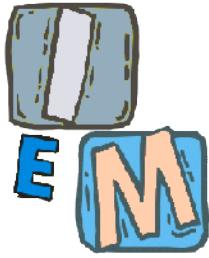


Elaborazione delle Immagini

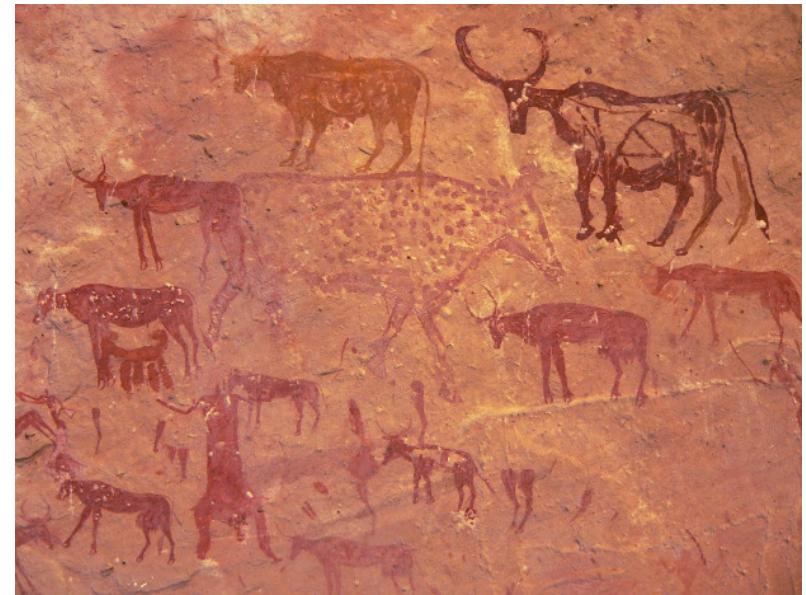


Ruolo culturale delle immagini

“Una immagine vale più di mille parole...”



“Il linguaggio delle immagini è stato dell'uomo sin dalle sue origini, il linguaggio scritto lo è solo da pochi millenni”





La comunicazione visuale è la forma più immediata ed efficace di comunicazione





Ruolo culturale delle immagini

“Una immagine vale più di mille parole...”

«... Solo che occupa più spazio!»



Le immagini

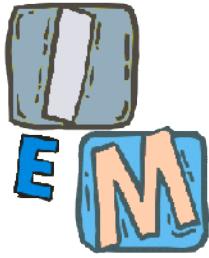
- Siamo circondati da immagini
- L'occhio interpreta l'immagine facendo sì che il colore, il movimento e la profondità diventino delle vere e proprie dimensioni aggiuntive rispetto all'informazione iniziale.
- Le immagini digitali sono campionate per essere rappresentate da un numero finito di campioni... (i dettagli nelle prossime lezioni)



Prima fotografia non digitale

- Ecco il primo documento fotografico della storia (1827).
- Il soggetto è occasionale: un tetto visibile dalla finestra dell'autore, Joseph Nicéphore Niépce (1765-1833). Si intitolava «Punto di vista da una finestra del Gras a Saint-Loup-de-Varenne» (o più brevemente «Vista dalla finestra a Le Gras»).
- La lastra eliografica da lui preparata fu "esposta" per 8 ore.





Un po' di storia delle immagini digitali

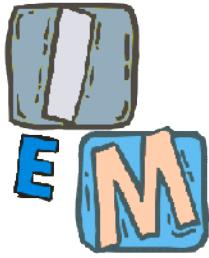
- La prima applicazione di immagine digitale si ha nelle stampe dei quotidiani.
- Nel 1920 una immagine viene trasmessa via cavo tra New York e Londra al fine di comparire su un quotidiano.
- Il protocollo di trasmissione è specifico per l'immagine e il risultato è stampato in halftoning da apposite stampanti.



Un po' di storia delle immagini digitali

- La stampa in halftoning è utilizzata per molti anni.
- Nel 1922 cambia il tipo distampa e si possono ottenere fino a 5 livelli di grigio.
- Nel 1929 i livelli di grigio diventano 15

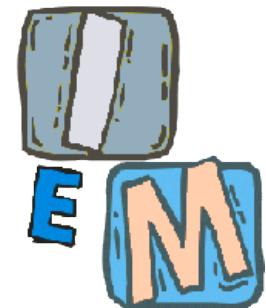




La prima elaborazione di una immagine digitale

- La prima volta che una immagine viene elaborata al computer è nel 1964, quando un computer della NASA riceve ed elabora un'immagine della luna e ne corregge alcune distorsioni ottiche.



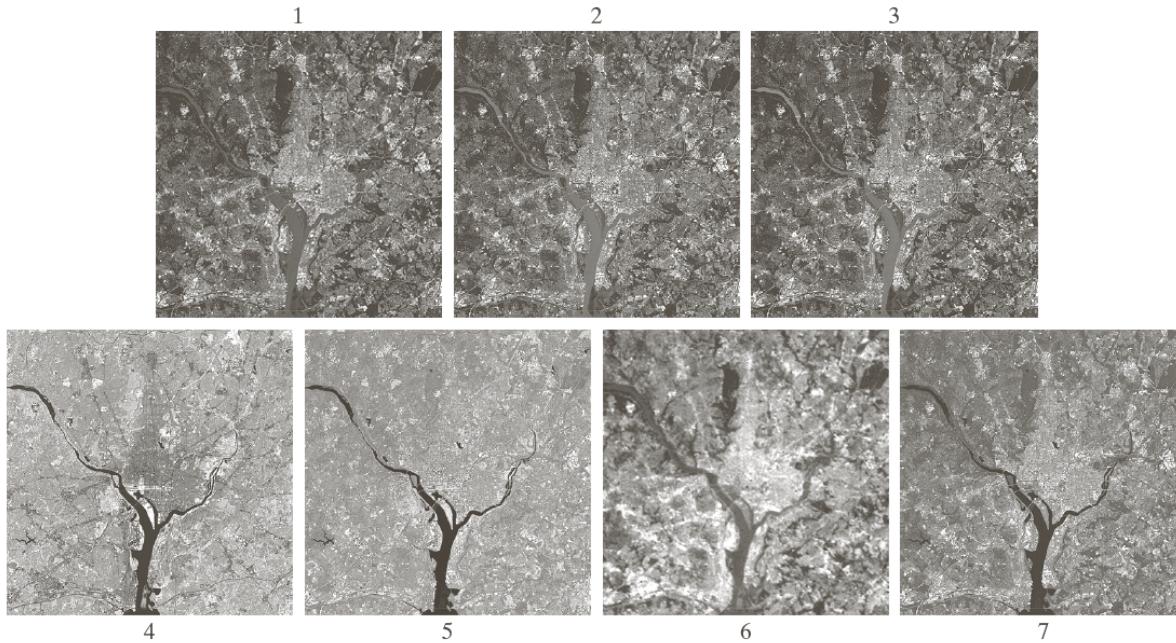


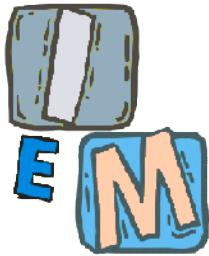
A cosa serve elaborare una immagine digitale?

Vediamo alcune applicazioni pratiche

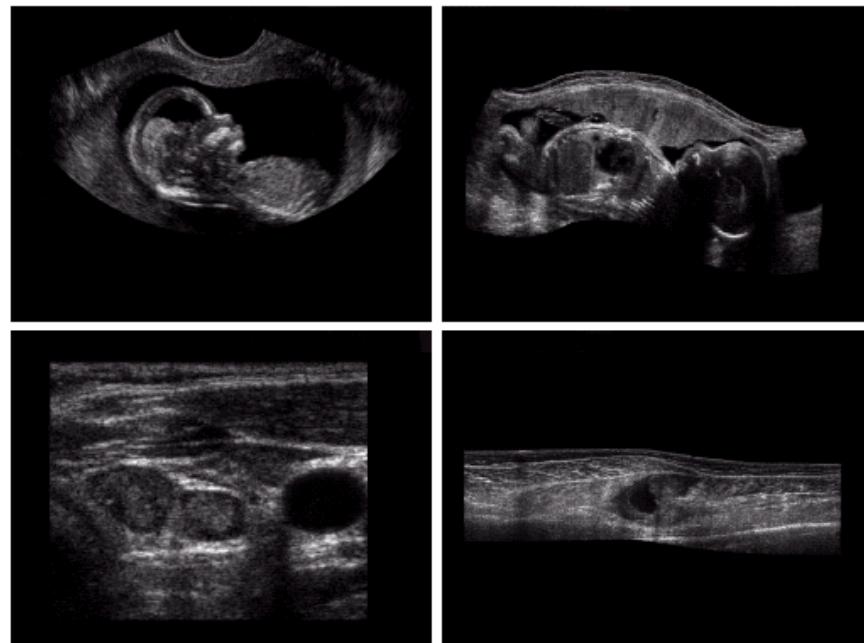
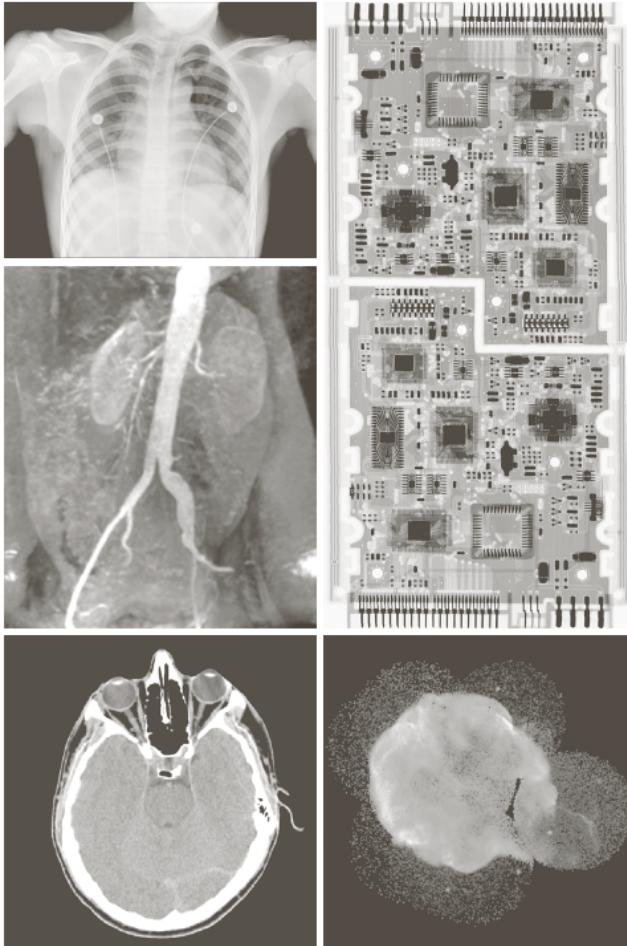


Dal satellite





In medicina





Per le forze dell'ordine



5. Loop.



6. Central pocket loop.



7. Plain whorl.

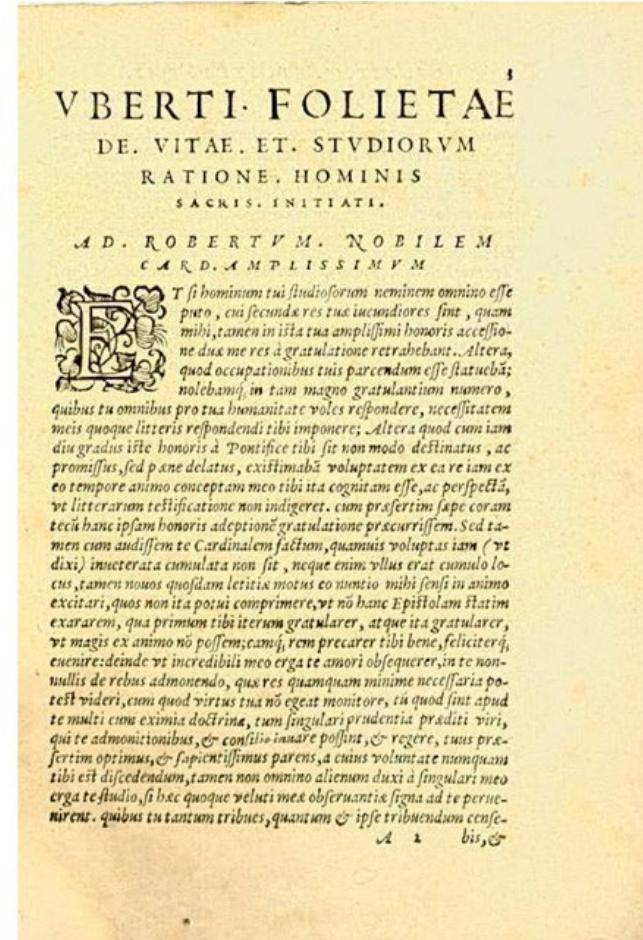
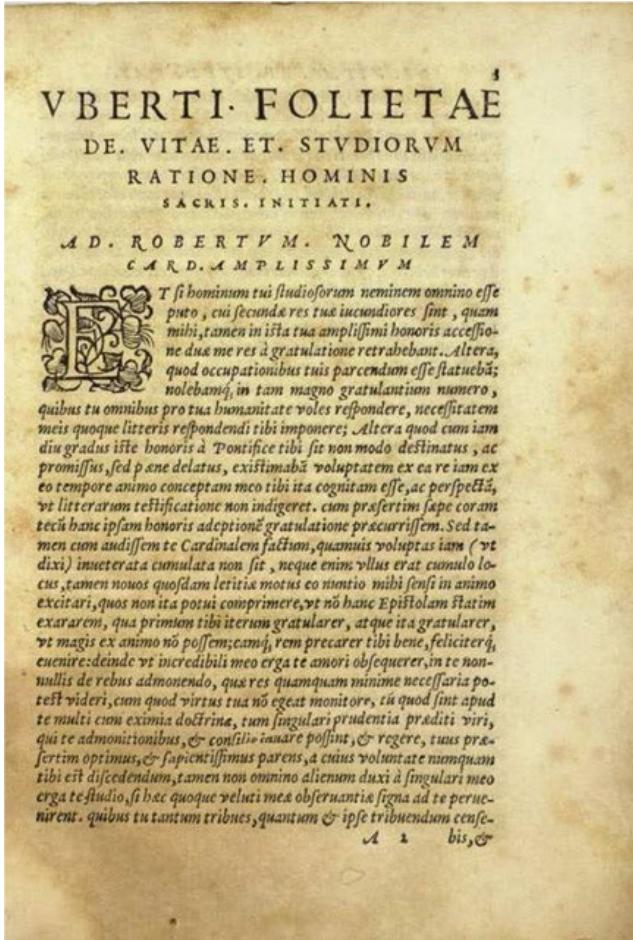


8. Double loop.



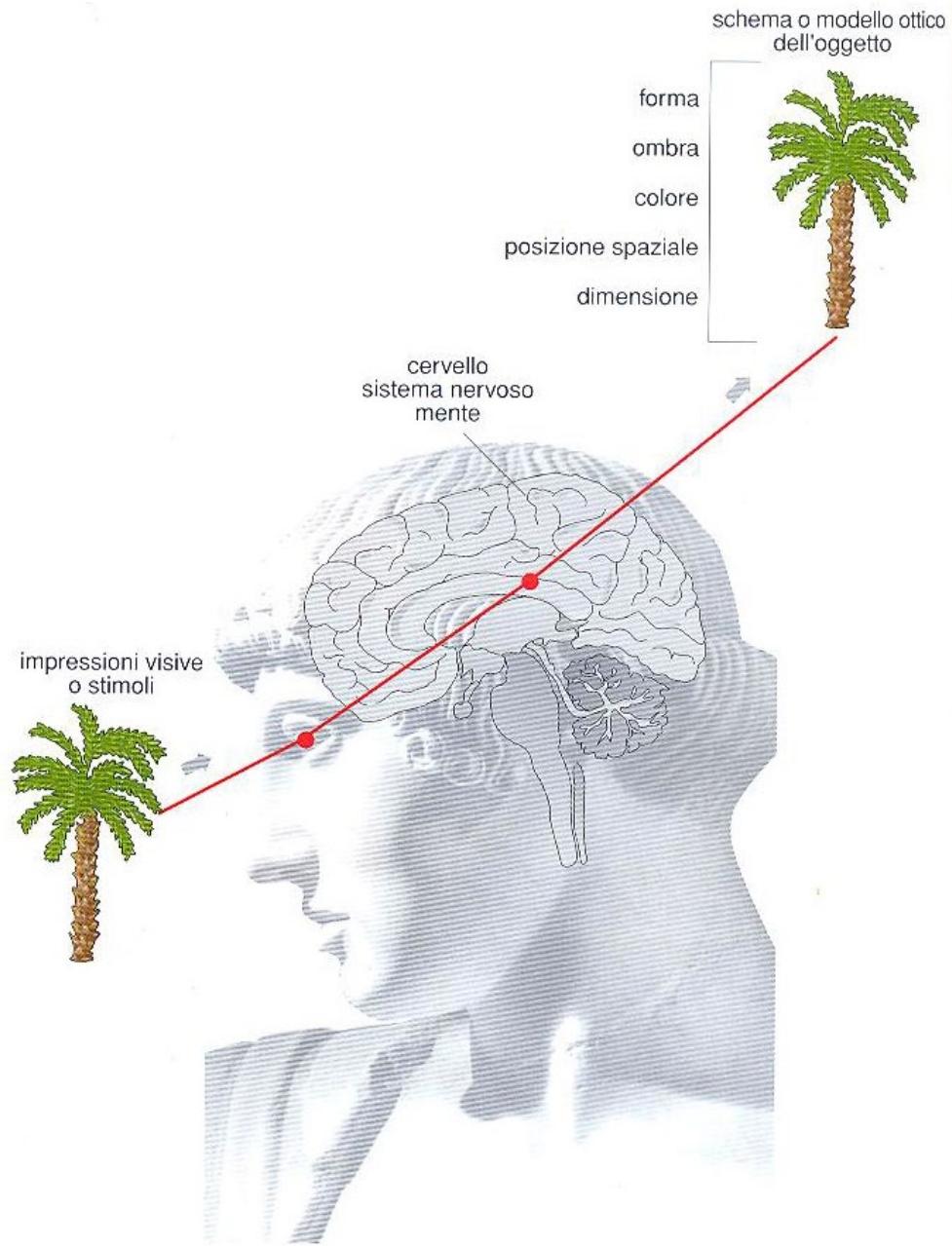


Per i beni culturali





L'occhio «vede» ma è il cervello che elabora le immagini.

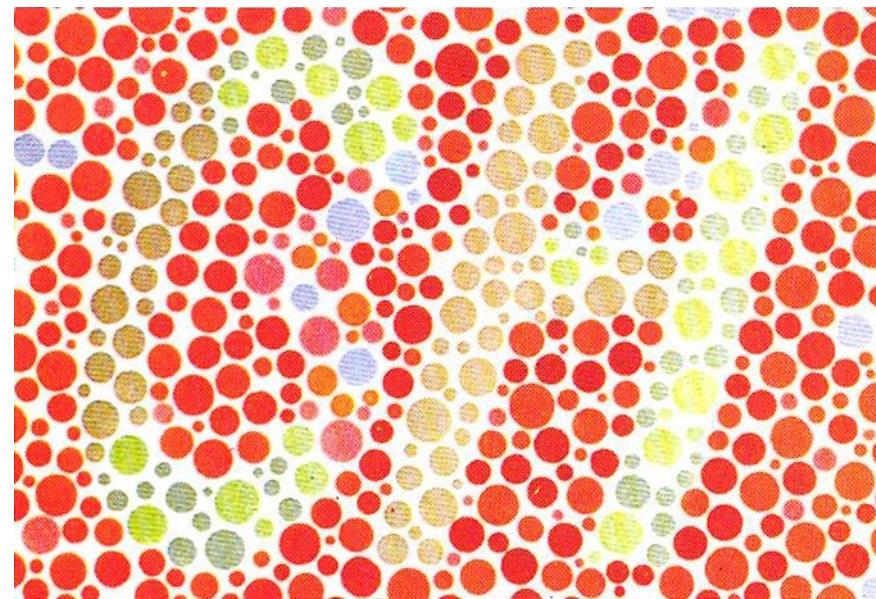




Le leggi della percezione visiva

Il nostro modo di reagire agli stimoli visivi e formare immagini è soggettivo. Per esempio, non tutti gli individui hanno la stessa sensibilità alle differenze cromatiche.

Ad esempio i daltonici non riescono a distinguere le lettere CH nell'immagine qui sotto.

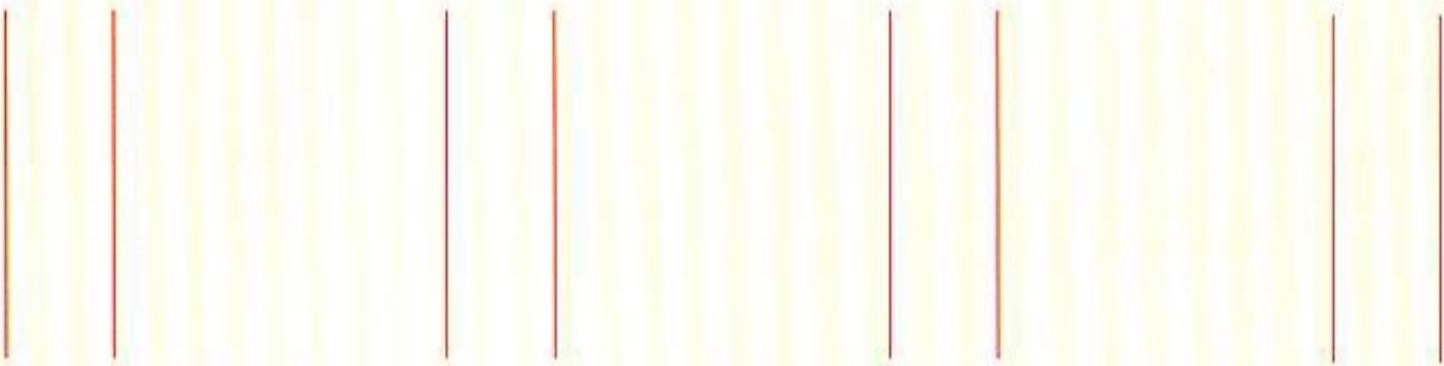




Le leggi della percezione visiva

1. LEGGE DELLA VICINANZA

Le parti più vicine di un insieme entrato nel nostro campo visivo tendono a essere percepite come raggruppate in unità. Nell'esempio in figura i segmenti verticali non sono percepiti uno a uno ma accoppiati, due a due.

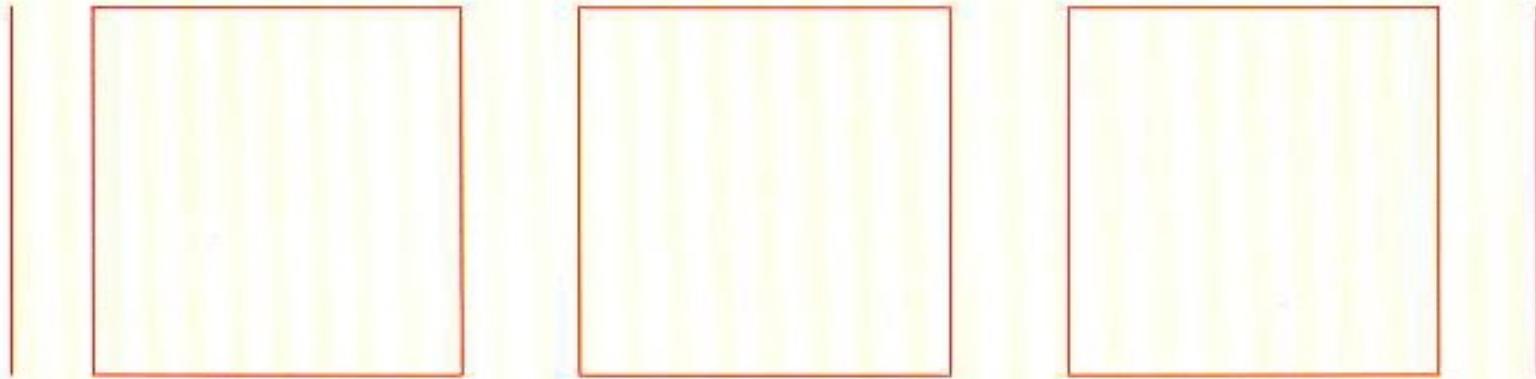




Le leggi della percezione visiva

2. LEGGE DELLA CHIUSURA

Le figure chiuse si vedono più facilmente di quelle aperte e tendono a prevalere su di esse. Nell'esempio in figura i segmenti sono stati uniti orizzontalmente e li percepiamo come quadrati. Triangoli, quadrati, cerchi, sono forme chiuse semplici e unitarie che si impongono facilmente alla nostra visione.



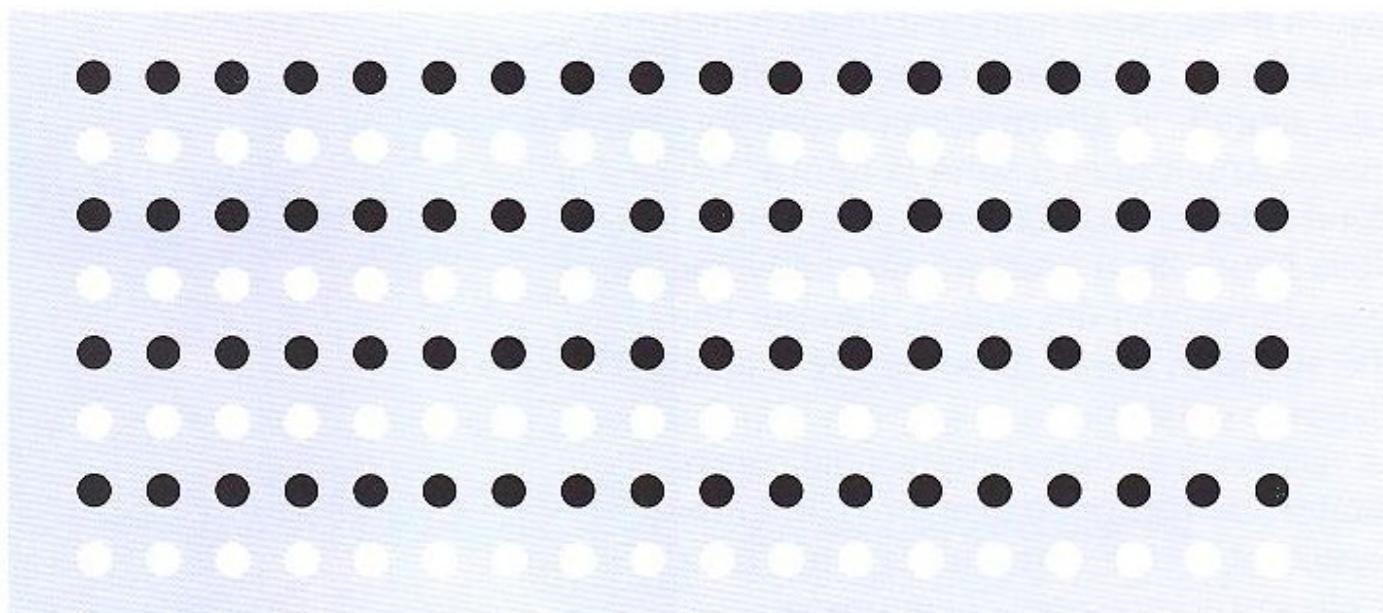


Le leggi della percezione visiva

3. LEGGE DELL'UGUAGLIANZA (O DELLA SOMIGLIANZA)

Elementi uguali, o che si assomigliano, vengono percepiti insieme.

I punti neri e i punti bianchi della figura a fianco si uniscono in strutture e tendiamo a vederli come linee orizzontali di punti neri e di punti bianchi.





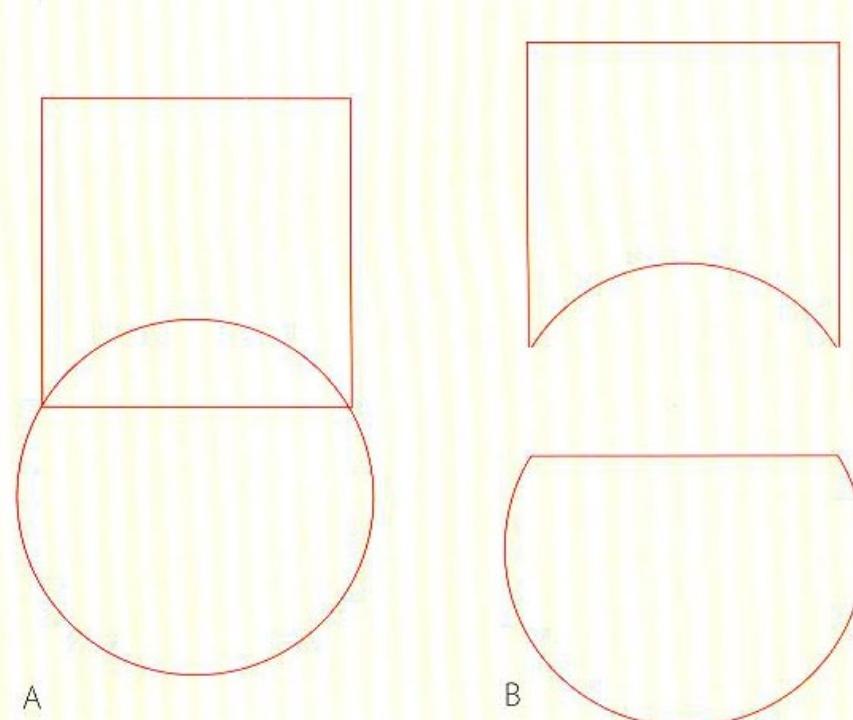
Le leggi della percezione visiva

4. LEGGE DELLA CONTINUITÀ

Un insieme di punti posti uno di seguito all'altro in una determinata direzione vengono percepiti come una struttura unitaria.

Per lo stesso motivo, quando si uniscono o sovrappongono forme diverse continuiamo a vederle distinte.

Nella figura il cerchio e il quadrato vengono percepiti come figure complete e non come mancanti di qualche parte.

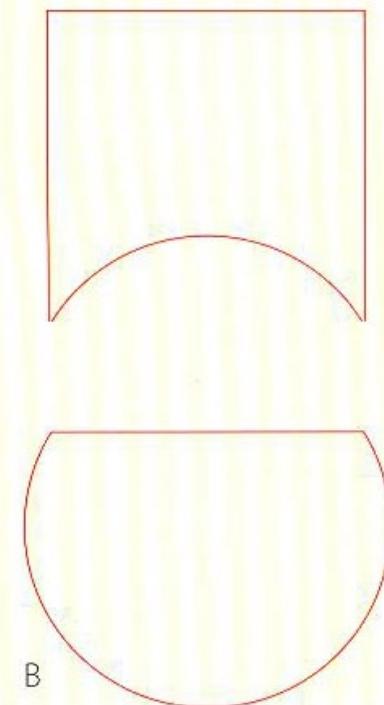
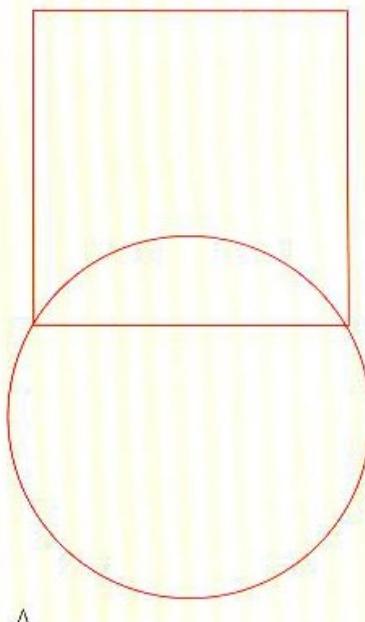




Le leggi della percezione visiva

5. LEGGE DELLA BUONA FORMA

Figure diverse, quando si uniscono, finiscono per avere ciascuna la propria forma, anche se in realtà questa non compare. Quando le figure di B vengono unite come in A, vengono percepite come un cerchio e un quadrato sovrapposti.

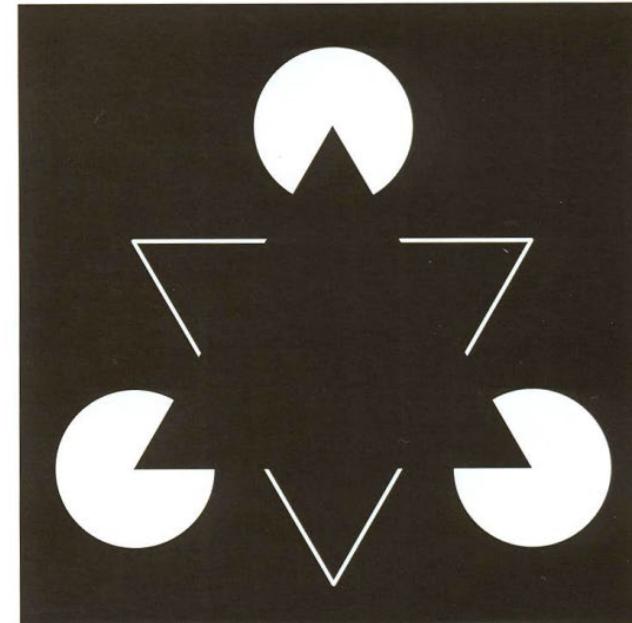
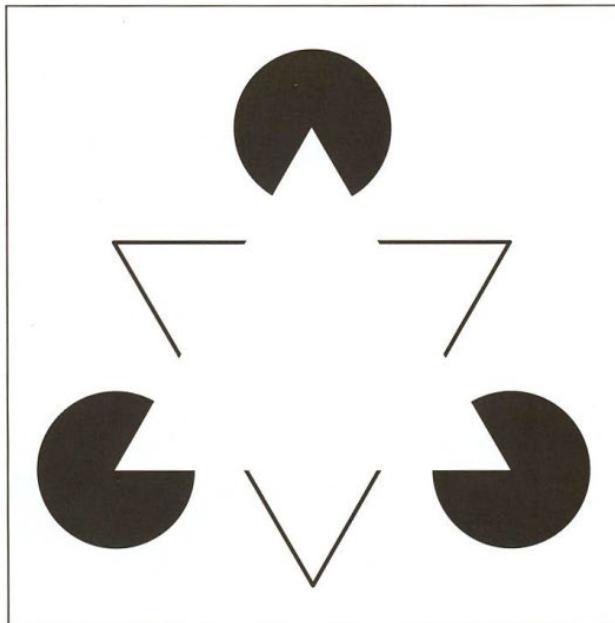




Le leggi della percezione visiva

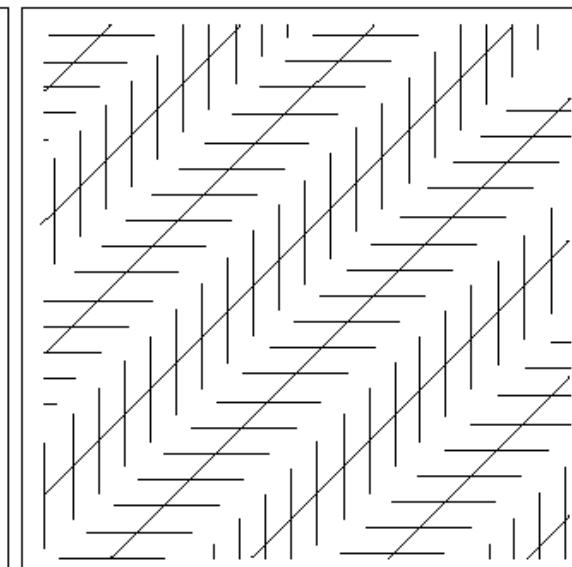
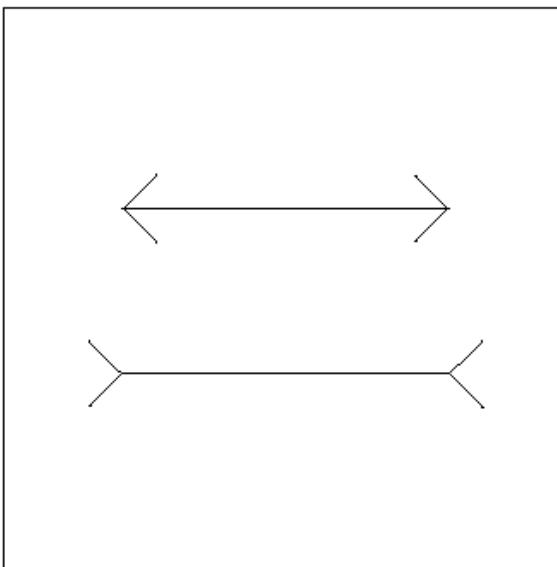
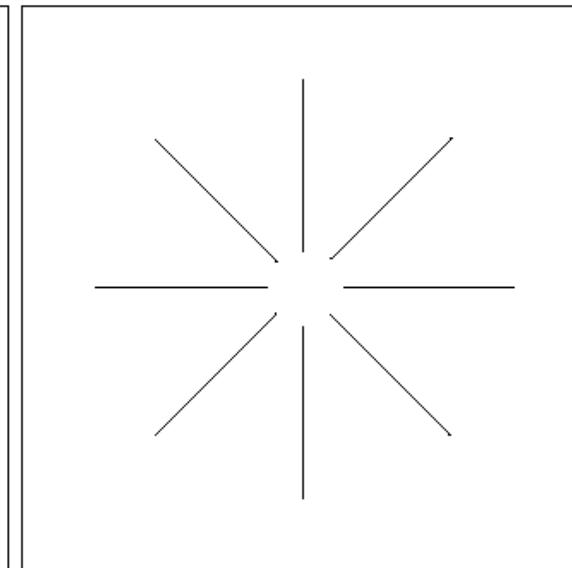
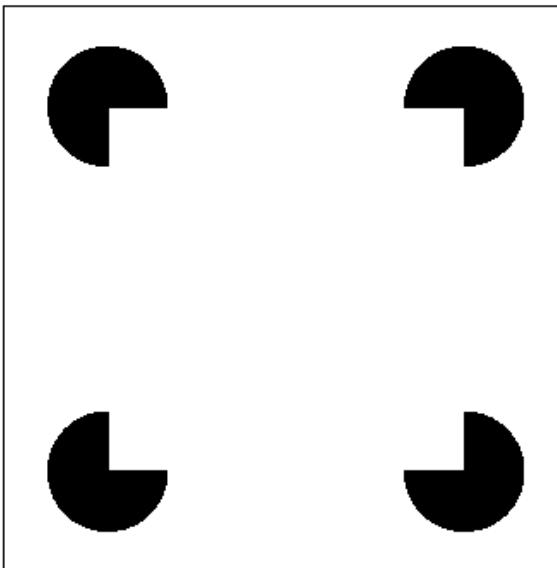
7. La mente tende naturalmente a vedere figure chiuse, a completare i contorni interrotti, a percepire spontaneamente forme semplici, regolari, strutture unitarie e compatte.

Nelle due figure in basso il triangolo che si forma, in bianco o in nero, è una figura nascosta, un fantasma, cioè un'immagine non reale materialmente, ma illusoria.





Altre illusioni ottiche



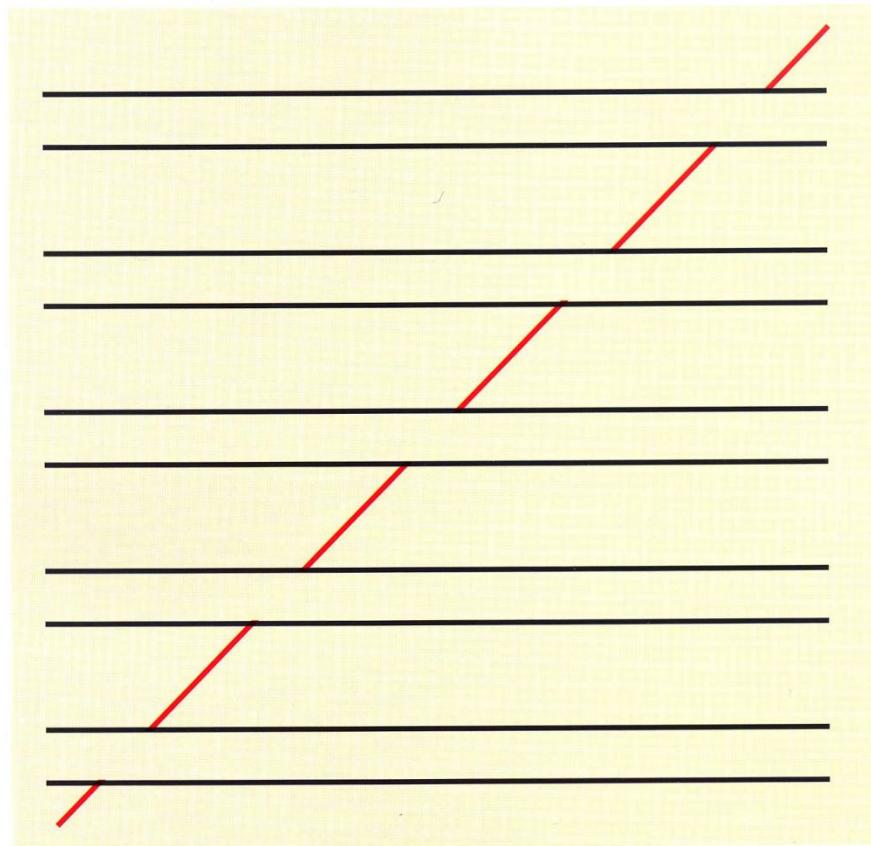


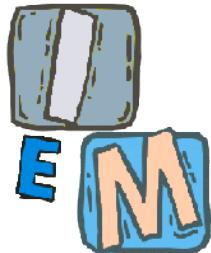
Le leggi della percezione visiva

Quando disegniamo trasformiamo la percezione dei contorni in linee. Facciamo in modo che nel nostro disegno si riconoscano oggetti reali o immagini coerenti.

Cerchiamo istintivamente di realizzare la buona forma, di dare una direzione e una continuità logiche alle linee che tracciamo, in modo che abbiano un senso per l'osservatore.

Ogni linea è una forma visiva o unità ottica e tende a prolungarsi nella stessa direzione.

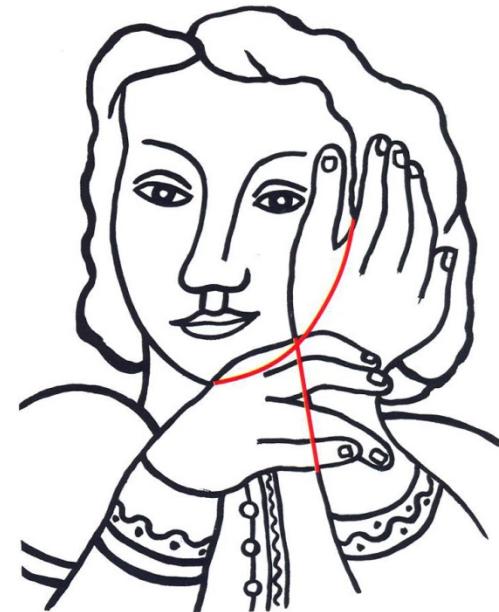


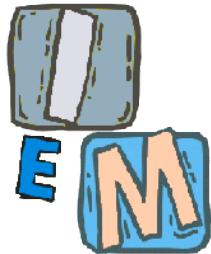


Le leggi della percezione visiva

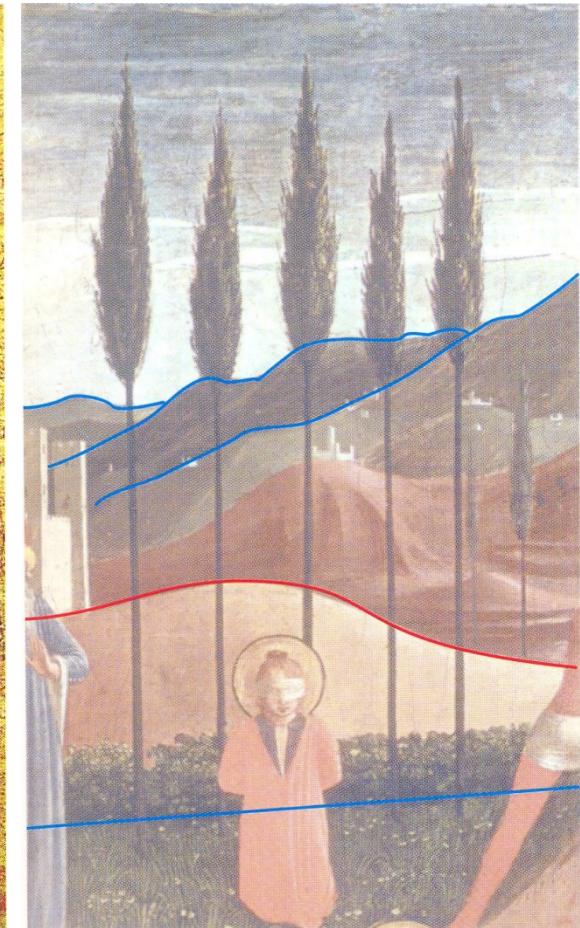


I tratti rossi evidenziano le linee nascoste che percepiamo pur senza vederle.



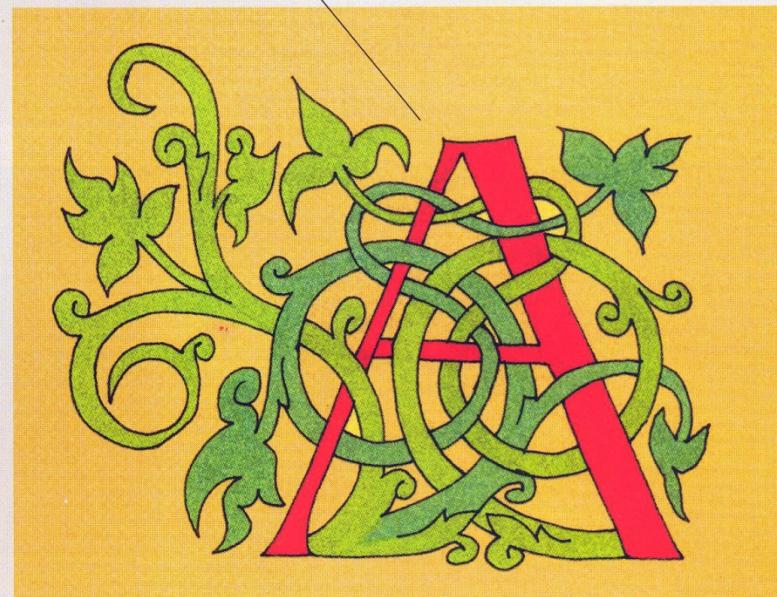


Pala di San Marco, Beato Angelico

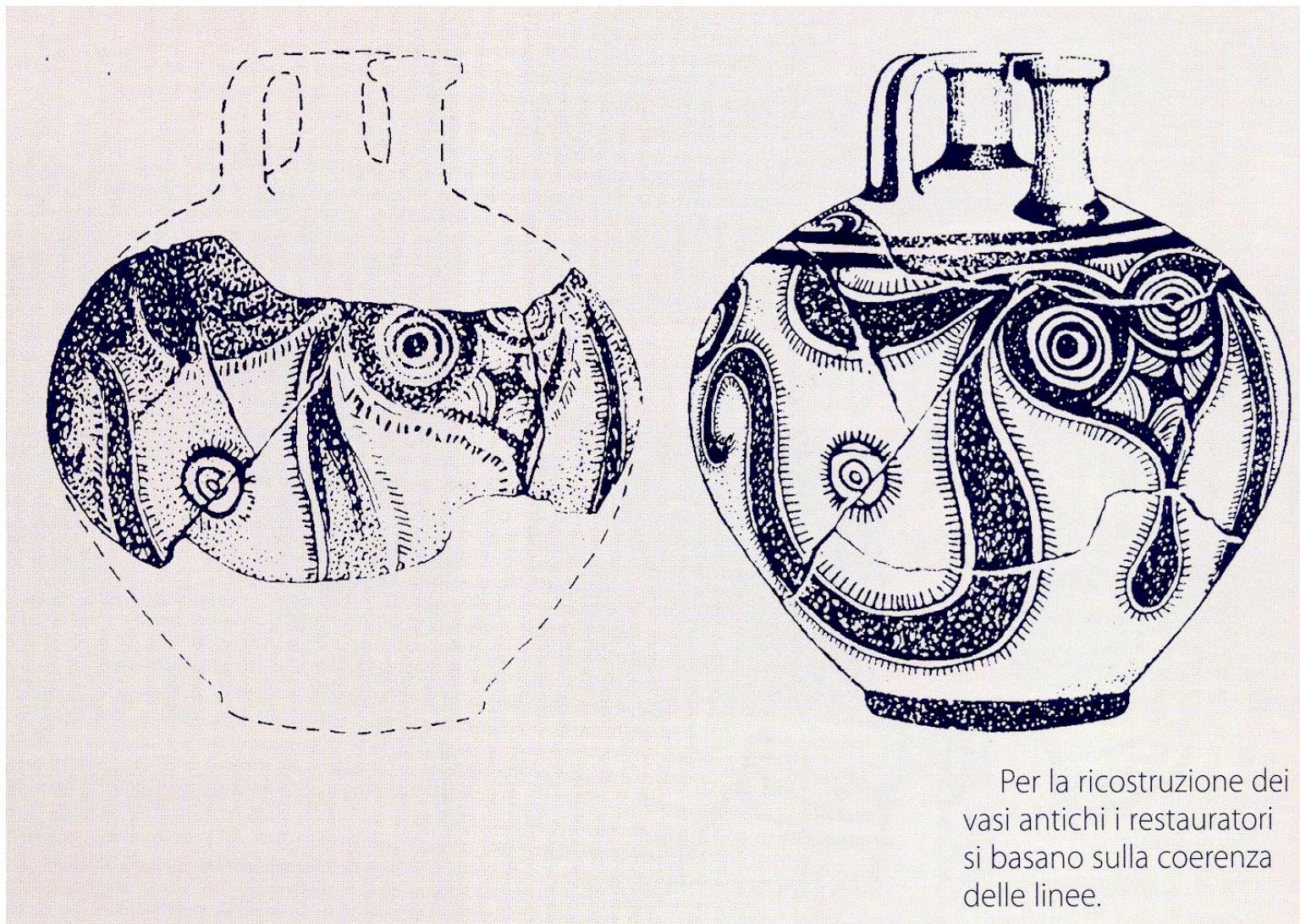


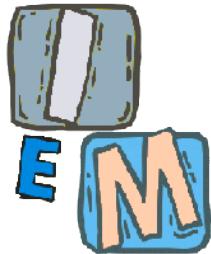


La lettera iniziale
di un codice miniato è
costituita da un
complicato intreccio.

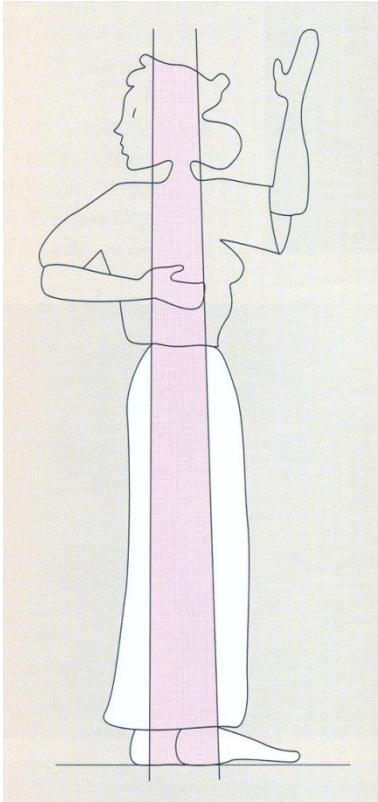


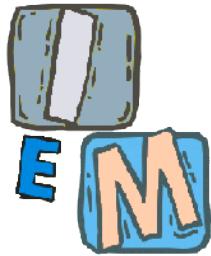
La lettera "A" nello stile
gotico fiorito dei
manoscritti miniati.



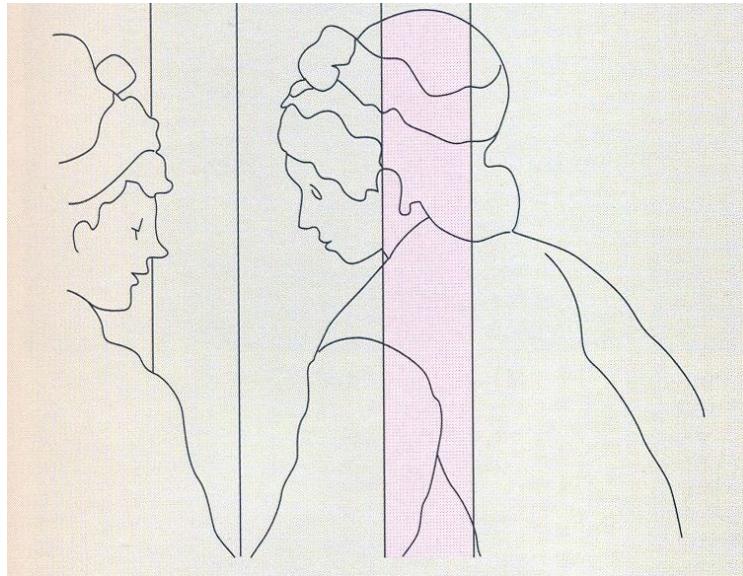


Dietro o davanti?



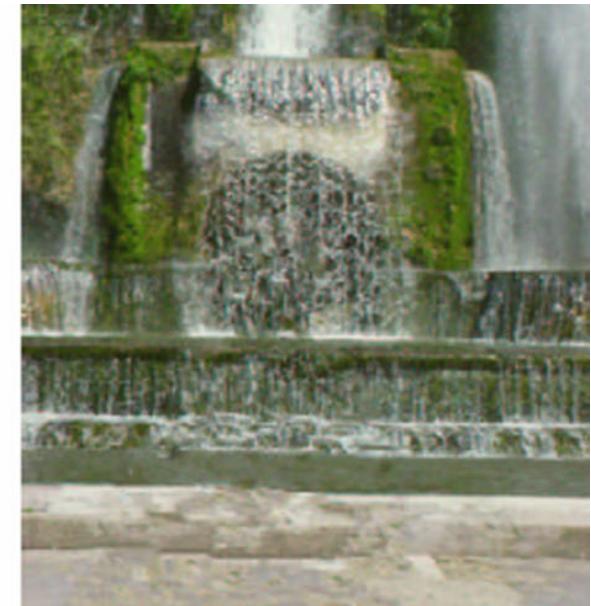


Dietro e davanti?



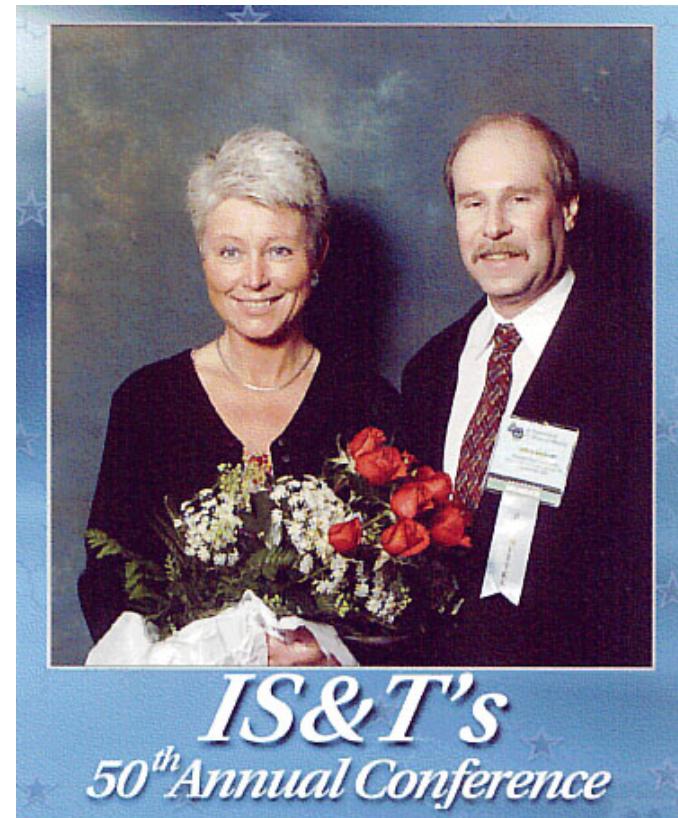


Inpainting





Prima di andare avanti: Lena o Lenna (www.lenna.org)





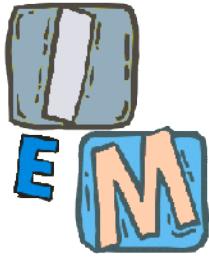
Intensità percepita

- Poiché le immagini digitali sono rappresentate da un numero finito di intensità, è importante conoscere come l'occhio umano riesca a discriminare tra i diversi livelli di intensità.
- Si è sperimentalmente dimostrato che l'intensità percepita è funzione logaritmica dell'intensità incidente nell'occhio.



Range dinamico

- Il sistema visivo umano non opera contemporaneamente su tutto il range delle intensità percepite, ma solo su una porzione di esso.
- Inoltre riesce a distinguere in maniera differente se si trova in una zona chiara o in una zona scura.



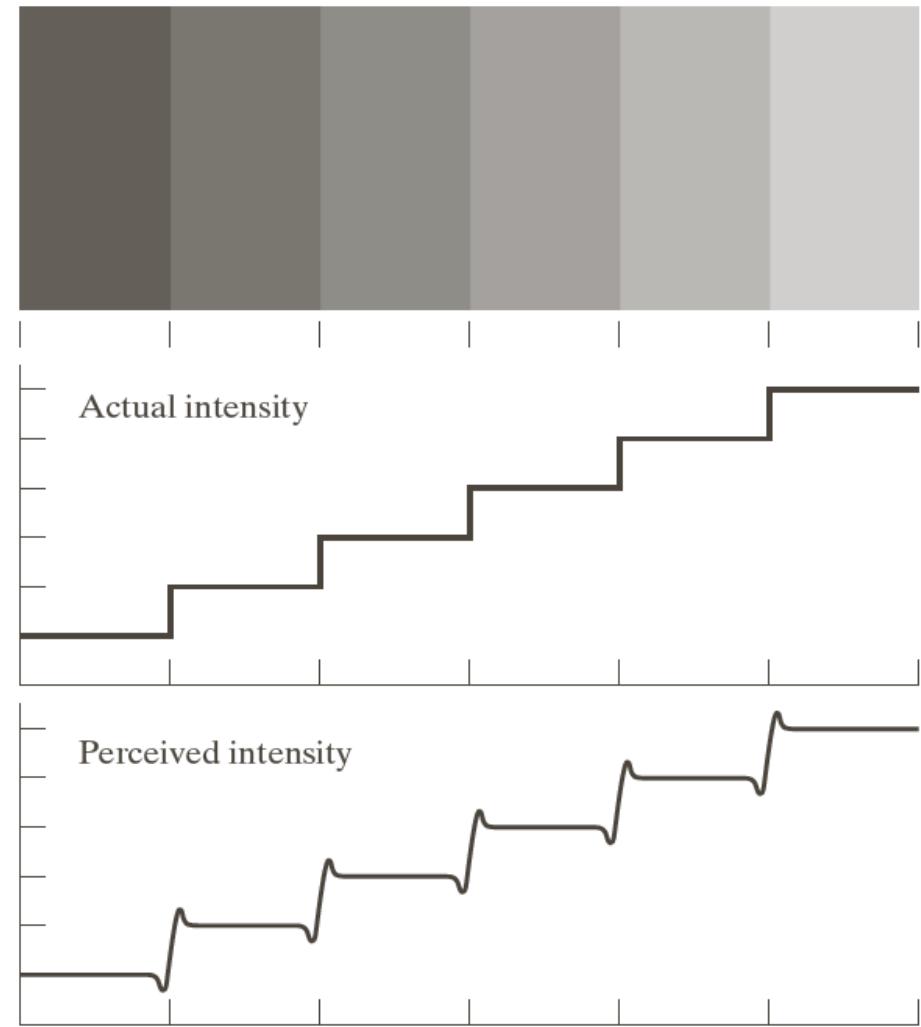
Illusioni ottiche

- Esistono dei fenomeni di illusioni ottiche che sono tipiche del nostro sistema visivo umano e che non sono ancora state spiegate.
- Ciò sta ad indicare che luminosità percepita non è semplicemente in funzione dell'intensità emessa.



Bande di Mach (Ernst Mach, 1865)

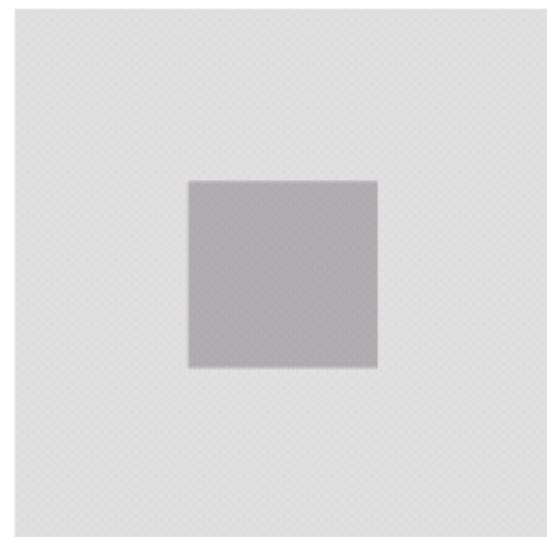
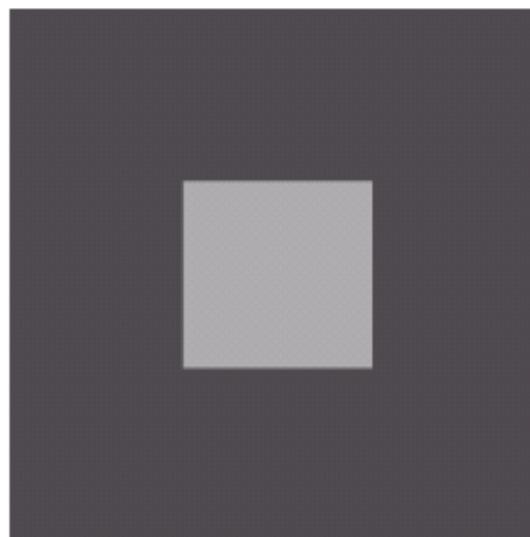
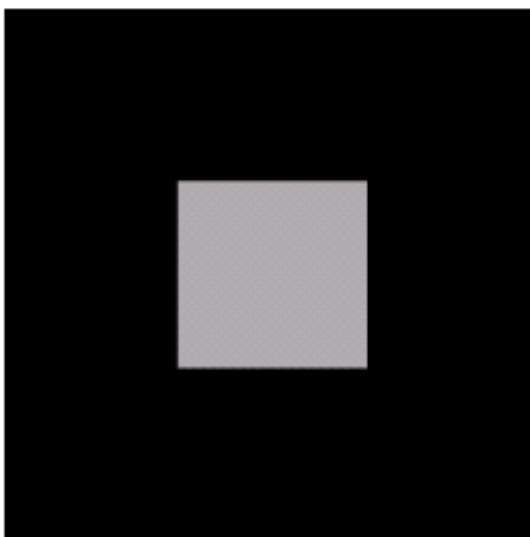
- Anche se le bande hanno una intensità costante, esse vengono percepite in maniera non uniforme all'aprossimarsi dei bordi.

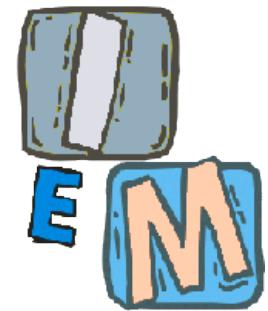




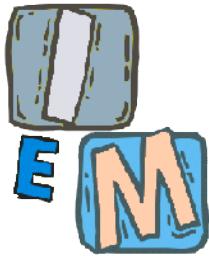
Contrasto simultaneo

- Anche se le intensità nei quadratini centrali sono uguali, esse vengono percepite in maniera differente in base allo sfondo: se lo sfondo è scuro, il centro appare più chiaro e viceversa.





Rappresentazione di una immagine



- Un'immagine è rappresentata da una funzione bidimensionale $f(x,y)$
- x e y sono le coordinate spaziali, ed $f(x,y)$ è proporzionale alla luce incidente nell'oggetto e anche a quella riflessa.
- Quindi $f(x,y) = i(x,y) r(x,y)$
- Dove i è la luce incidente ed r quella riflessa.



$$f(x, y) = i(x, y) r(x, y) \quad (2.3-2)$$

$$0 < i(x, y) < \infty \quad (2.3-3)$$

$$0 < r(x, y) < 1 \quad (2.3-4)$$

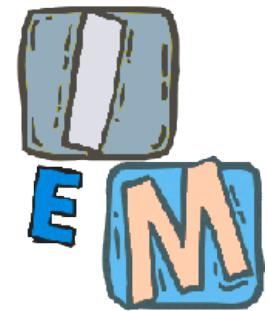
Alcuni valori tipici di illuminazione e riflettanza

I valori dati nelle Equazioni (2.3-3) e (2.3-4) sono limiti teorici. I seguenti valori *medi* illustrano il range tipico di $i(x, y)$ per la luce visibile. Alla luce del giorno, il Sole può produrre più di 90000 lm/m^2 di illuminazione sulla superficie terrestre. Questa cifra diminuisce fino a 10000 lm/m^2 in un giorno nuvoloso. La sera, la Luna piena raggiunge circa 0.1 lm/m^2 di illuminazione. Il tipico livello di illuminazione di un ufficio commerciale è di circa 1000 lm/m^2 . Similmente, i valori tipici di $r(x, y)$ sono: 0.01 per il velluto nero, 0.65 per l'acciaio inossidabile, 0.80 per un muro verniciato di bianco, 0.90 per l'argento e 0.93 per la neve.

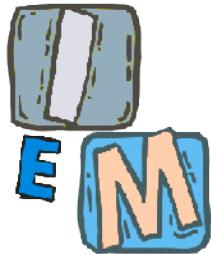


Discretizziamo

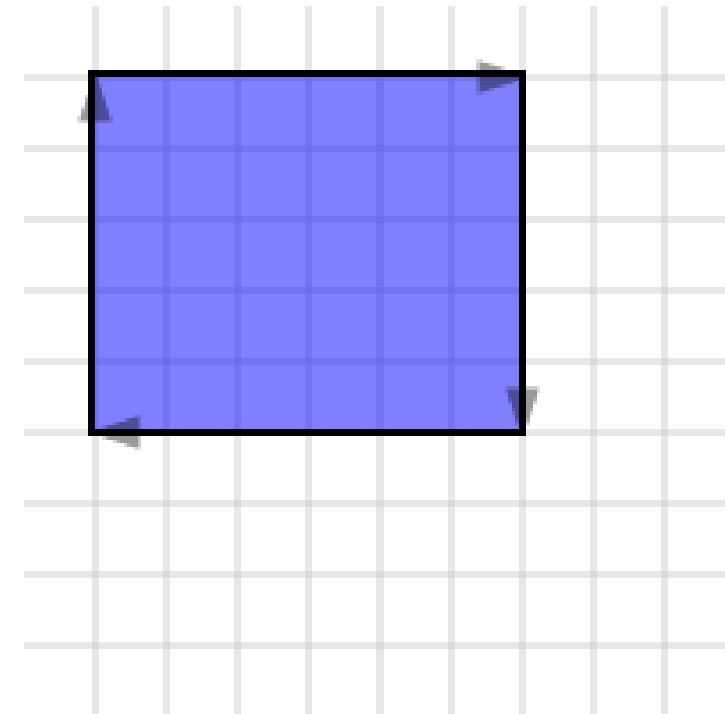
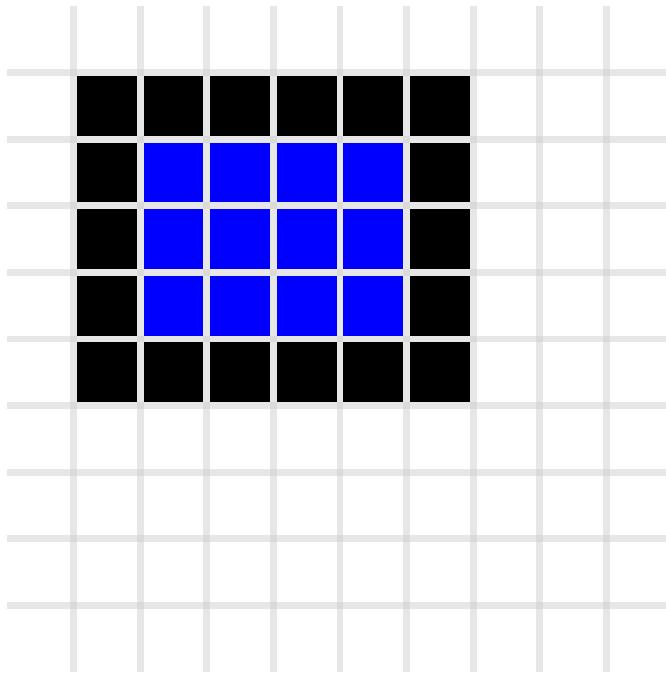
- In teoria il valore di $f(x,y)$ è un numero reale, ma per produrre una immagine digitale abbiamo bisogno di valori discreti.
- Questo passaggio dal continuo al discreto è fatto mediante le operazioni di campionamento e di quantizzazione.
- Il piano XY in cui stanno le coordinate dell'immagine è detto DOMINIO SPAZIALE e le variabili x,y sono dette *variabili spaziali* o *coordinate spaziali*.



Immagini Vettoriali e Raster



Formati Vettoriali





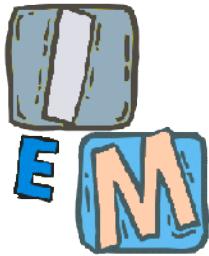
Grafica Vettoriale

- Nella grafica vettoriale un'immagine è descritta come una serie di forme geometriche.
- Piuttosto che una serie “finita” di pixel, un visualizzatore di immagini vettoriali riceve informazioni su come disegnare l'immagine sul DISPLAY DEVICE in uno specifico sistema di riferimento.
- Le immagini vettoriali possono essere stampate con strumenti appositi (plotter)



Differenze

Raster	Vector
Quali puntini devo colorare ?	Quale linee devo tracciare ?
Disegno a mano libera	Disegno tecnico



Confronto

Raster

Pro

- Fotorealismo
- Standard su Web

Contro:

- Nessuna descrizione semantica.
- Grandi dimensioni

Vector

Pro

- Le trasformazioni sul piano sono semplici (Zooming, Scaling, Rotating)

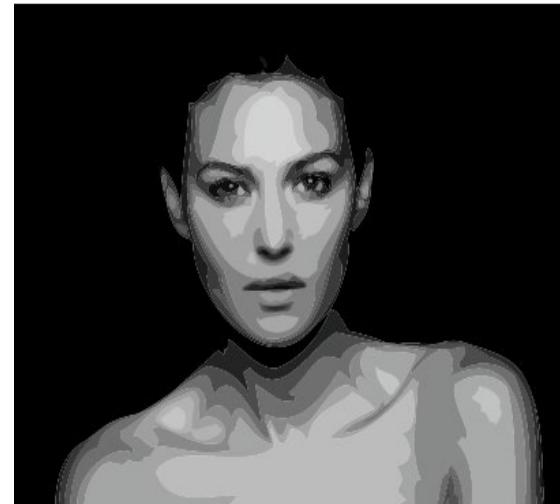
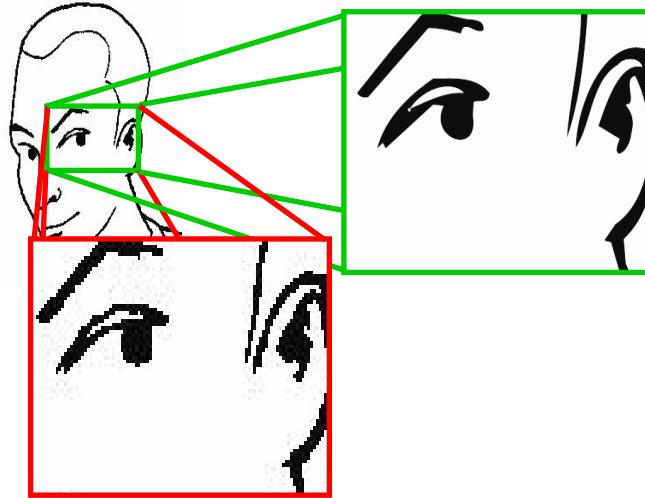
Contro:

- Non fotorealistico
- Formati vettoriali proprietari



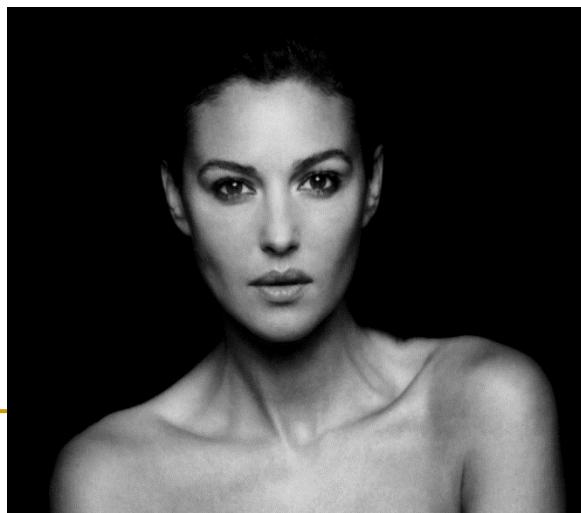
Cui prodest vector ?

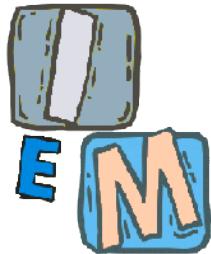
- **CAD** (Computer Assisted Drawing) usa grafica vettoriale per misure precise, capacità di zoomare dentro i particolari dei progetti, ecc. (AutoCad,...)
- **Desktop Publishing & Design** (Adobe Illustrator, Macromedia Freehand, Publisher)
- Linguaggio di stampa **Postscript**
- **Animazioni** su web (Macromedia Flash)
- **GIS** (Geographical Information Systems): Arcview, Envi,...



Vettoriale

Raster





Un esempio concreto di scalabilità



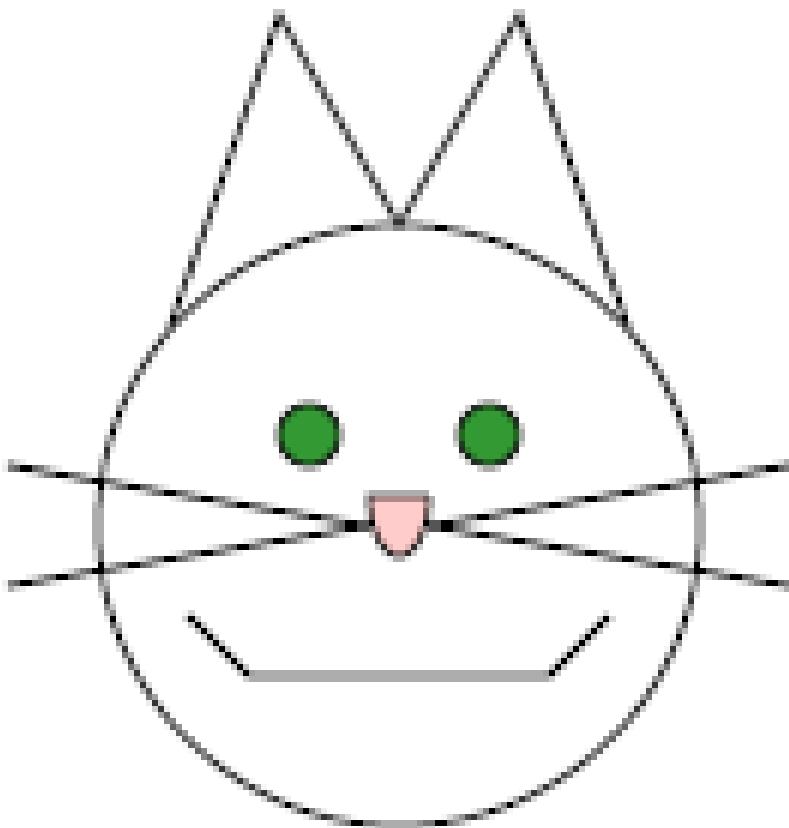
Raster
(140x170)



Vector
(140x170)

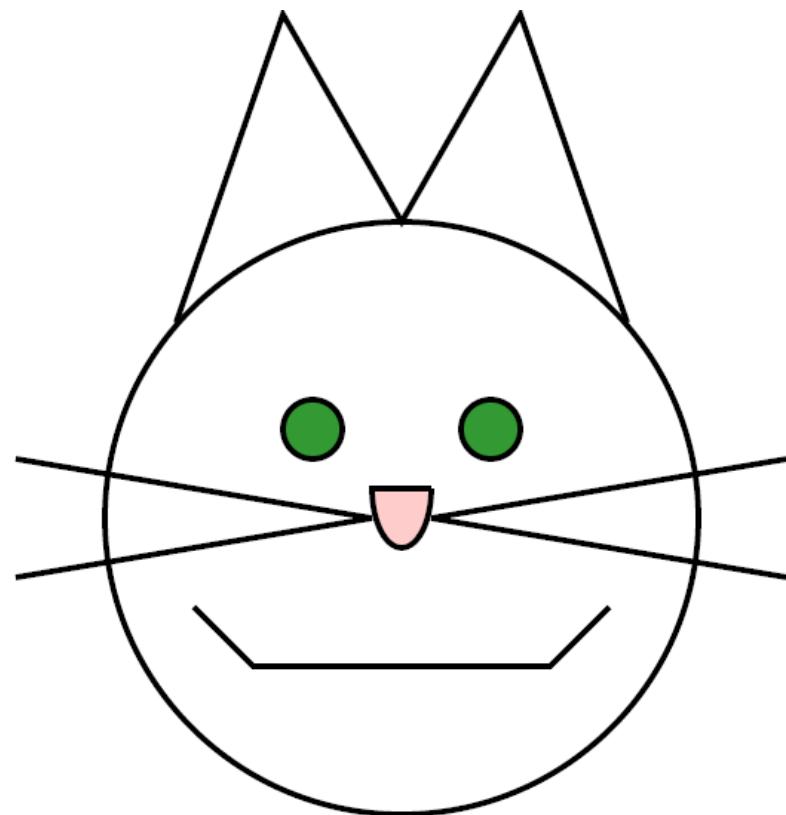


Raster 2x



Cat

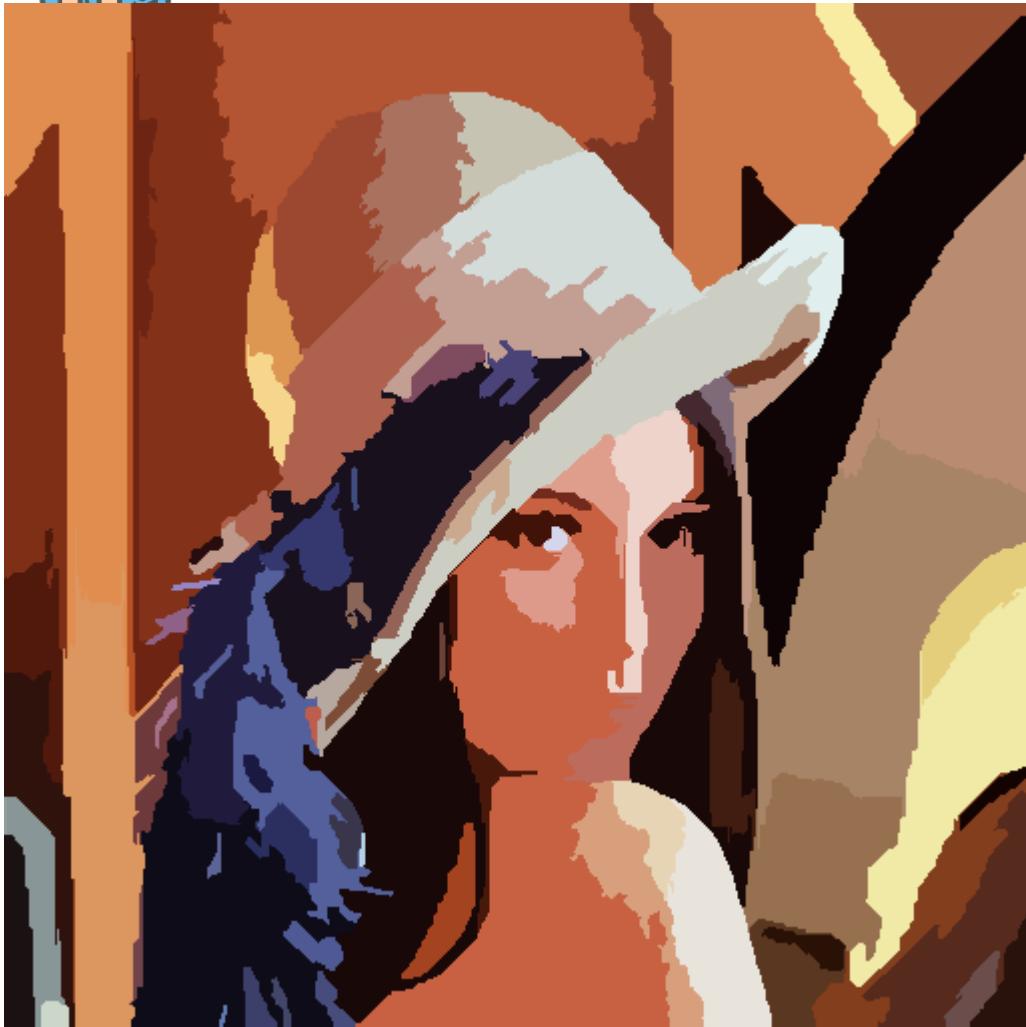
Vector 2x



Cat



Vectorialisation



Q=1	19,330	0,976
Q=2	20,178	1,343
Q=4	21,016	1,753
Q=8	21,975	2,251
Q=16	22,670	3,097
Q=32	23,461	4,064
Q=64	24,326	5,693
Q=128	25,180	7,660
Q=256	26,058	10,430
Q=512	26,852	14,169
Q=1024	27,596	19,281
Q=2048	28,174	26,703
Q=4096	28,768	37,641
Q=8192	29,320	53,429

The visual perceived accuracy increases as the Q parameter increase.



Vectorialisation



Q=1	19,330	0,976
Q=2	20,178	1,343
Q=4	21,016	1,753
Q=8	21,975	2,251
Q=16	22,670	3,097
Q=32	23,461	4,064
Q=64	24,326	5,693
Q=128	25,180	7,660
Q=256	26,058	10,430
Q=512	26,852	14,169
Q=1024	27,596	19,281
Q=2048	28,174	26,703
Q=4096	28,768	37,641
Q=8192	29,320	53,429

The visual perceived accuracy increases as the Q parameter increase.

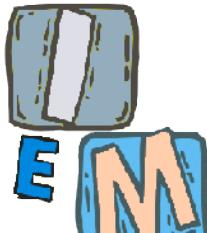


Vectorialisation



Q=1	19,330	0,976
Q=2	20,178	1,343
Q=4	21,016	1,753
Q=8	21,975	2,251
Q=16	22,670	3,097
Q=32	23,461	4,064
Q=64	24,326	5,693
Q=128	25,180	7,660
Q=256	26,058	10,430
Q=512	26,852	14,169
Q=1024	27,596	19,281
Q=2048	28,174	26,703
Q=4096	28,768	37,641
Q=8192	29,320	53,429

The visual perceived accuracy increases as the Q parameter increase.



Vectorialisation

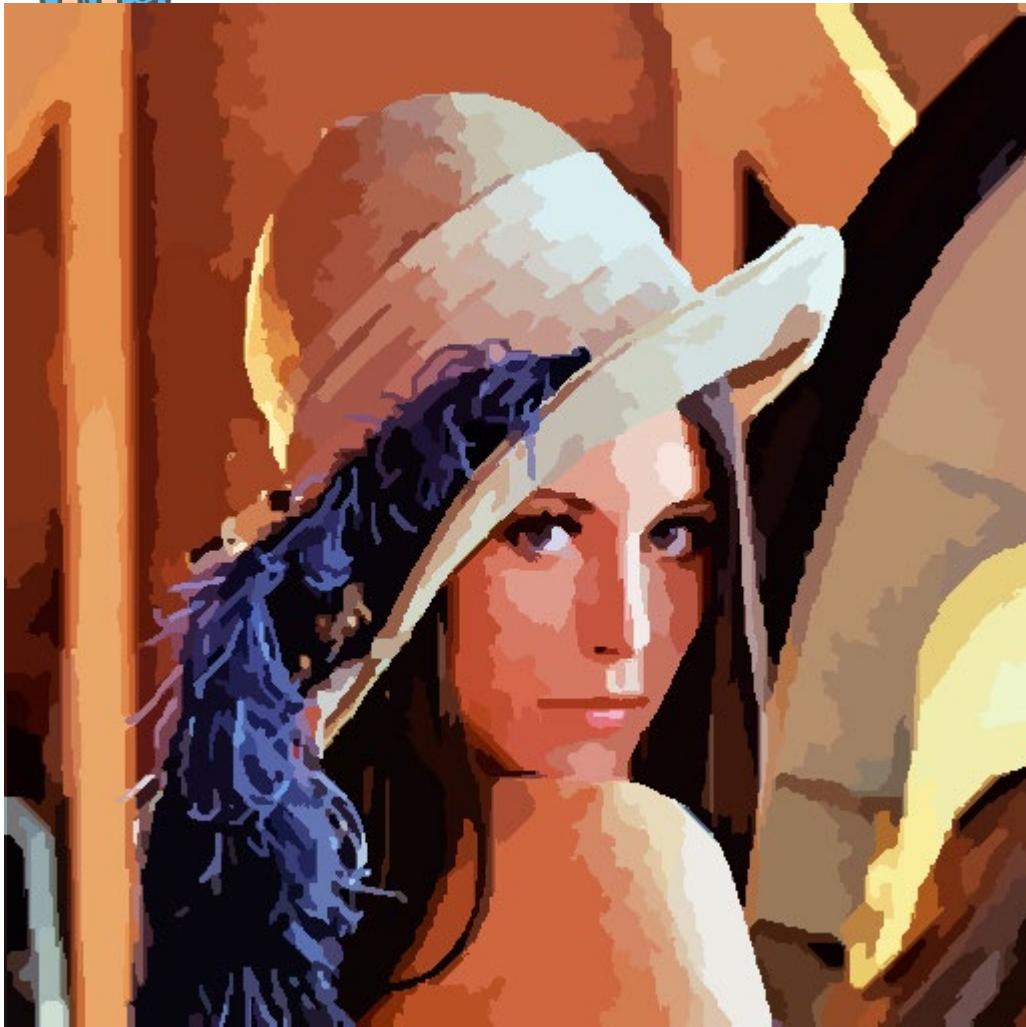


Q=1	19,330	0,976
Q=2	20,178	1,343
Q=4	21,016	1,753
Q=8	21,975	2,251
Q=16	22,670	3,097
Q=32	23,461	4,064
Q=64	24,326	5,693
Q=128	25,180	7,660
Q=256	26,058	10,430
Q=512	26,852	14,169
Q=1024	27,596	19,281
Q=2048	28,174	26,703
Q=4096	28,768	37,641
Q=8192	29,320	53,429

The visual perceived accuracy increases as the Q parameter increase.



Vectorialisation



Q=1	19,330	0,976
Q=2	20,178	1,343
Q=4	21,016	1,753
Q=8	21,975	2,251
Q=16	22,670	3,097
Q=32	23,461	4,064
Q=64	24,326	5,693
Q=128	25,180	7,660
Q=256	26,058	10,430
Q=512	26,852	14,169
Q=1024	27,596	19,281
Q=2048	28,174	26,703
Q=4096	28,768	37,641
Q=8192	29,320	53,429

The visual perceived accuracy increases as the Q parameter increase.



Vectorialisation



Q=1	19,330	0,976
Q=2	20,178	1,343
Q=4	21,016	1,753
Q=8	21,975	2,251
Q=16	22,670	3,097
Q=32	23,461	4,064
Q=64	24,326	5,693
Q=128	25,180	7,660
Q=256	26,058	10,430
Q=512	26,852	14,169
Q=1024	27,596	19,281
Q=2048	28,174	26,703
Q=4096	28,768	37,641
Q=8192	29,320	53,429

The visual perceived accuracy increases as the Q parameter increase.

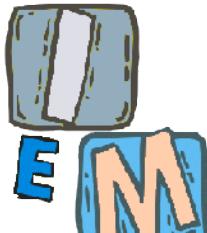


Vectorialisation



Q=1	19,330	0,976
Q=2	20,178	1,343
Q=4	21,016	1,753
Q=8	21,975	2,251
Q=16	22,670	3,097
Q=32	23,461	4,064
Q=64	24,326	5,693
Q=128	25,180	7,660
Q=256	26,058	10,430
Q=512	26,852	14,169
Q=1024	27,596	19,281
Q=2048	28,174	26,703
Q=4096	28,768	37,641
Q=8192	29,320	53,429

The visual perceived accuracy increases as the Q parameter increase.

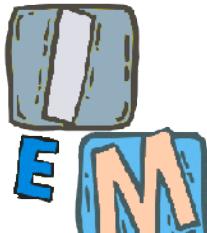


Vectorialisation



Q=1	19,330	0,976
Q=2	20,178	1,343
Q=4	21,016	1,753
Q=8	21,975	2,251
Q=16	22,670	3,097
Q=32	23,461	4,064
Q=64	24,326	5,693
Q=128	25,180	7,660
Q=256	26,058	10,430
Q=512	26,852	14,169
Q=1024	27,596	19,281
Q=2048	28,174	26,703
Q=4096	28,768	37,641
Q=8192	29,320	53,429

The visual perceived accuracy increases as the Q parameter increase.

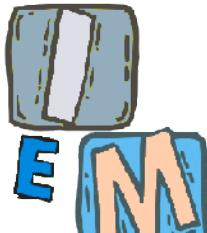


Vectorialisation



Q=1	19,330	0,976
Q=2	20,178	1,343
Q=4	21,016	1,753
Q=8	21,975	2,251
Q=16	22,670	3,097
Q=32	23,461	4,064
Q=64	24,326	5,693
Q=128	25,180	7,660
Q=256	26,058	10,430
Q=512	26,852	14,169
Q=1024	27,596	19,281
Q=2048	28,174	26,703
Q=4096	28,768	37,641
Q=8192	29,320	53,429

The visual perceived accuracy increases as the Q parameter increase.

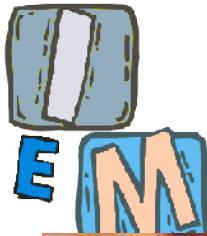


Vectorialisation



Q=1	19,330	0,976
Q=2	20,178	1,343
Q=4	21,016	1,753
Q=8	21,975	2,251
Q=16	22,670	3,097
Q=32	23,461	4,064
Q=64	24,326	5,693
Q=128	25,180	7,660
Q=256	26,058	10,430
Q=512	26,852	14,169
Q=1024	27,596	19,281
Q=2048	28,174	26,703
Q=4096	28,768	37,641
Q=8192	29,320	53,429

The visual perceived accuracy increases as the Q parameter increase.



Vectorialisation



Q=1	19,330	0,976
Q=2	20,178	1,343
Q=4	21,016	1,753
Q=8	21,975	2,251
Q=16	22,670	3,097
Q=32	23,461	4,064
Q=64	24,326	5,693
Q=128	25,180	7,660
Q=256	26,058	10,430
Q=512	26,852	14,169
Q=1024	27,596	19,281
Q=2048	28,174	26,703
Q=4096	28,768	37,641
Q=8192	29,320	53,429

The visual perceived accuracy increases as the Q parameter increase.



Vectorialisation



Q=1	19,330	0,976
Q=2	20,178	1,343
Q=4	21,016	1,753
Q=8	21,975	2,251
Q=16	22,670	3,097
Q=32	23,461	4,064
Q=64	24,326	5,693
Q=128	25,180	7,660
Q=256	26,058	10,430
Q=512	26,852	14,169
Q=1024	27,596	19,281
Q=2048	28,174	26,703
Q=4096	28,768	37,641
Q=8192	29,320	53,429

Interazione & Multimedia

The visual perceived accuracy increases as the Q parameter increase.

Vectorialisation



	PSNR	bpp
Q=1	19,330	0,976
Q=2	20,178	1,343
Q=4	21,016	1,753
Q=8	21,975	2,251
Q=16	22,670	3,097
Q=32	23,461	4,064
Q=64	24,326	5,693
Q=128	25,180	7,660
Q=256	26,058	10,430
Q=512	26,852	14,169
Q=1024	27,596	19,281
Q=2048	28,174	26,703
Q=4096	28,768	37,641
Q=8192	29,320	53,429

The visual perceived accuracy increases as the Q parameter increase.



Formati grafici vettoriali (lista parziale)

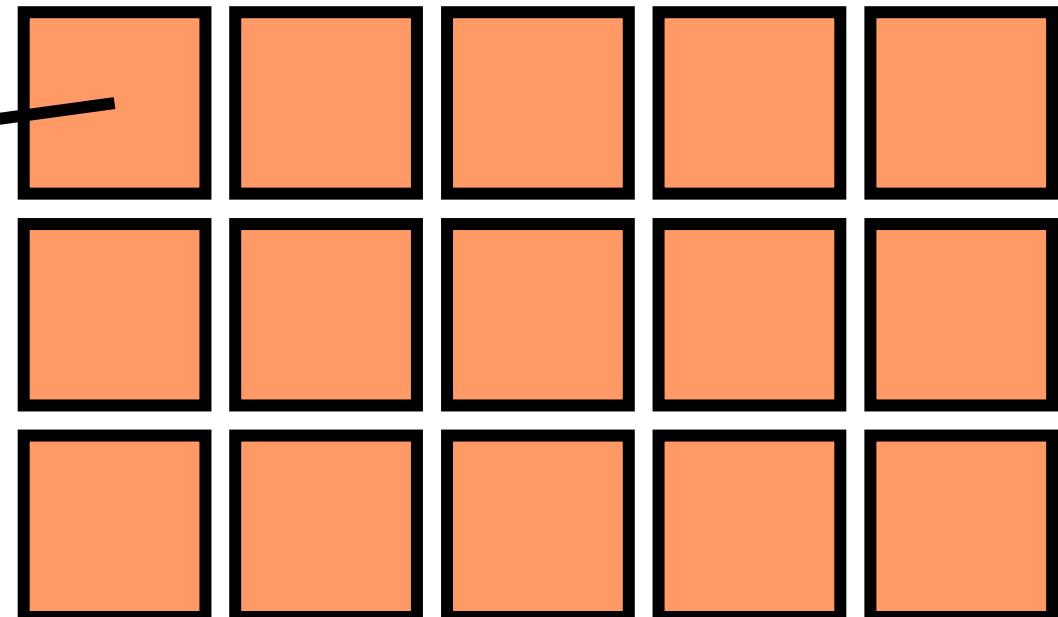
- **PS** (Postscript): Formato sviluppato da AdobeSystems originariamente per la stampa di documenti su stampanti laser, è utilizzato anche per la memorizzazione di immagini vettoriali.
- **EPS** (Encapsulated Postscript): Estensione del formato PostScript che consente di incapsulare immagini bitmap (raster).
- **DCS** (Desktop Color Separation): Un caso speciale di EPS sviluppato originariamente da Quark per tenere separati i dati al alta risoluzione dall'anteprima a bassa risoluzione.
- **PDF** (Portable Data Format): Sviluppato da Adobe, è il formato più diffuso per condividere, indipendentemente dalla piattaforma, documenti di testi e immagini.
- **PICT**: Formato grafico sviluppato da Apple Computer per la piattaforma Macintosh in grado di memorizzare sia immagini vettoriali che raster.

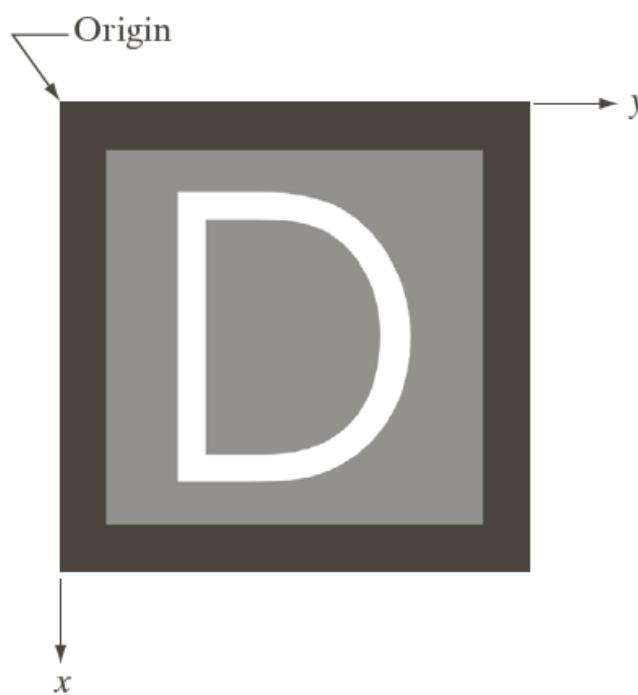
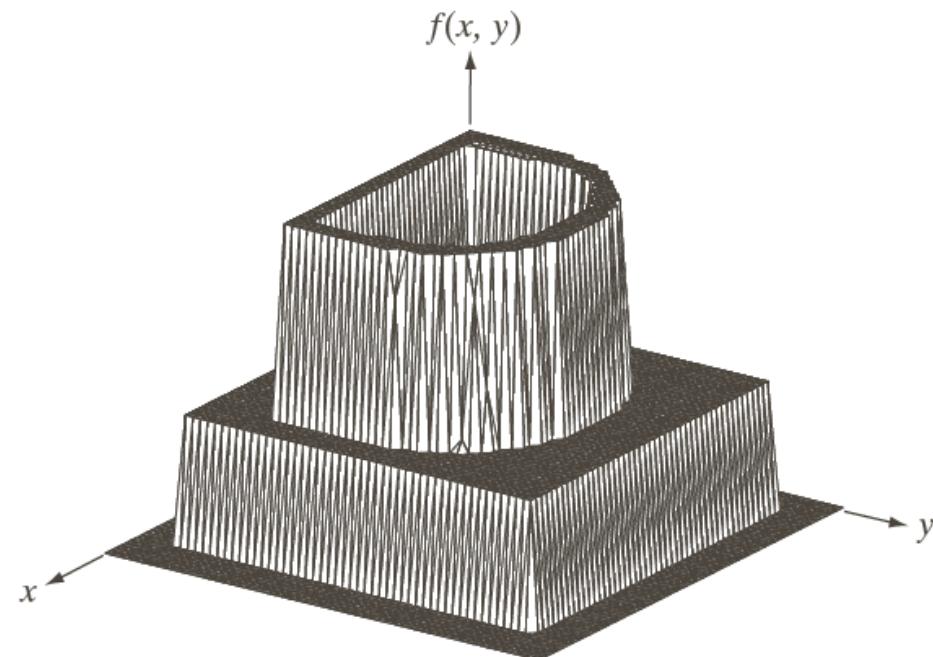
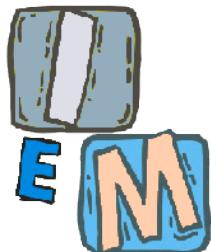


PIXEL

Il valore quantizzato
misurato da ciascun
sensore diventa un

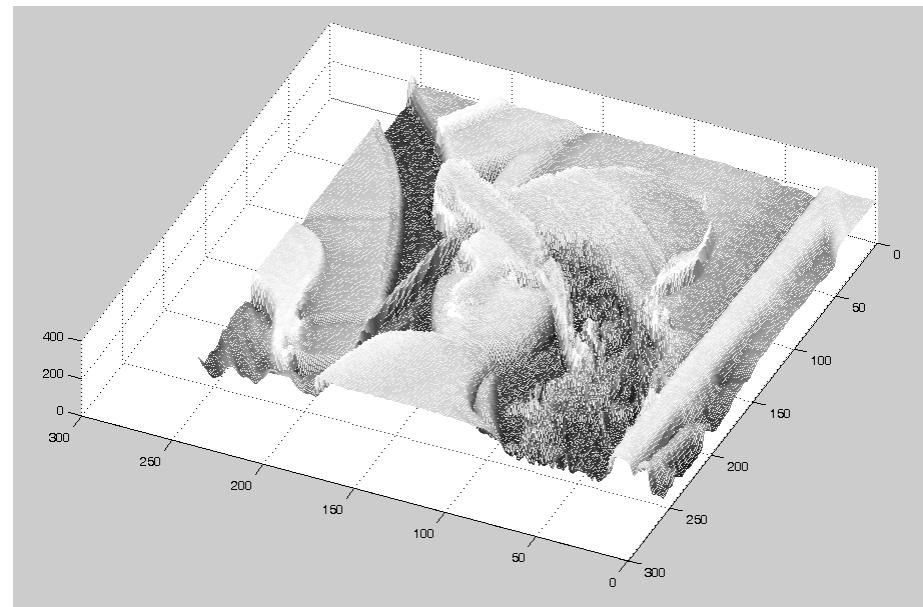
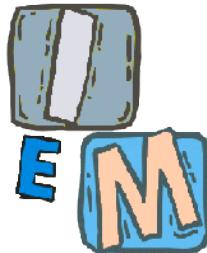
**PICTURE ELEMENT =
PIXEL dell'immagine**





Origin

0	0	0	0	0	0	0	· · ·	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0				0	0	0	0	0	0
0	0	0	0		·				0	0	0	0	0
0	0	0	· · ·	5	5	5	· ·		0	0	0	0	0
0	0	0		5	5				0	0	0	0	0
·			5		·				·			·	·
·			·		·			1	1	1	· ·		·
·								1	1				·
0	0	0				1	·	·		0	0	0	0
0	0	0				·				0	0	0	0
0	0	0	0	0					0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	· · ·	0	0	0	0	0	0	0



Multimed

fx

File	Edit	Debug	Desktop	Window	Help	
103	94	70	121	207	198	
67	77	117	186	195	191	
117	135	171	193	188	190	
129	142	155	154	170	163	
91	106	120	115	120	117	
82	94	111	106	95	99	
109	113	121	117	121	127	
117	123	126	125	133	140	
138	141	140	141	146	149	
146	147	145	151	146	145	
143	144	142	143	139	142	
144	145	143	144	143	145	
147	148	146	145	146	147	
149	149	145	144	148	147	
148	147	142	141	145	143	
149	148	143	141	142	140	
148	147	140	138	138	136	
145	145	139	137	138	136	
140	138	137	137	135	132	
137	137	137	138	134	132	

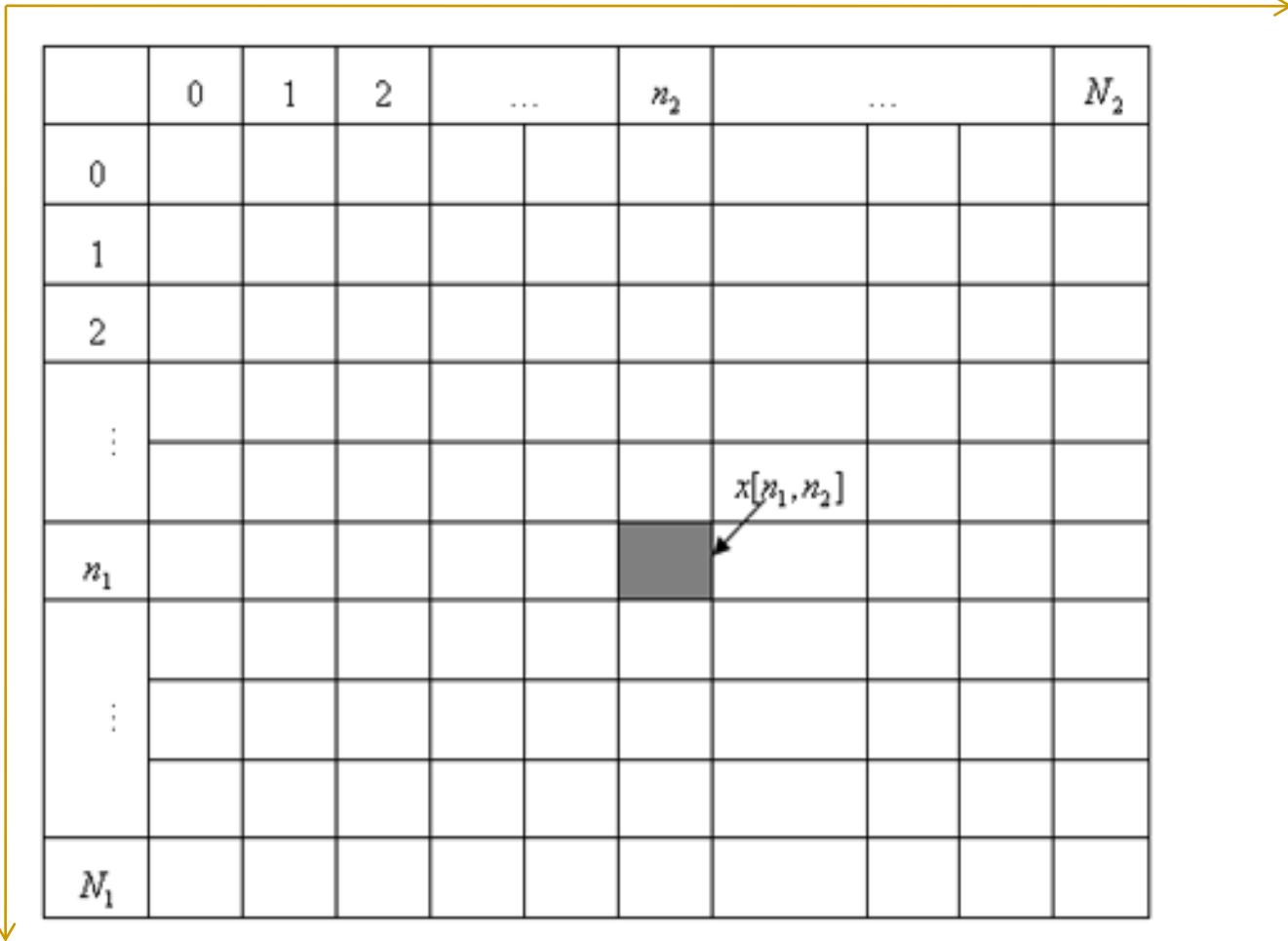


Convenzioni

- È importante ricordare che convenzionalmente il primo elemento della matrice è sempre l'elemento in alto a sinistra.
- L'asse a sinistra è orientato dall'alto verso il basso; l'asse in alto è orientato da sinistra verso destra.
- Questo è il quarto quadrante del piano cartesiano, ma le coordinate sono tutte positive.



Rappresentazione delle immagini





Tipologie di immagini

- Bianco/nero
- 1 bit per pixel
- Nella posizione (i,j) ci sarà o il valore 0 o il valore 1





Tipologie di immagini

- Scala di grigio
- 8 bit per pixel
- Nella posizione (i,j) ci sarà un valore compreso tra $[0, 255]$





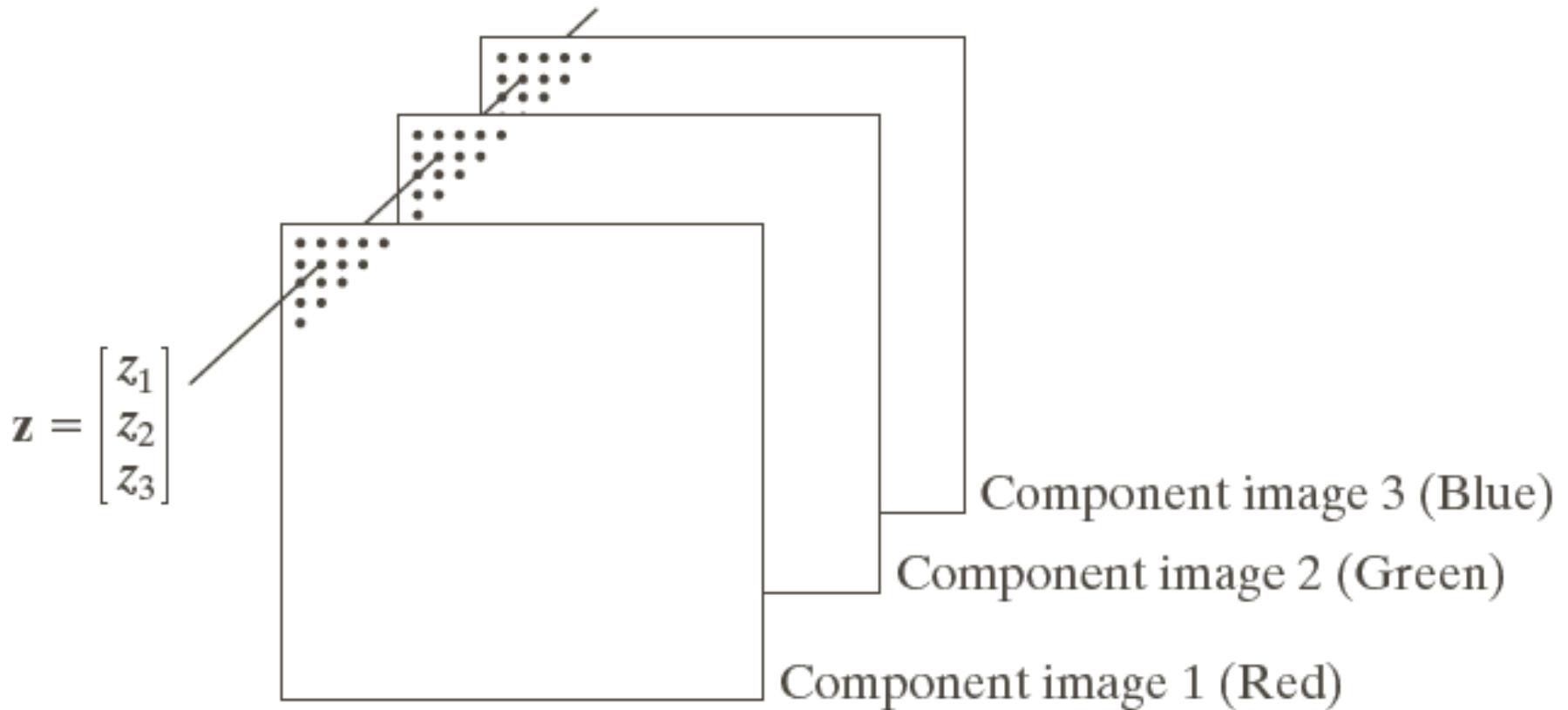
Tipologie di immagini

- A colori
- 8 bit per canale.
Poiché i canali sono 3
avrò 24 bit.
- Nella posizione (i,j)
ci sarà una terna del
tipo (x, y, z) con x,y,z
che assumono valori
compresi tra $[0, 255]$



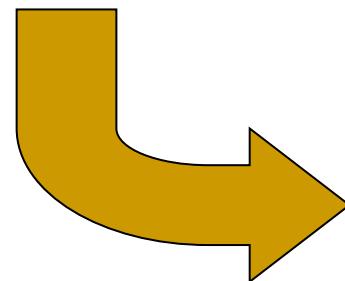


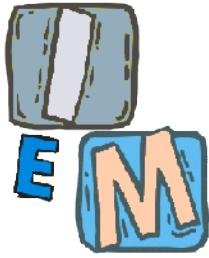
Immagini RGB



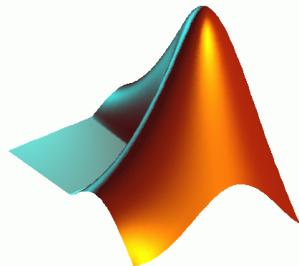
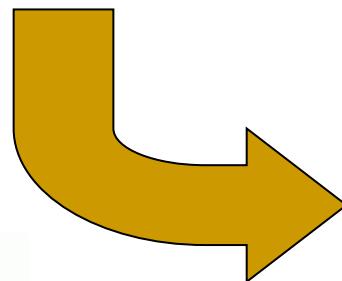
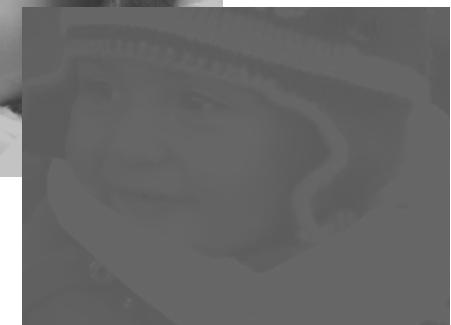
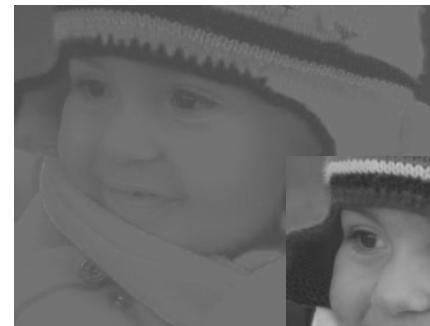


Immagini RGB



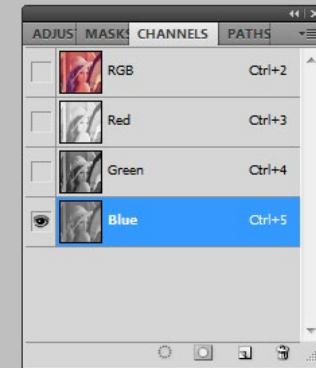
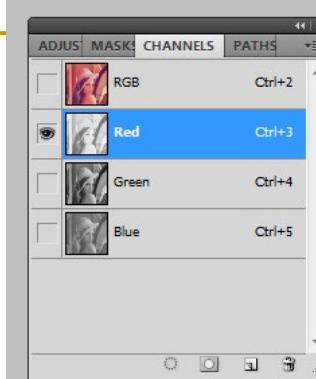
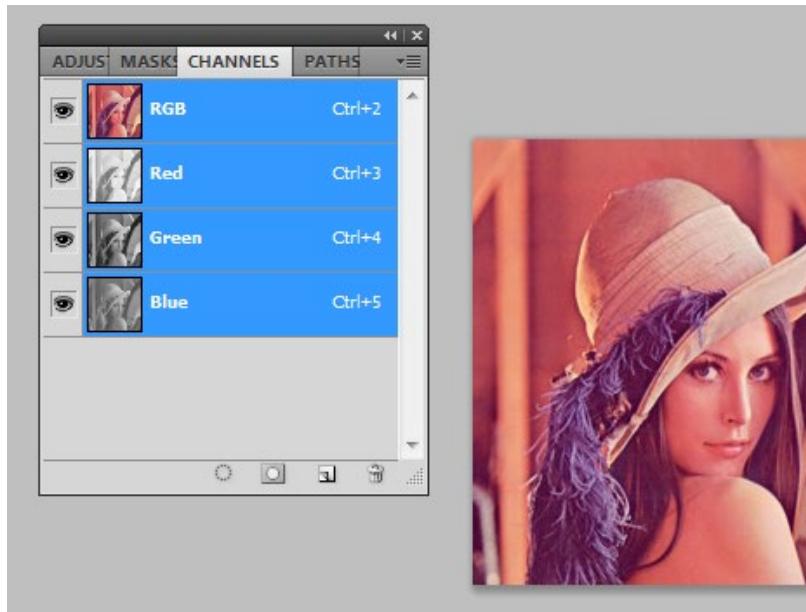


Immagini RGB: in realtà...

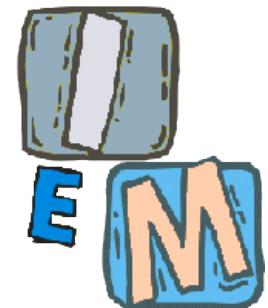




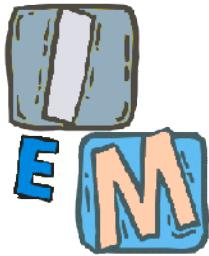
Lena



Interazione & M



Operazioni su Immagini e su matrici



- Un'immagine digitale raster può essere rappresentata da una matrice;
- Su una immagine possono essere fatte tutte le operazioni che si possono fare sulle matrici.
- Non è detto che tali operazioni abbiano un senso logico. Ad esempio che vuol dire moltiplicare due immagini da un punto di vista visivo?
- Qual è il range dei valori dopo tali operazioni?

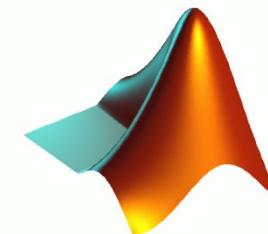


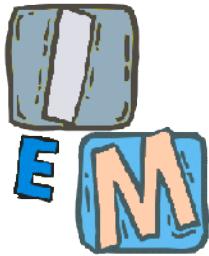
Prodotto

- ATTENZIONE: per le matrici vale la regola del prodotto riga per colonna, mentre nell'image processing si usa fare il prodotto puntuale tra due matrici, cioè il prodotto punto a punto degli elementi corrispondenti.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 \\ -1 & 3 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 2 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 \times 3 + 0 \times 2 + 2 \times 1) & (1 \times 1 + 0 \times 1 + 2 \times 0) \\ (-1 \times 3 + 3 \times 2 + 1 \times 1) & (-1 \times 1 + 3 \times 1 + 1 \times 0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 1 \\ 4 & 2 \end{bmatrix}$$

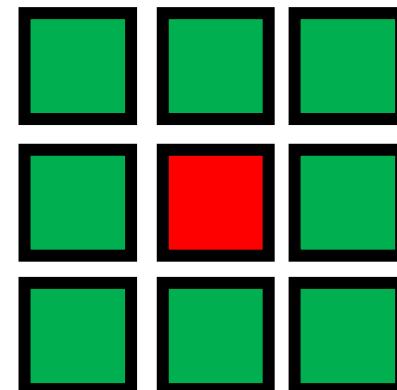
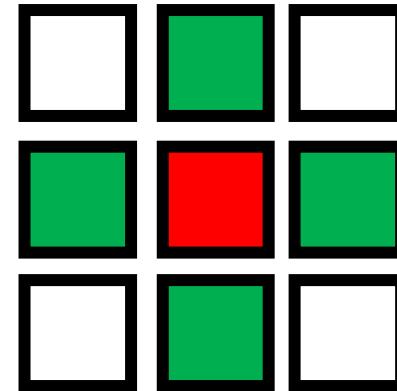
$$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -3 & 0 \\ 1 & 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3 & 0 \\ 3 & -4 \end{bmatrix}$$





Neighborhood N_p

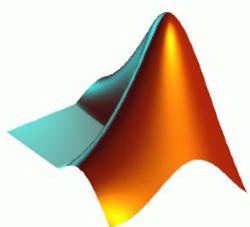
- I vicini 4 connessi di un dato pixel sono quelli alla sua destra e sinistra e quelli sopra e sotto.
- I vicini 8 connessi sono quelli 4 connessi a cui si aggiungono i 4 pixel in diagonale.





Operazioni affini

Transformation Name	Affine Matrix, T	Coordinate Equations	Example
Identity	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = v$ $y = w$	
Scaling	$\begin{bmatrix} c_x & 0 & 0 \\ 0 & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = c_x v$ $y = c_y w$	
Rotation	$\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = v \cos \theta - w \sin \theta$ $y = v \sin \theta + w \cos \theta$	
Translation	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & 1 \end{bmatrix}$	$x = v + t_x$ $y = w + t_y$	
Shear (vertical)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ s_v & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = v + s_v w$ $y = w$	
Shear (horizontal)	$\begin{bmatrix} 1 & s_h & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = v$ $y = s_h v + w$	





Forward mapping

- Dove (v,w) è il pixel di input, (x,y) quello di output e T la matrice affine.
- Per ottenere il valore

$$[x \ y \ 1] = [v \ w \ 1] * T$$

- In questo caso si fa scorrere l'immagine di input e per ogni pixel (v,w) si calcola la posizione della nuova immagine (x,y)



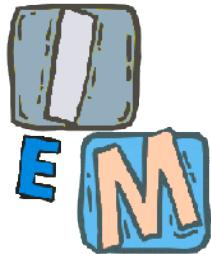
Forward mapping

```
■ A=rgb2gray(imread('lena.jpg'));
■ A=double(A);
■ figure,imshow(uint8(A));
■ [m,n]=size(A);
■ theta=-45;
■
■ B=zeros(size(A));
■ T=[cosd(theta) sind(theta) 0; -sind(theta) cosd(theta) 0; 0 0 1];
%scorre l'immagine di input e si stabilisce in quale punto finiranno i
%nostri pixel in output
■
■ for v=1:m
    for w=1:n
        vett=round([v w 1]*T);
        x=vett(1);
        y=vett(2);
        if (x>0 & x<=m) & (y>0 & y<=n)
            B(x,y)=A(v,w);
        end
    end
end
■ figure,imshow(uint8(B));
```

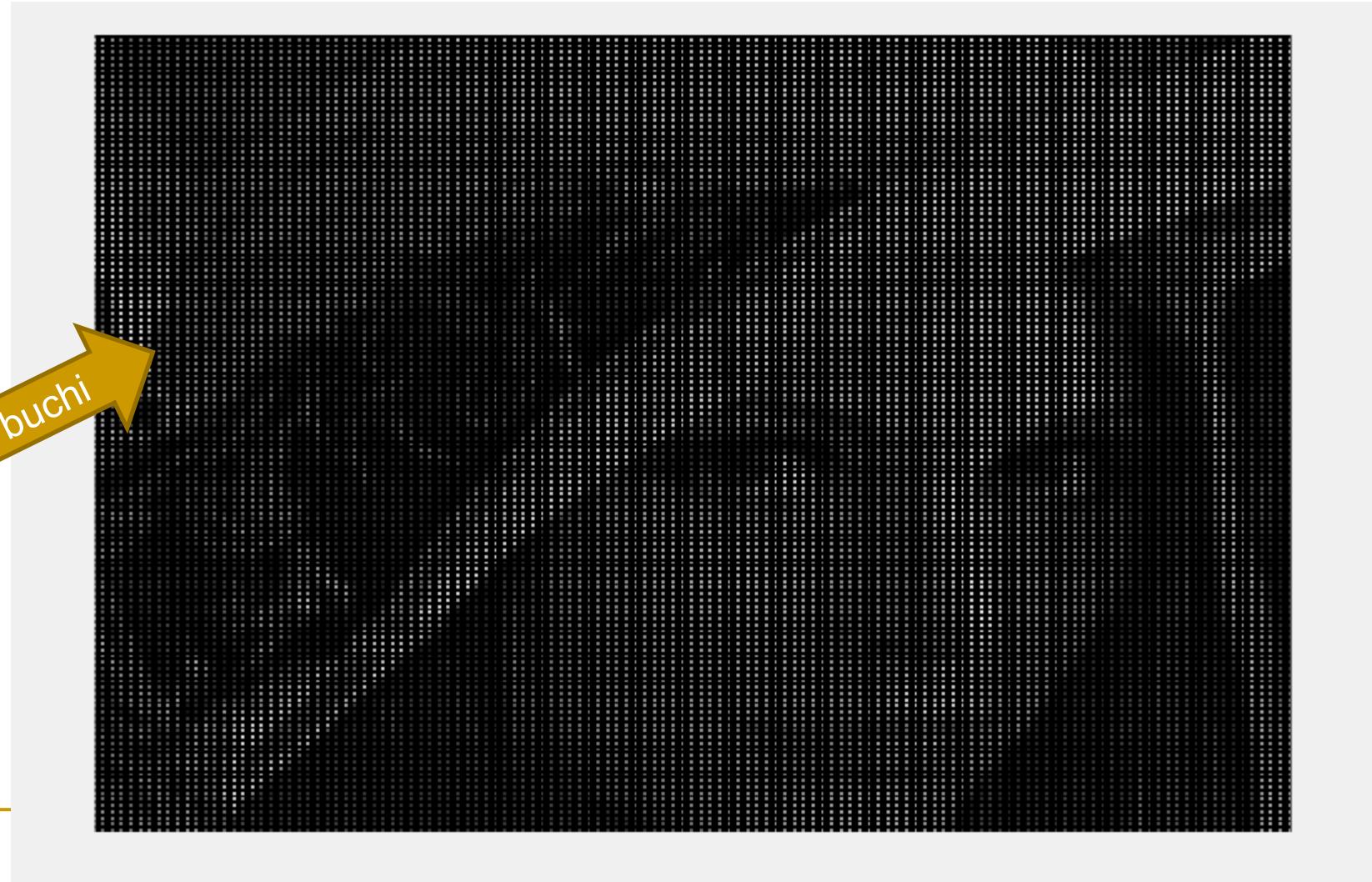


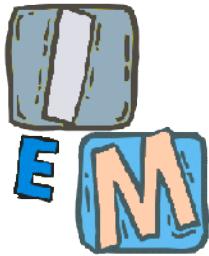
Forward mapping (rotazione)





Forward mapping (scaling)





- **Forward mapping**
- In questo caso si fa scorrere l'immagine di input e per ogni pixel (v,w) si calcola la posizione della nuova immagine (x,y)
- **Inverse mapping**
- Visita le posizioni spaziali dei pixel di output (x,y) e per ciascuna di esse calcola le corrispondenti coordinate nell'immagine di input (si ha una formula inversa)



Inverse mapping

- Visita le posizioni spaziali dei pixel di output (x, y) e per ciascuna di esse calcola le corrispondenti coordinate nell'immagine di input (si ha una formula inversa)
- Ovviamente

$$[v \ w \ 1] = [x \ y \ 1] * \text{inversa}(T)$$



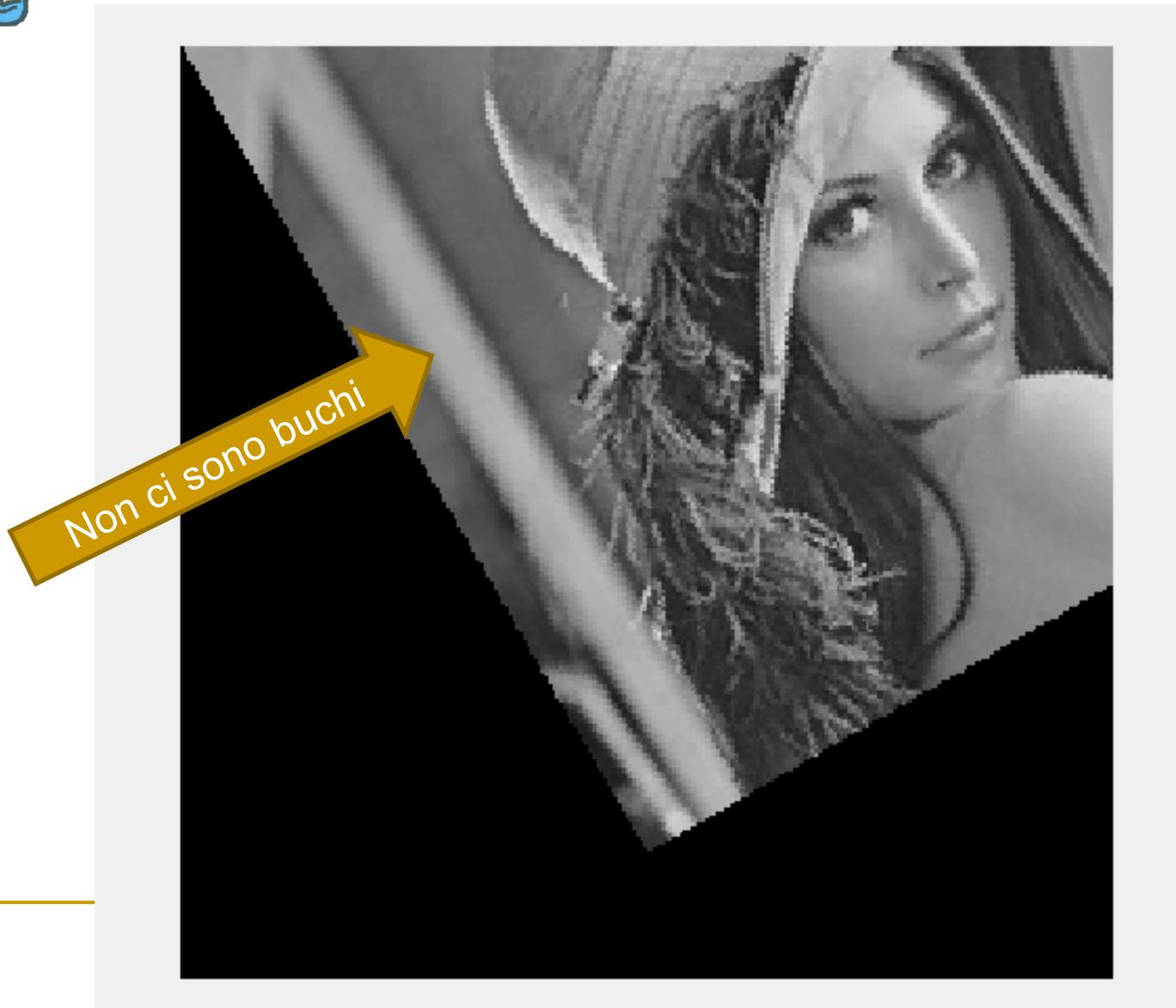
Inverse mapping (usato da Matlab)

```
■ A=rgb2gray(imread('lena.jpg'));
■ A=double(A);
■ figure,imshow(uint8(A));
■ [m,n]=size(A);
■ theta=38;

■ B=zeros(size(A));
■ T=[cosd(theta) sind(theta) 0; -sind(theta) cosd(theta) 0; 0 0 1];
■
■ %scorre l'immagine di output
■
■ for x=1:m
■   for y=1:n
■     vett=round([x y 1]*inv(T));
■     v=vett(1);
■     w=vett(2);
■     if (v>0 & v<=m) & (w>0 & w<=n)
■       B(x,y)=A(v,w);
■     end
■   end
■ end
■
■ figure,imshow(uint8(B));
```



Inverse mapping (rotazione)

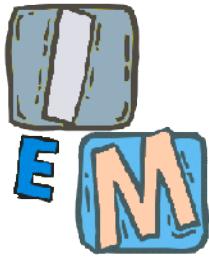




Inverse mapping (scaling)

Non ci sono buchi



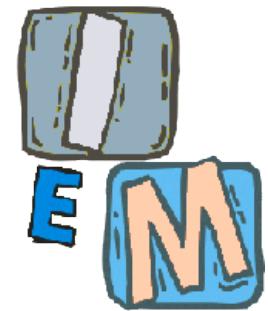


Combinazioni

- Inoltre le trasformazioni affini si possono combinare tra di loro semplicemente moltiplicando le corrispondenti matrici T.

```
theta=38;  
tx=40;  
ty=23;  
cx=2;  
cy=2;
```

```
Tr=[cosd(theta) sind(theta) 0; -sind(theta) cosd(theta) 0; 0 0 1];  
Tt=[1 0 0; 0 1 0; tx ty 1];  
Ts=[cx 0 0 ; 0 cy 0; 0 0 1];  
T=Tr*Tt*Ts;
```



L'interpolazione



Valori non assegnati

- Nel corso delle trasformazioni, potrebbero esserci dei valori di pixel che non sono mai individuati dalle formule.
- Per essi si applica un processo di interpolazione.



Interpolazione

- In generale, l'interpolazione è il processo che partendo da dati reali stima i dati non conosciuti.
- L'interpolazione non comporta un miglioramento della qualità dell'immagine come se "riacquisisse" i valori mancanti ma effettua solo una stima dei valori ignoti.

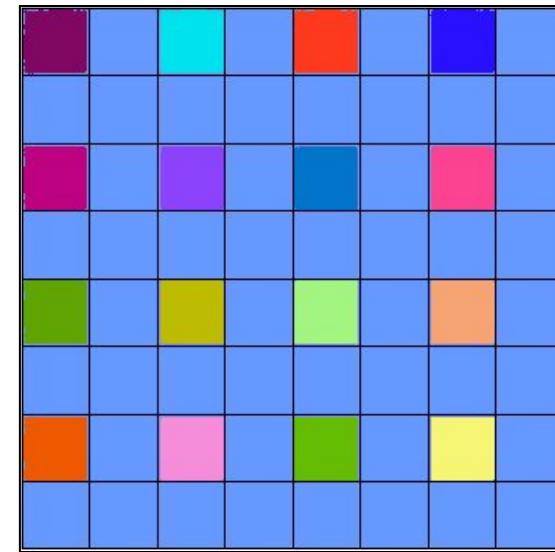
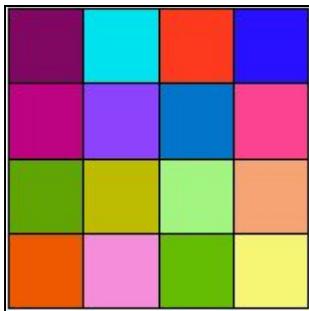


Zooming in

- L'interpolazione è effettuata anche nei processi di zooming.
- Uno zooming $2\times$ vuol dire che le dimensioni dell'immagine sono raddoppiate. Se ho una immagine $m \times n$ essa diverrà $2m \times 2n$. Che vuol dire che il numero totale di pixel sarà quadruplicato!
- Lo zooming può essere effettuato in maniera differente per le singole dimensioni. Ad esempio si potrebbe raddoppiare il numero di righe e triplicare il numero di colonne. In questo caso, i nostri algoritmi di interpolazione saranno più complicati.



Zooming in (2x)



Dopo aver posizionato i valori già noti, occorre stimare i valori nelle zone vuote.



Vari tipi di interpolazione

Esistono diversi tipi di interpolazione:

- Nearest neighbor (o replication)
- Bilinear
- Bicubic
- Altri...



Replication



(a)

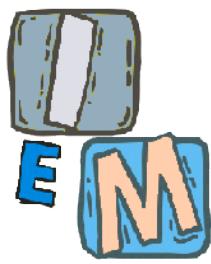


(b)



Replication o nearest neighbor

- Questo metodo assegna a ogni nuova posizione l'intensità del pixel più prossimo nell'immagine originale.
- Questo approccio è molto semplice ma introduce artefatti come distorsioni lungo i lati degli oggetti rappresentati nell'immagine.



Bilinear



(a)



(b)



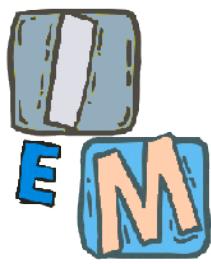
Bilinear

- Nell'interpolazione bilineare si utilizzano i quattro pixel più vicini per stimare l'intensità da assegnare a ciascuna nuova posizione. Supponiamo che (x, y) siano le coordinate della posizione cui si deve assegnare un valore di intensità e che $v(x, y)$ equivalga al valore dell'intensità. Per l'interpolazione bilineare il valore assegnato si ottiene mediante l'equazione

$$v(x, y) = ax + by + cxy + d$$

Dove i quattro coefficienti sono determinati a partire dalle quattro equazioni nelle quattro incognite ottenibili utilizzando i quattro pixel più vicini al punto (x, y) .

- L'interpolazione bilineare produce dei risultati migliori rispetto alla replication con un incremento modesto nella complessità di calcolo.



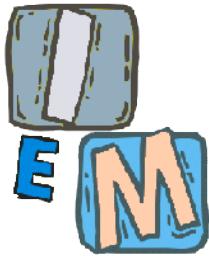
Bicubic



(a)



(b)



Bicubic

- L'interpolazione bicubica utilizza i sedici pixel più vicini al punto. Il valore di intensità assegnato al punto (x, y) si ottiene attraverso l'equazione

$$v(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i y^j$$

- Dove i sedici coefficienti sono determinati a partire da sedici equazioni in sedici incognite che possono essere scritte utilizzando i sedici punti più vicini a (x, y).
- Generalmente l'interpolazione bicubica preserva meglio i dettagli rispetto all'interpolazione bilineare. L'interpolazione bicubica è la tecnica standard utilizzata nei programmi commerciali di editing come Adobe Photoshop e Corel Photopaint.



replication



bilinear



bicubic





Cosa fare ai bordi?

Un problema è quello dei bordi: come fare l'interpolazione ai bordi?

POSSIBILI SOLUZIONI:

- Non fare nulla
- Interpolare con i valori presenti anche se in numero minore di quelli usati per altri pixel.



Considerare solo le zone centrali dell'immagine.

- In questo caso non si calcolano i valori ai bordi

input

1	2	3
4	5	6
7	8	9

output

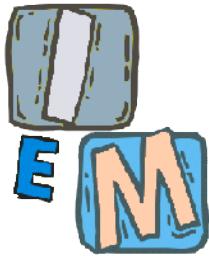
1	1.5	2	2.5	3	
2.5	3	3.5	4	4.5	
4	4.5	5	5.5	6	
5.5	6	6.5	7	7.5	
7	7.5	8	8.5	9	



Dopo aver fatto i calcoli replicare le ultime righe e colonne.

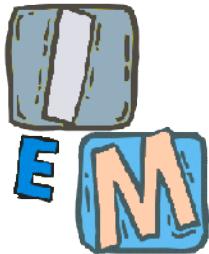
- In questo caso per fare i calcoli si replicano i valori nelle righe e nelle colonne «isolate»

input			output			
1	2	3	1	1.5	2	2.5
4	5	6	2.5	3	3.5	4
7	8	9	4	4.5	5	5.5
			5.5	6	6.5	7
			7	7.5	8	8.5
			7	7.5	8	8.5
			9	9	9	9



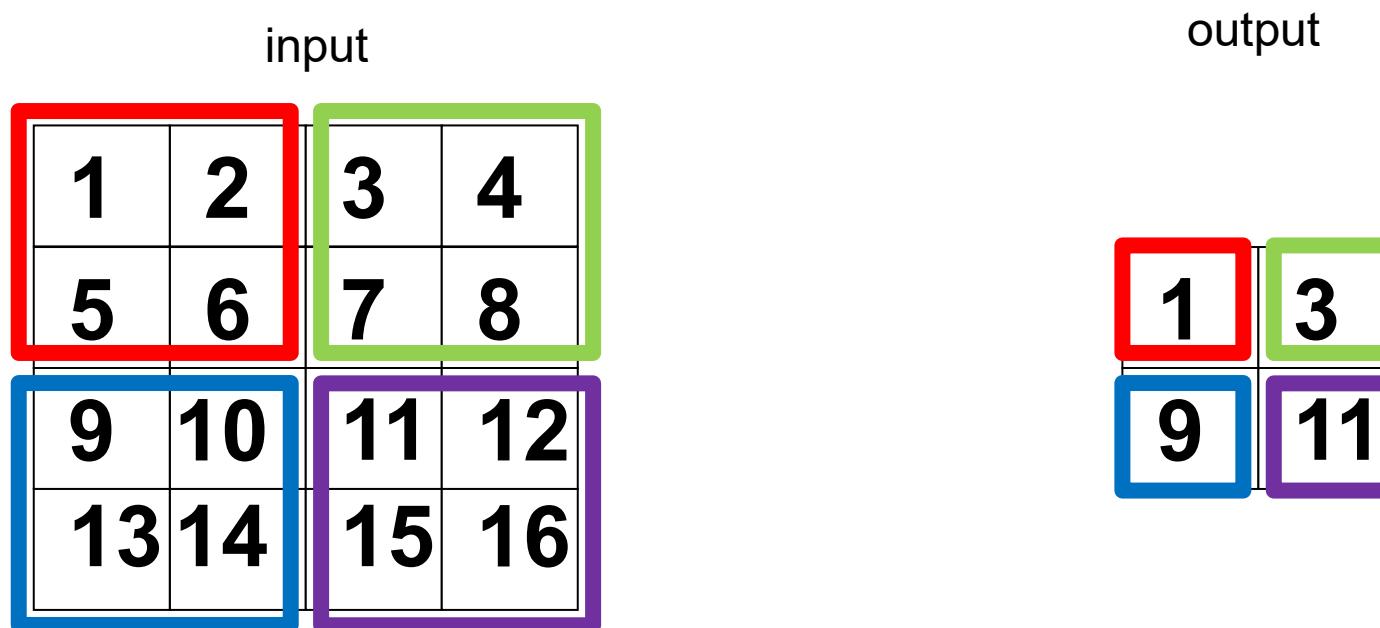
Zooming out

- Se lo zooming è fatto con un numero inferiore ad 1, si ottiene una immagine più piccola dell'originale.
- Se riduco una immagine, ho un processo detto di «decimazione».
- Data una immagine $m \times n$ con uno zooming out di 0,5 si otterrà una immagine $m/2 \times n/2$.



Decimazione: metodo 1

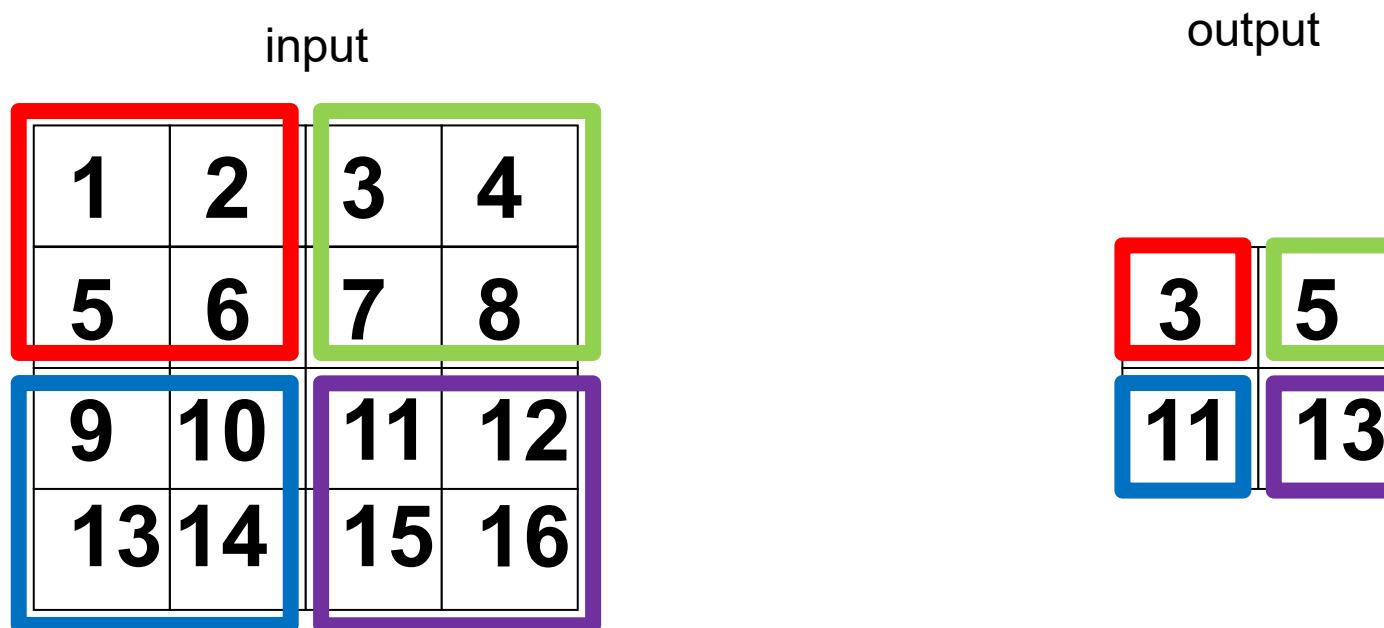
- Ogni quattro pixel se ne sceglie uno.





Decimazione: metodo 2

- Di quattro pixel se ne calcola il valore medio.





Stima della qualità di un algoritmo

MSE: (*Mean Square Error*) tale parametro serve a stimare l'errore quadratico medio tra due immagini; più tale indice è basso minore è la differenza tra le immagini.

PSNR: (*Peak Signal to NoiseRatio*) parametro per misurare la qualità di un'immagine compressa rispetto all'originale, dipende dalla differenza tra l'immagine codificata e quella originale. Maggiore è il suo valore maggiore sarà la "somiglianza" con l'originale.



PSNR (Peak Signal to Noise Ratio)

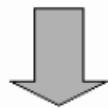
- È una tecnica Full reference.
- Per calcolarlo è necessario avere sia l'immagine da valutare I' ($M \times N$) che una sua versione ottimale I ($M \times N$).
- Il PSNR **non è** il migliore parametro per valutare la qualità di un algoritmo di interpolazione, ma **è** il più diffuso.



Schema per il calcolo del PSNR in caso di zooming



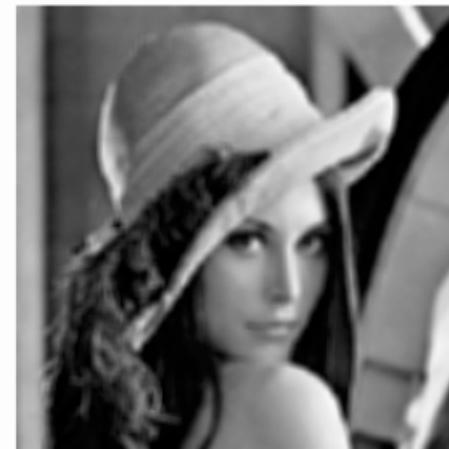
PSNR



Sub-sampling



Zooming





PSNR: formule

- Per calcolare il PSNR abbiamo bisogno dell'MSE (Mean Square Error):

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [I'(x, y) - I(x, y)]^2$$

- Il PSNR è calcolato con una delle seguenti formule (sono equivalenti):

$$PSNR = -10 \log_{10} \frac{MSE}{S^2} \quad PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{S}{\sqrt{MSE}} \right), \quad PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{S^2}{MSE} \right)$$

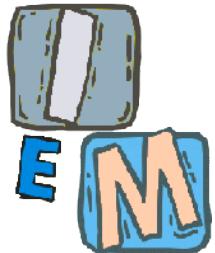
S is the maximum pixel value (usually 255),



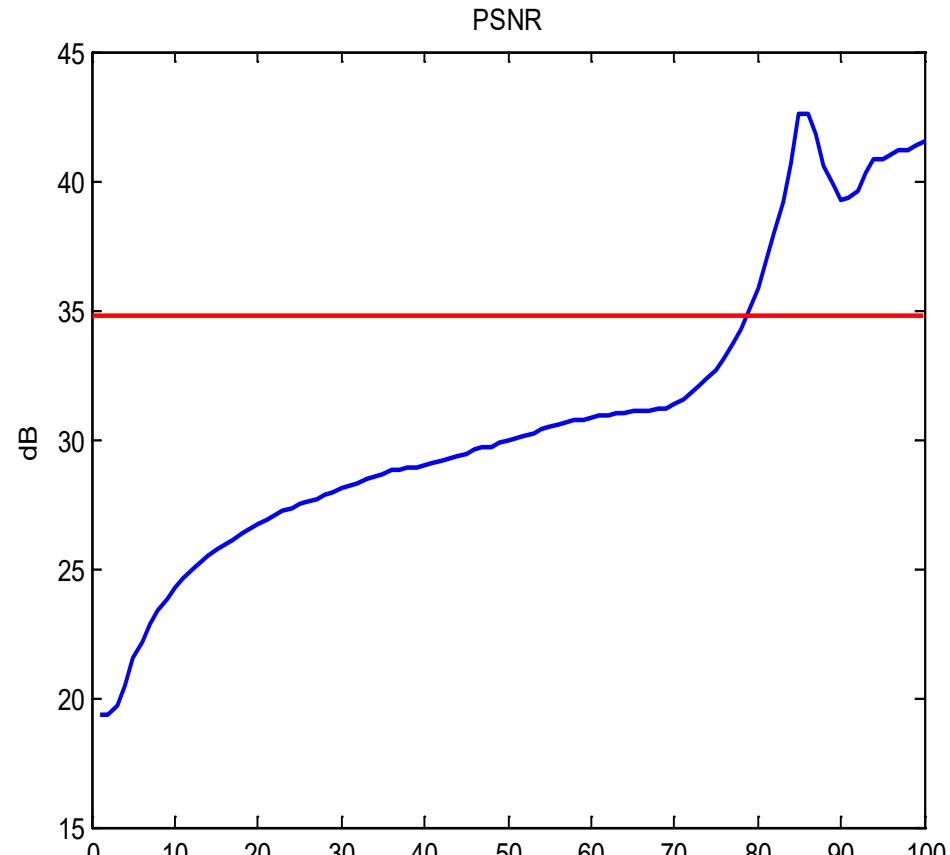
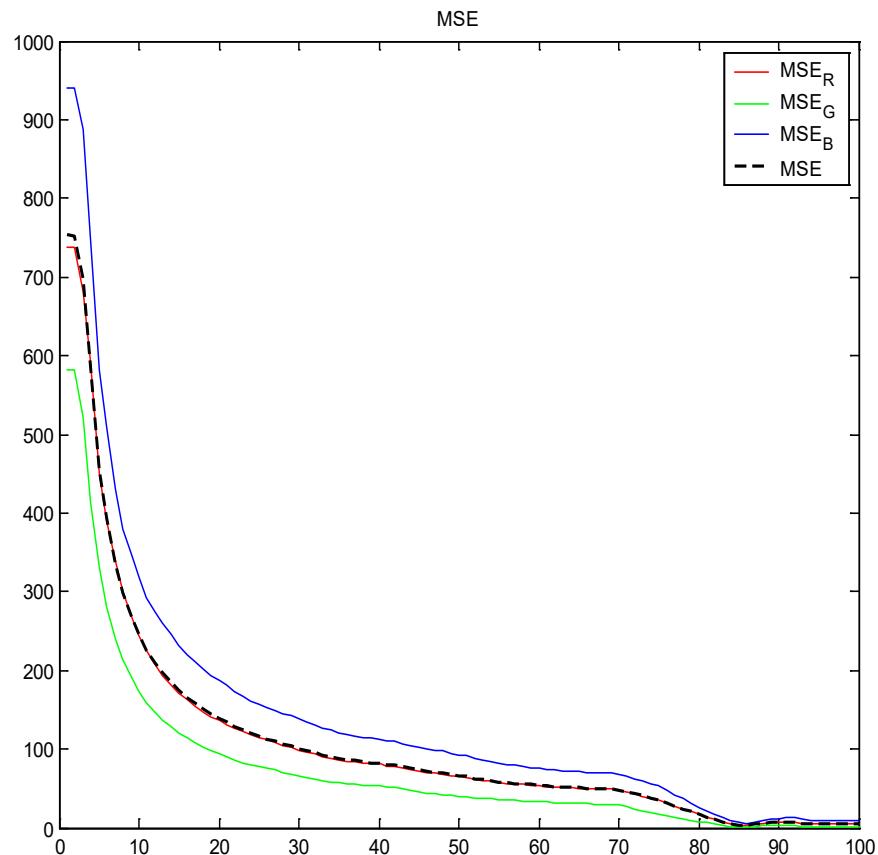
MSE e PSNR

MSE e PSNR sono molto usati perché semplici da calcolare, però non sempre danno un risultato fedele a quello dato dal sistema visivo umano. Infatti:

- ❑ La sensibilità del sistema HVS agli errori può essere diversa per diversi tipi di errori, e può variare anche in base al contesto visuale. Tale differenza non può essere colta adeguatamente dall'MSE.
- ❑ Due immagini distorte possono avere tipi molto diversi di errori pur avendo lo stesso MSE.
- ❑ Entrambe le metriche sono fortemente influenzate anche da “impercettibili” movimenti spaziali (traslazioni, rotazioni, flipping di righe e/colonne)



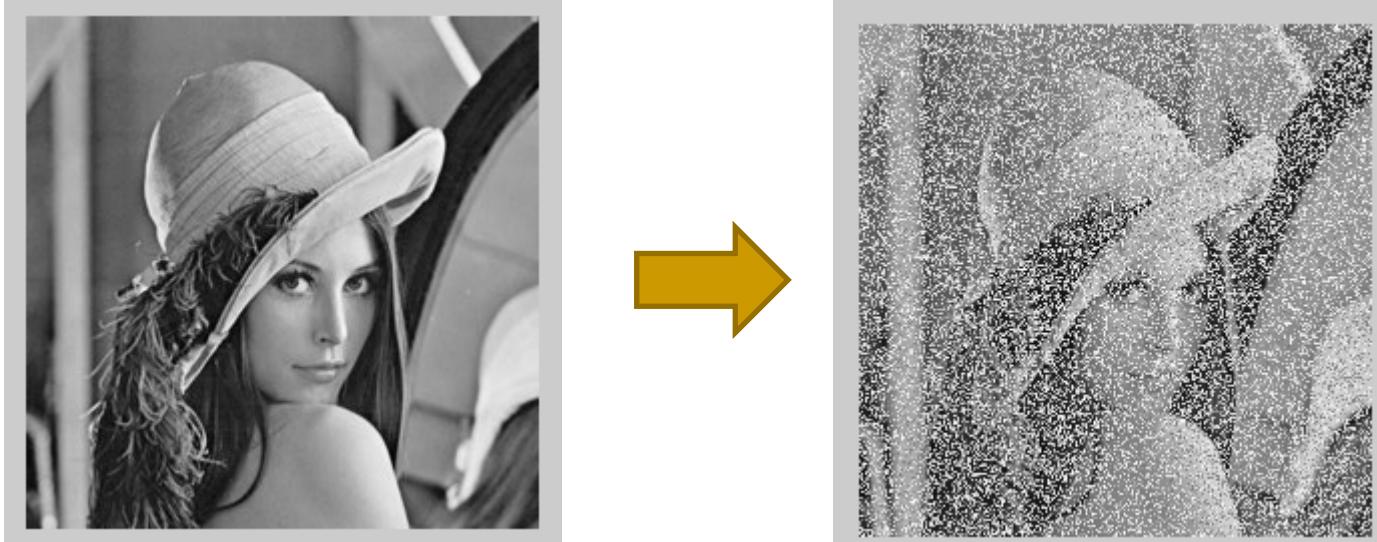
PSNR vs MSE

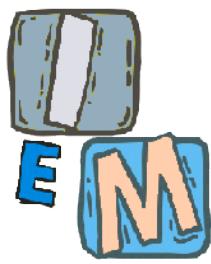




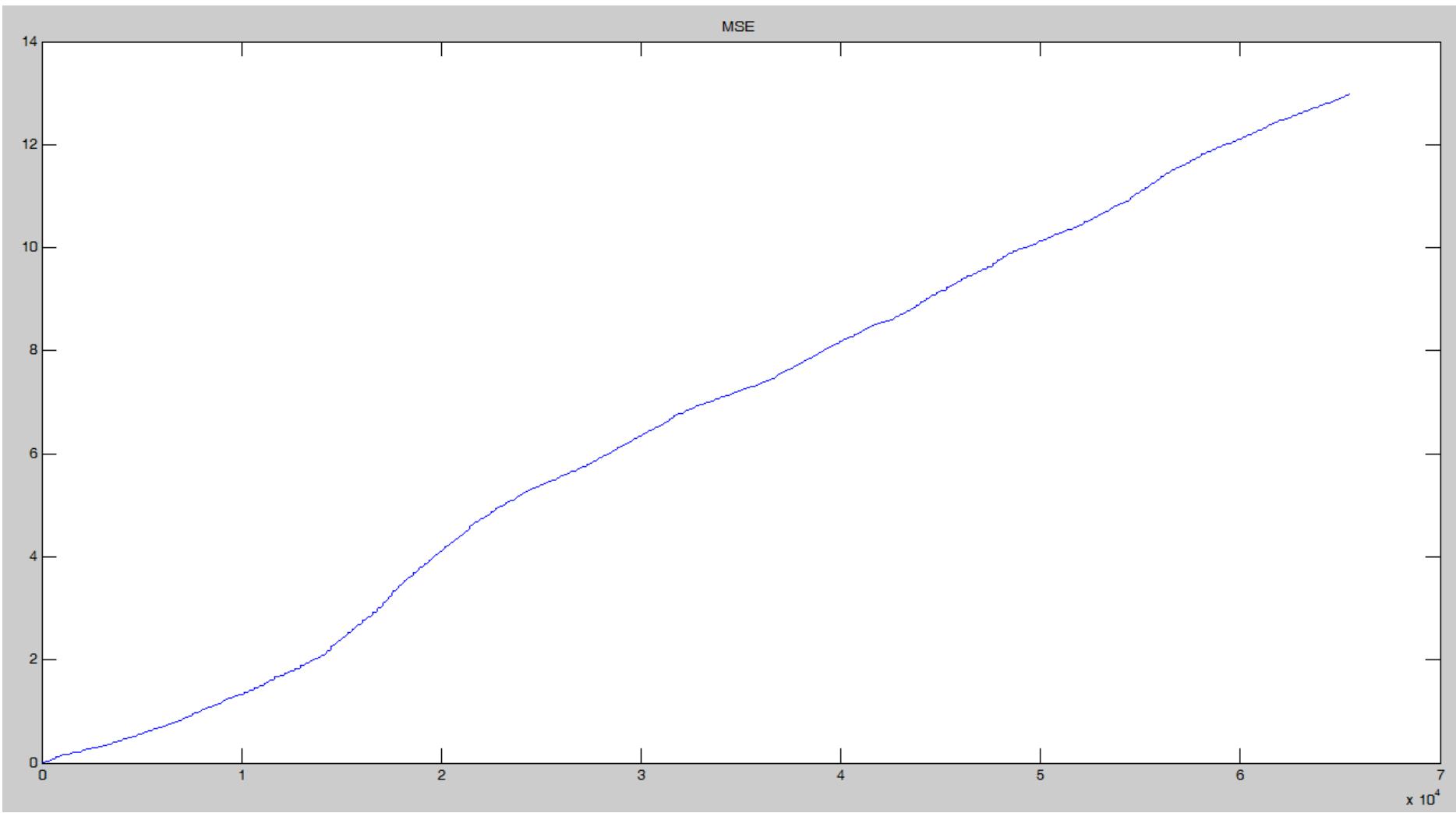
Andamento grafico

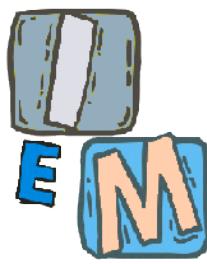
- Ecco come varia il PSNR e MSE se facciamo variare in maniera random i pixel di una immagine.
- Ogni volta che varia un pixel calcolo il PSNR e MSE.



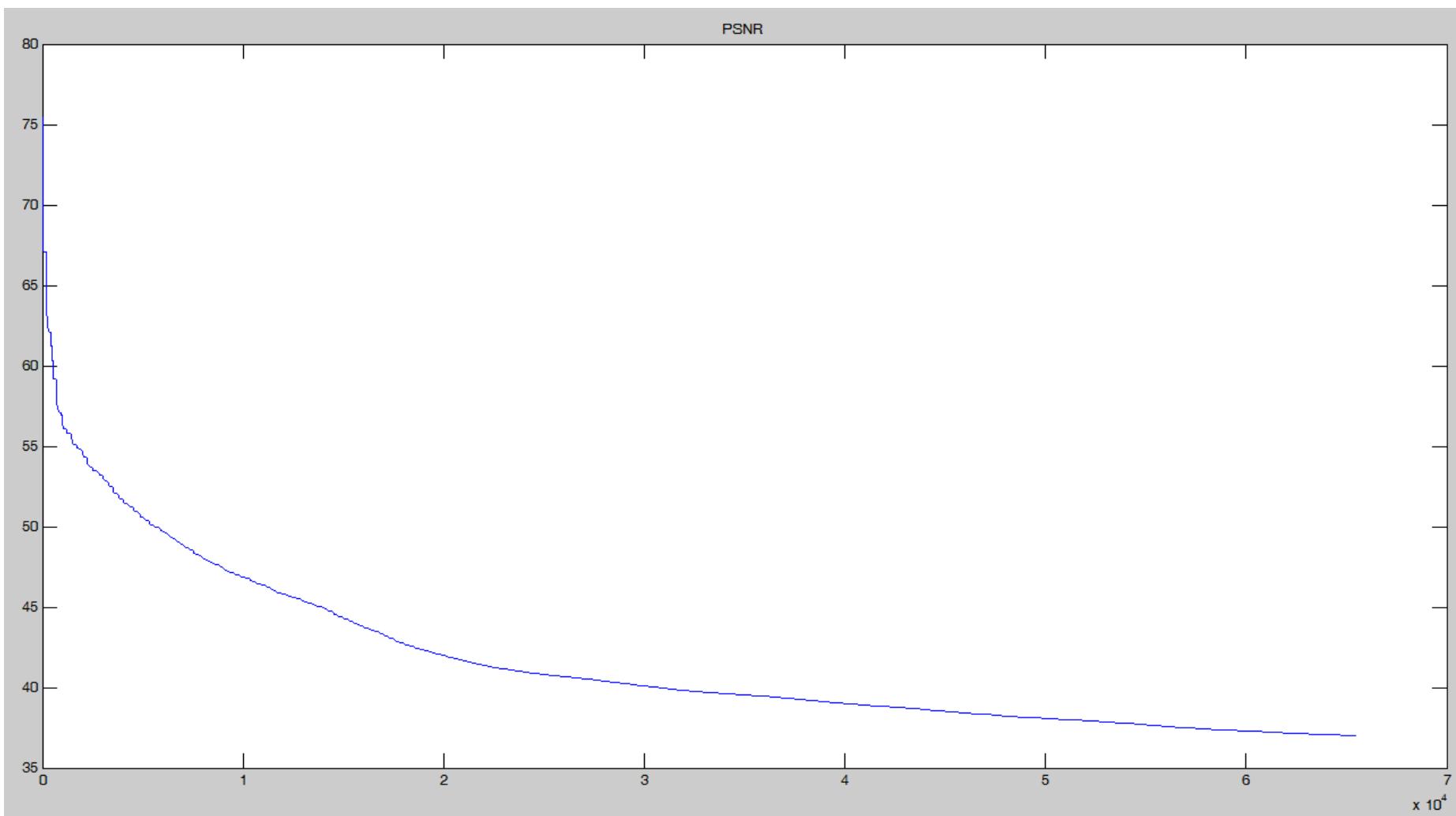


MSE





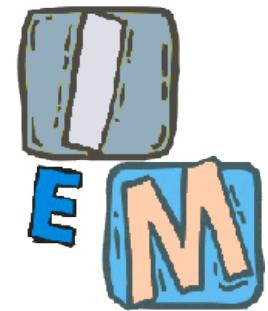
PSNR





MSE e PSNR per immagini RGB

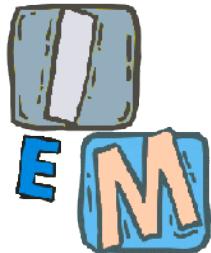
- Solitamente si usa una delle seguenti soluzioni
 - la semplice media dei valori MSE (o PSNR) sui 3 canali
 - Una combinazione lineare che pesa maggiormente la componente verde
 - ...



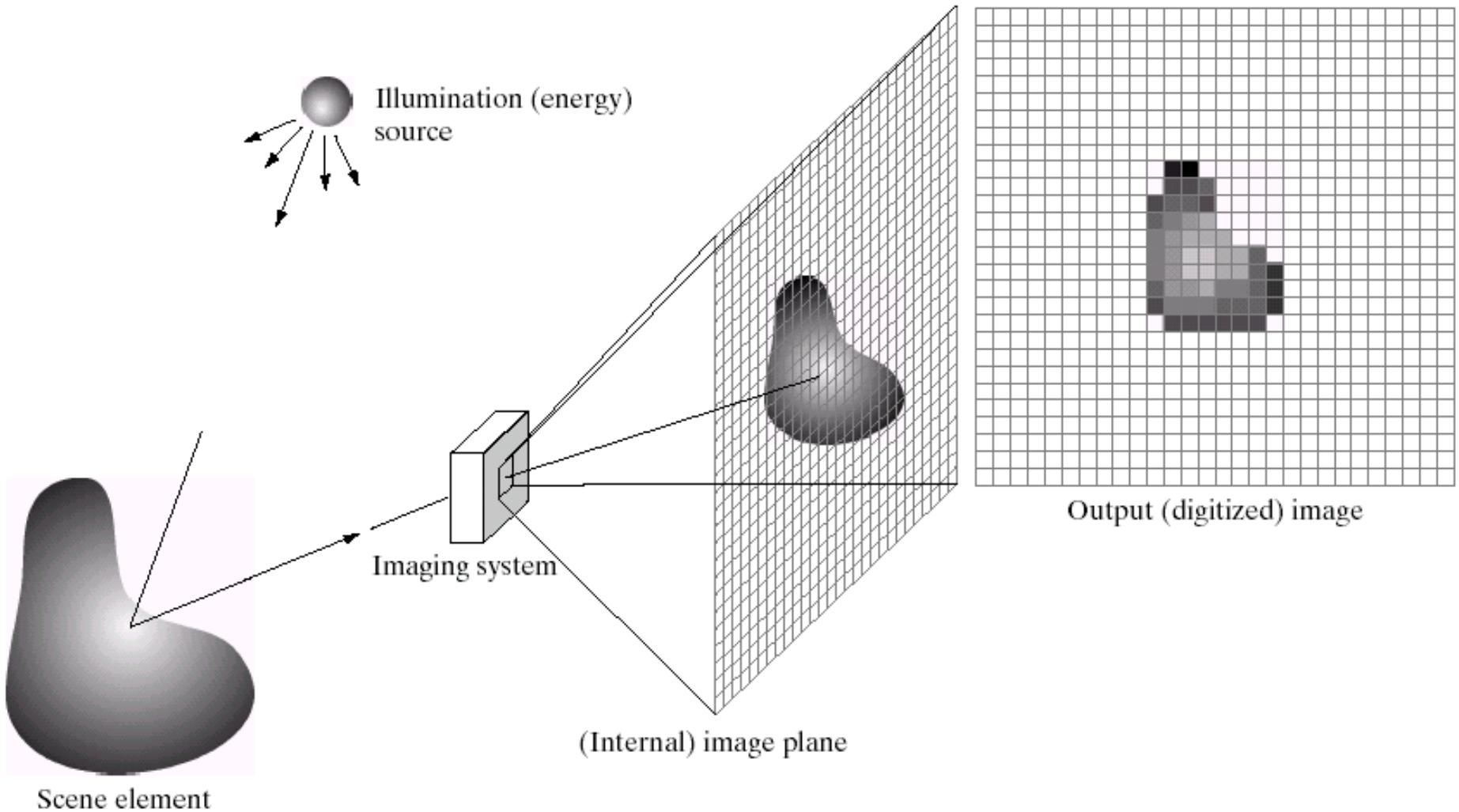
Acquisizione delle immagini digitali

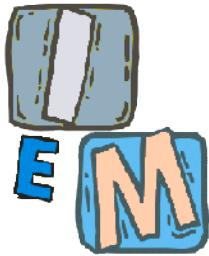


- Quando la luce colpisce un oggetto, una parte viene assorbita ed una parte viene riflessa.
- Quella che viene riflessa, da' origine al colore percepito.
- Per creare una immagine digitale, è essenziale che tale luce riflessa sia catturata da un sensore ed elaborata.



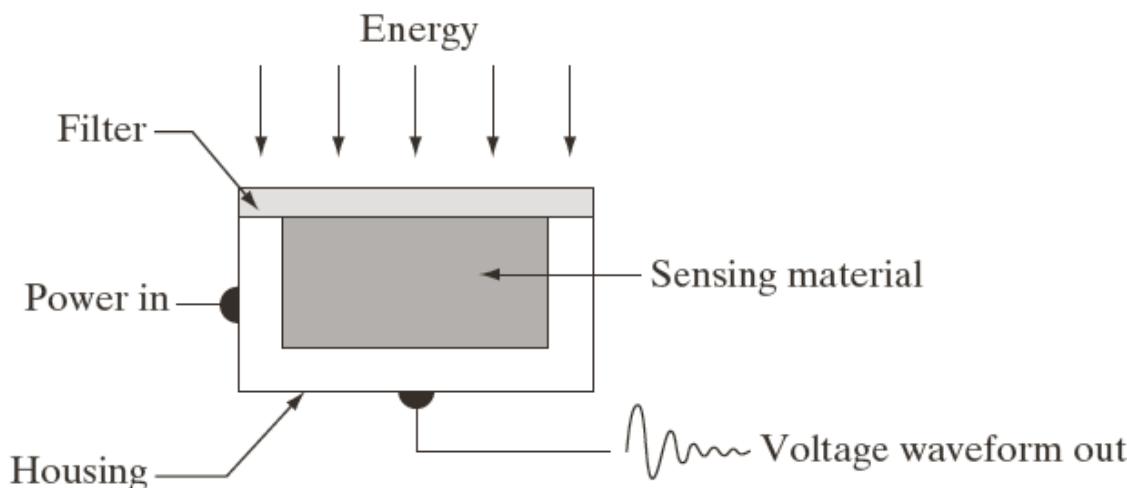
Come si acquisisce una immagine





Il sensore

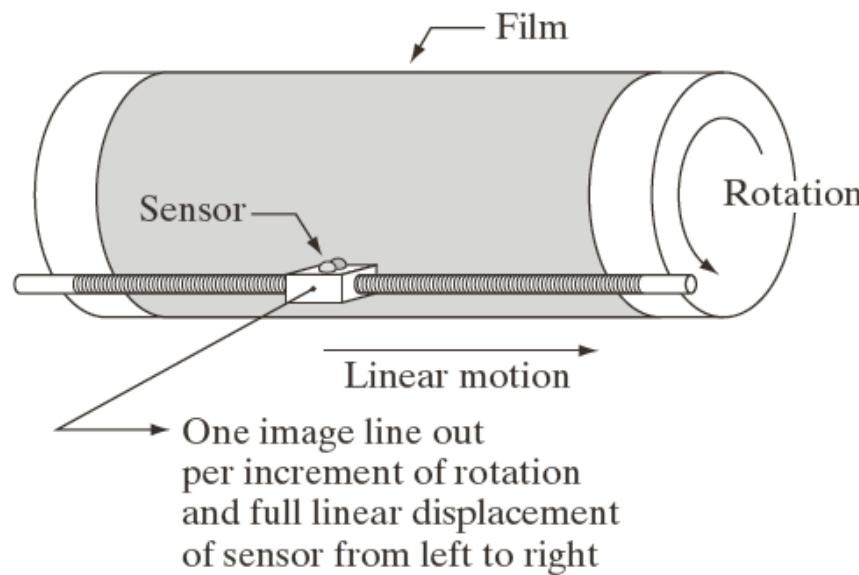
- L'energia che colpisce il sensore è trasformata in impulso elettrico dal sensore che è fatto di un materiale particolarmente sensibile alla luce. Tale impulso elettrico è successivamente digitalizzato.





Singolo sensore

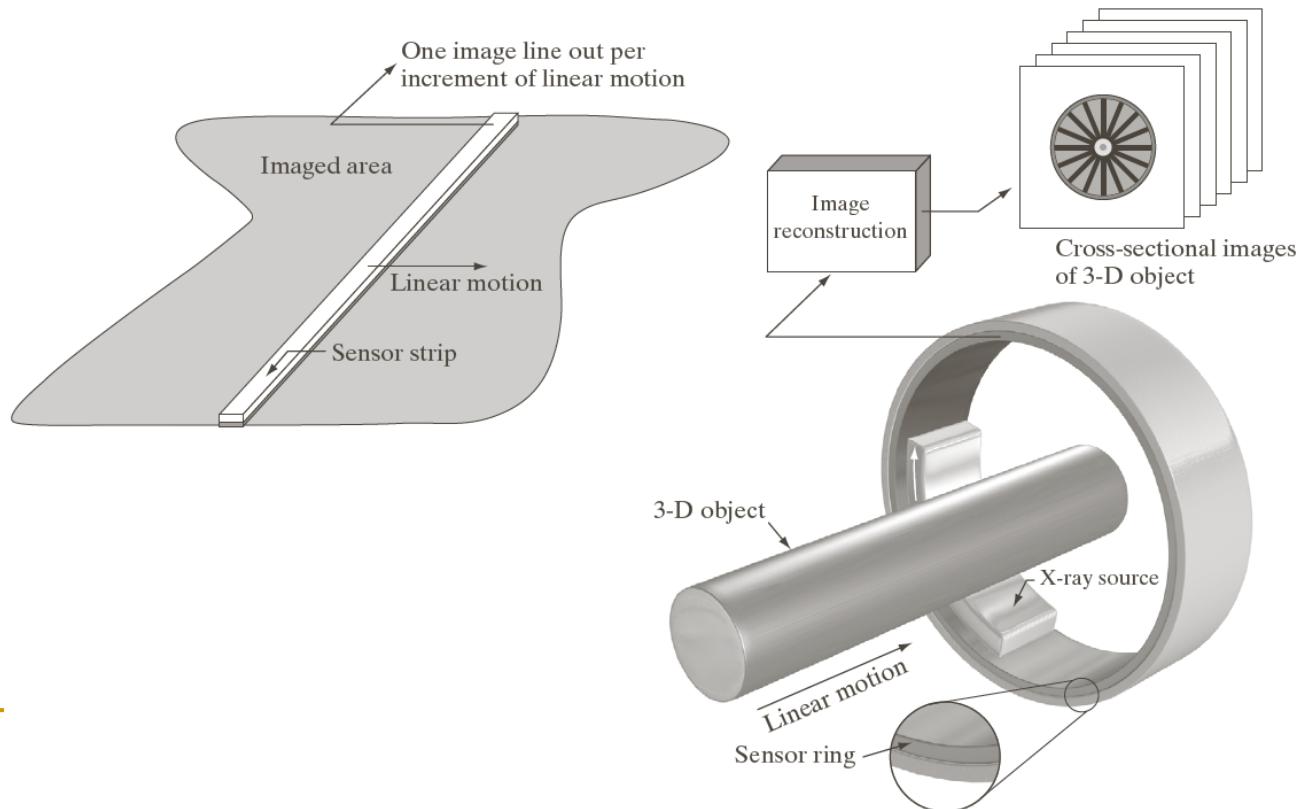
- Gli scanner usano un singolo sensore che viene spostato lungo la sorgente da digitalizzare.

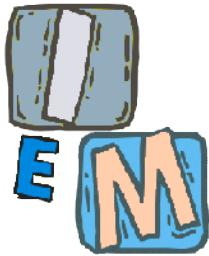




Sensori in linea

- Le macchine per fare le TAC usano dei sensori che sono disposti in un'unica linea.





Sensori in 2D array

- Nelle macchine fotografiche digitali, i sensori sono disposti su una matrice.
- Non è necessario spostare il sensore, come nei casi precedenti, per effettuare una scansione.
- I più diffusi sensori di questo tipo sono i CCD



CCD: Charged Coupled Device

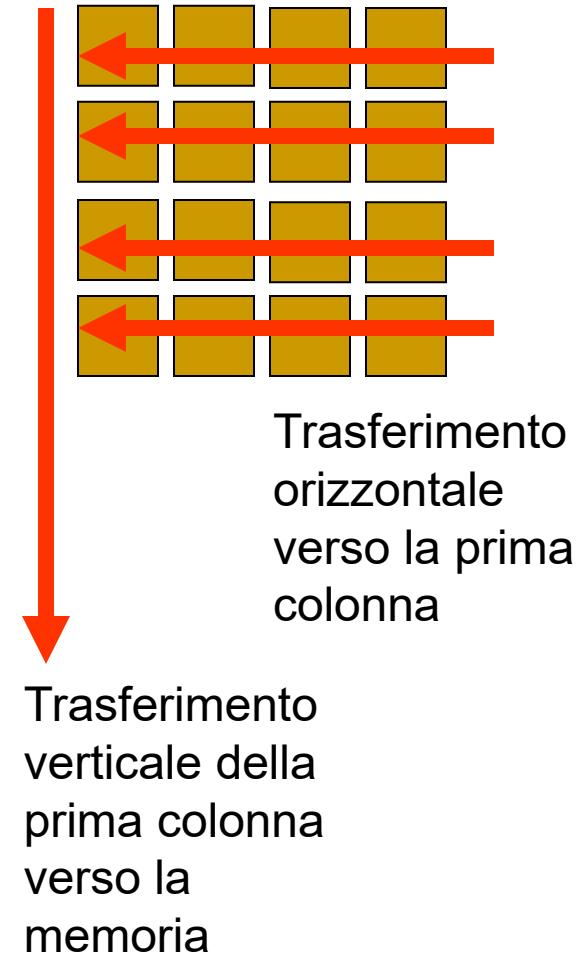
- Si tratta di dispositivi elettronici che se colpiti da fotoni assumono una carica positiva.
- Le celle del CCD non possono caricarsi oltre un certo limite: sono dei secchi di acqua che non possono riempirsi oltre alla loro capacità (fenomeno di sovra-saturazione).
- Il numero di celle per area di esposizione è un parametro di qualità della fotocamera misurato in MEGAPIXEL

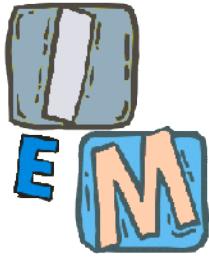


CCD: lo schema di misurazione

Dopo che le cariche sono state acquisite da una matrice di celle esse debbono essere trasferite in una memoria digitale. La scansione avviene in C fasi, una fase per ciascuna colonna della matrice.

Ad ogni fase viene trasferita in memoria la prima colonna della matrice, nello stesso tempo tutti gli elementi (dalla seconda colonna in poi) vengono trasferiti dalla propria colonna a quella precedente.





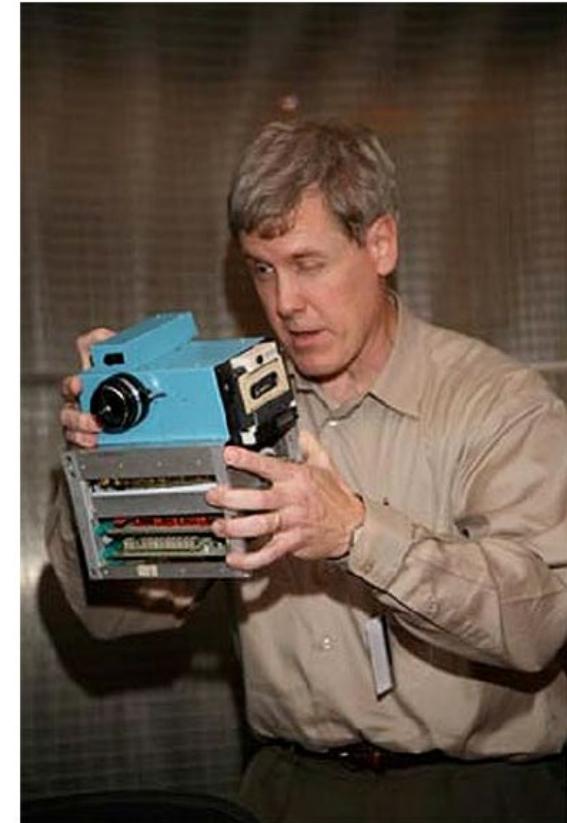
December 1975, Steven Sasson, an electrical engineer at Eastman Kodak Co., in Rochester, N.Y., became the first person to pick up a digital camera and take a picture.

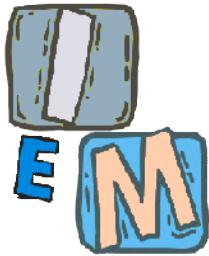




Prototipo Macchina Fotografica Digitale del 1975

- Peso di 4 Kg
- Risoluzione di 0,01 Megapixel
- Immagini di 100 x 100 pixel
- Memorizzazione su cassetta
- Tempo di memorizzazione di uno scatto su cassetta: 23 secondi.





- Il test finale fu nel dicembre 1975: Sasson convinse un suo assistente a posare per lui. La macchina impiegò 23 secondi per registrare l'immagine sulla audio-cassetta e altri 23 secondi per essere visualizzata su di una normale televisione. Il risultato? Si intravedeva solo la silhouette dei capelli ma, dopo una piccola taratura all'elettronica, il viso dell'assistente fu subito visibile.



Questa è considerata la prima foto ufficiale scattata con la "Kodak".



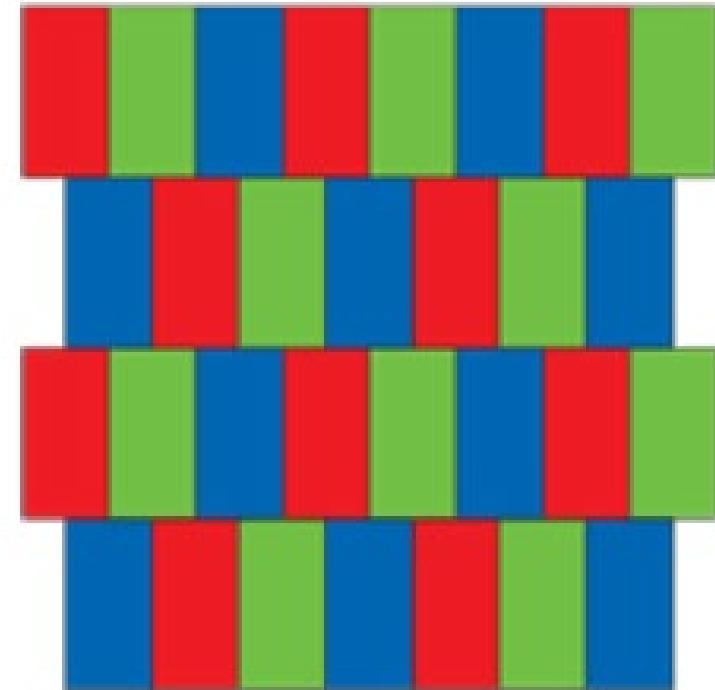
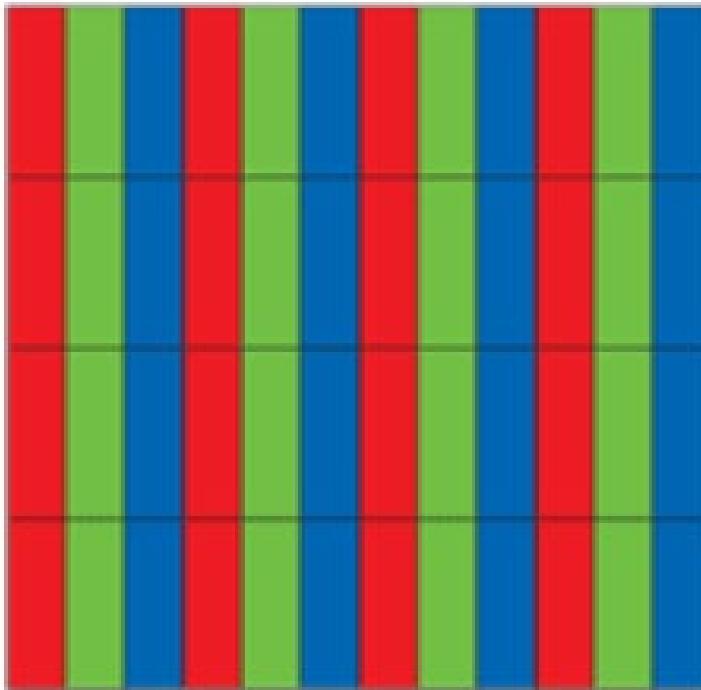


CFA: Color Filter Array

- Poiché ogni cella memorizzerà **solo un colore** per volta e non una terna, occorre scegliere qual è il modello di memorizzazione ottimale (CFA).
- I due colori mancanti per completare la terna, saranno ottenuti per interpolazione dai pixel vicini (Color Interpolation).
- Il grado di accuratezza del risultato dipende da quanto è sofisticato il metodo di interpolazione.

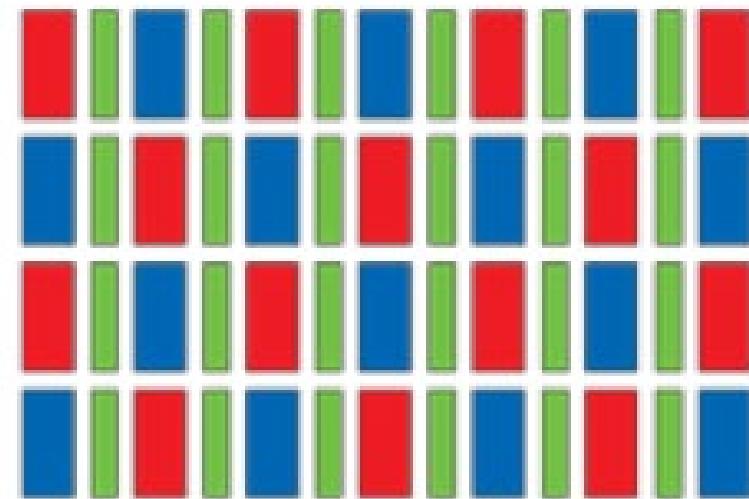
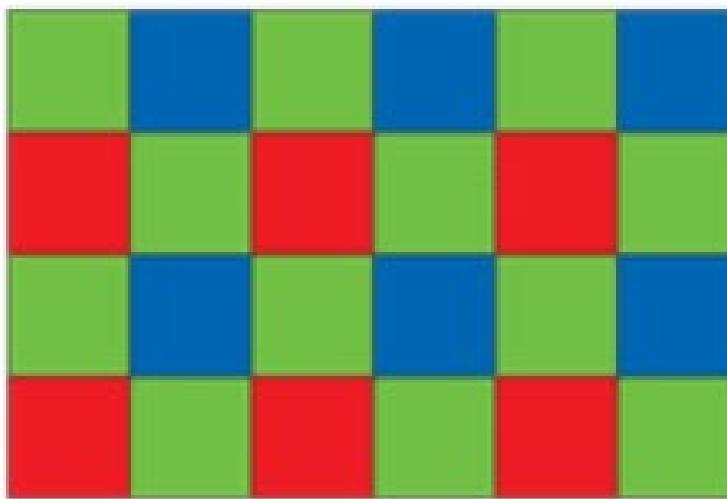


Possibili modelli di CFA



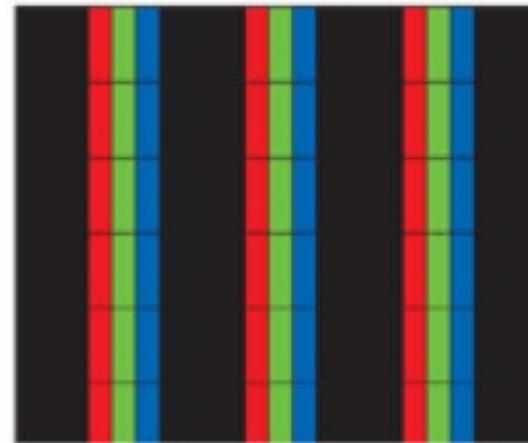
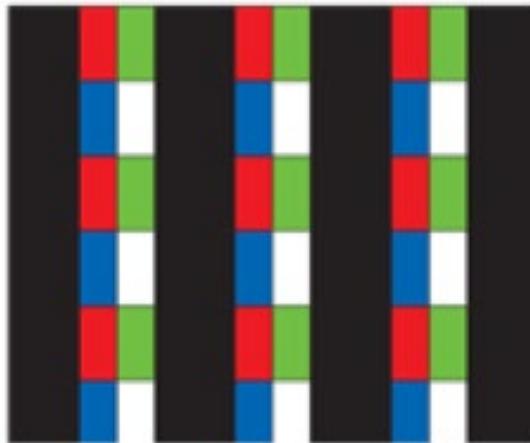
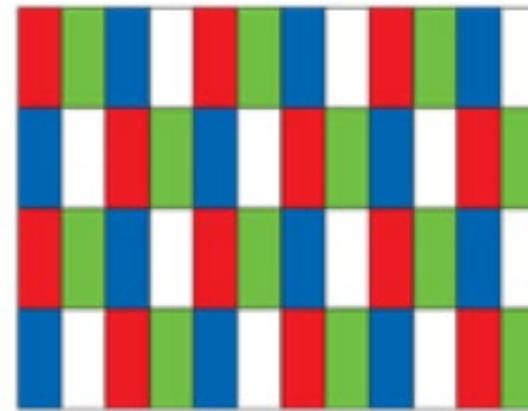
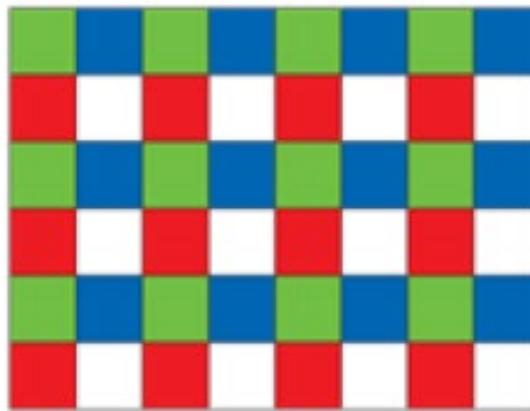


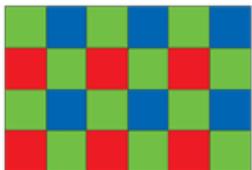
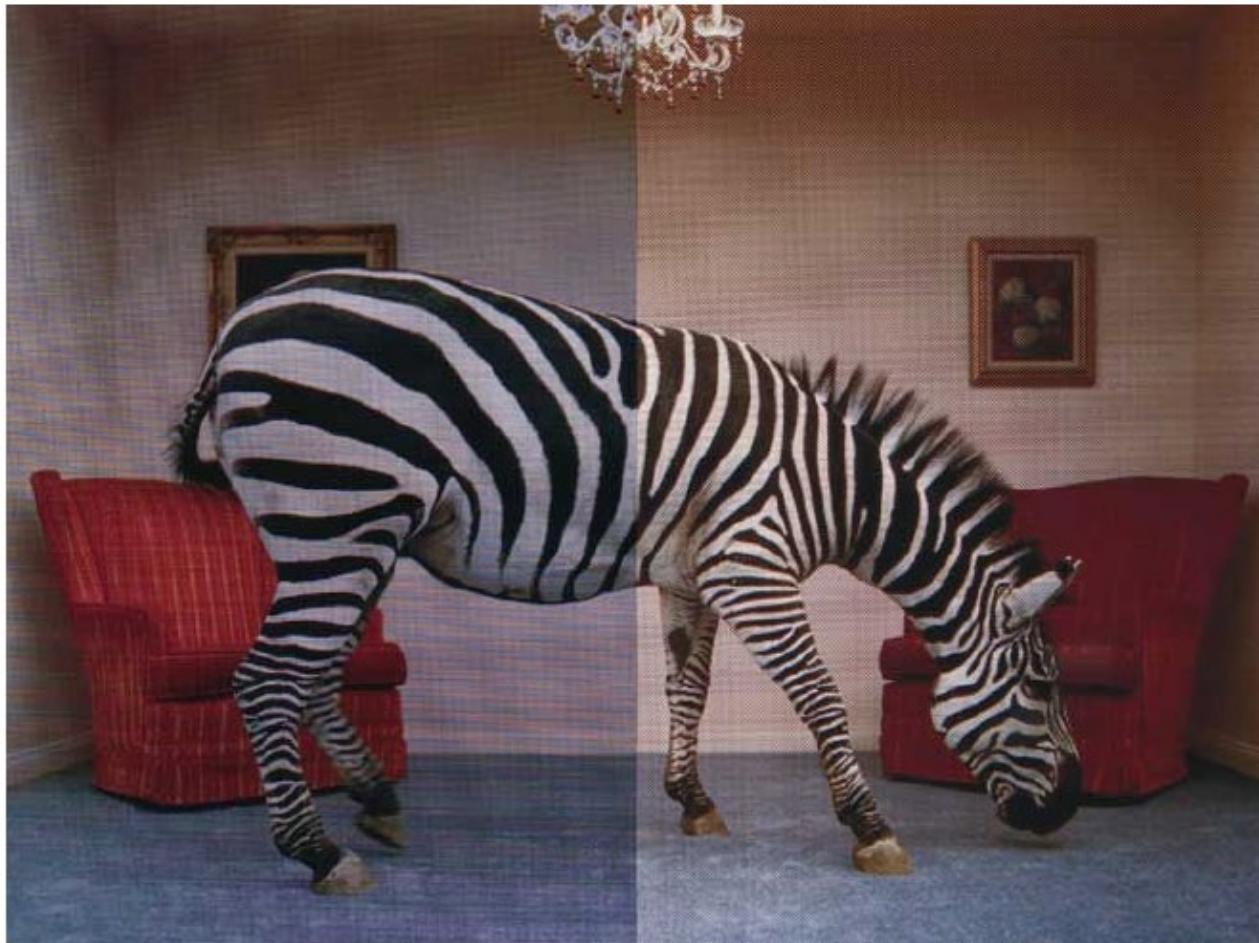
Possibili modelli di CFA



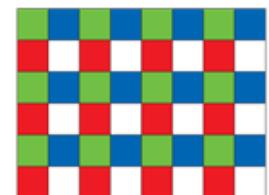


Possibili modelli di CFA





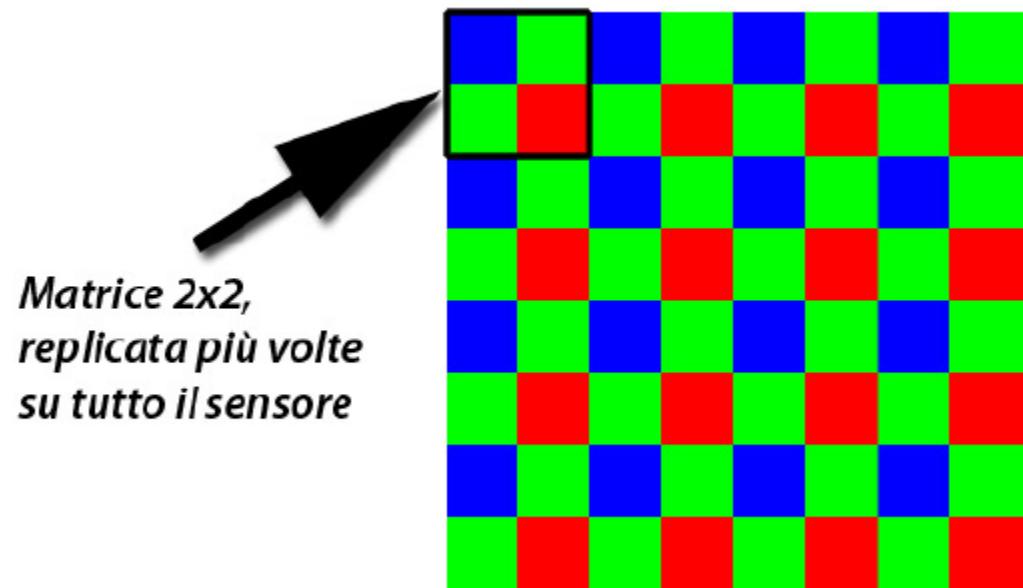
+ sharpening

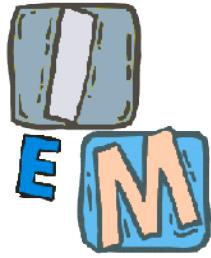




Qual è il migliore? Il Bayer Pattern

- Lo schema più utilizzato è il BAYER PATTERN. È stato proposto nel 1976 dal Bryce Bayer ed utilizzato dal 1980 in tutti i dispositivi elettronici.
- Esso presenta un rapporto 1:2:1 per R:G:B, dove i pixel verdi sono disposti sulle “diagonali”.
- Esso privilegia le misure nel canale verde perché è quello più importante per la percezione umana.
- Una immagine in Bayer Pattern è conservata nel formato “raw”.





U203

Problem:

Providing color in a ~~CCD~~ camera using photosensor array

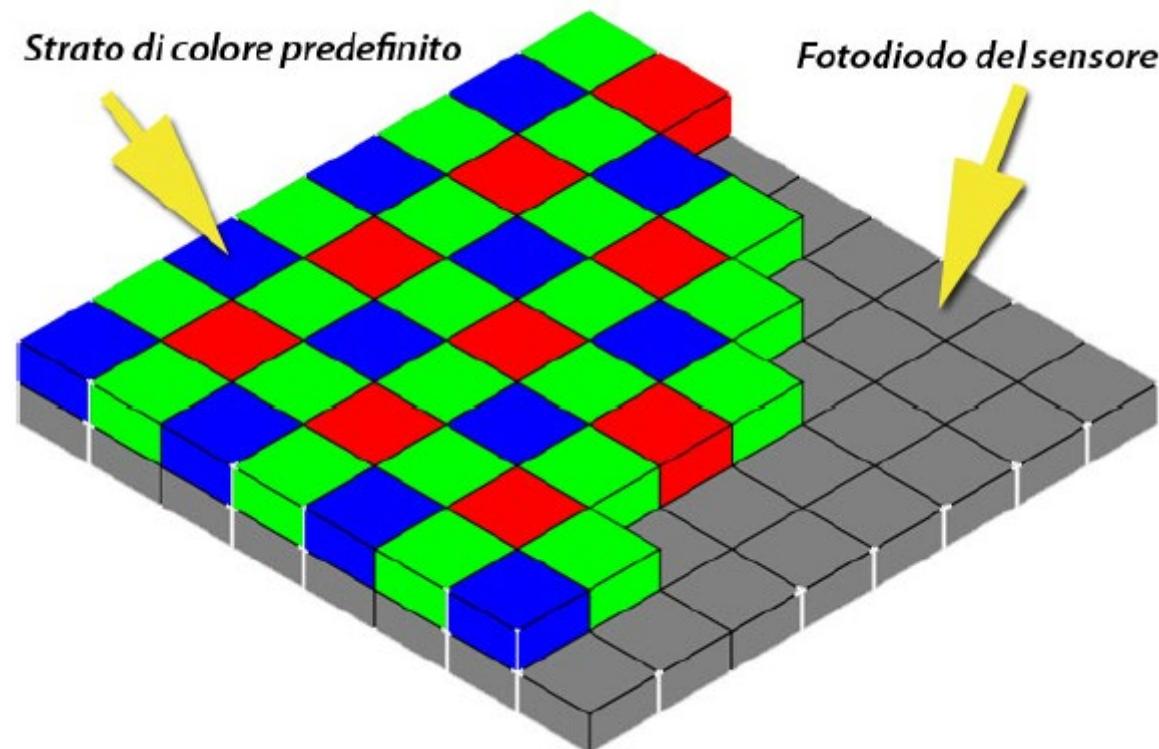
Suppose a camera uses an $m \times n$ array of photodetectors to record a picture. How shall color be recorded?

One way is to superimpose over the array of photosensors an array of filters or other optical system such that different elements record different colors. For example, we might use the following arrangement:



Each of the red, green, and blue records are sampled in regular arrays, with twice as many points for green, which is most important to sharpness. Such regular arrays are easy to filter to avoid evidence of sampling artifacts in final display.

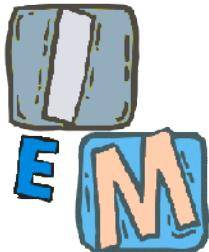






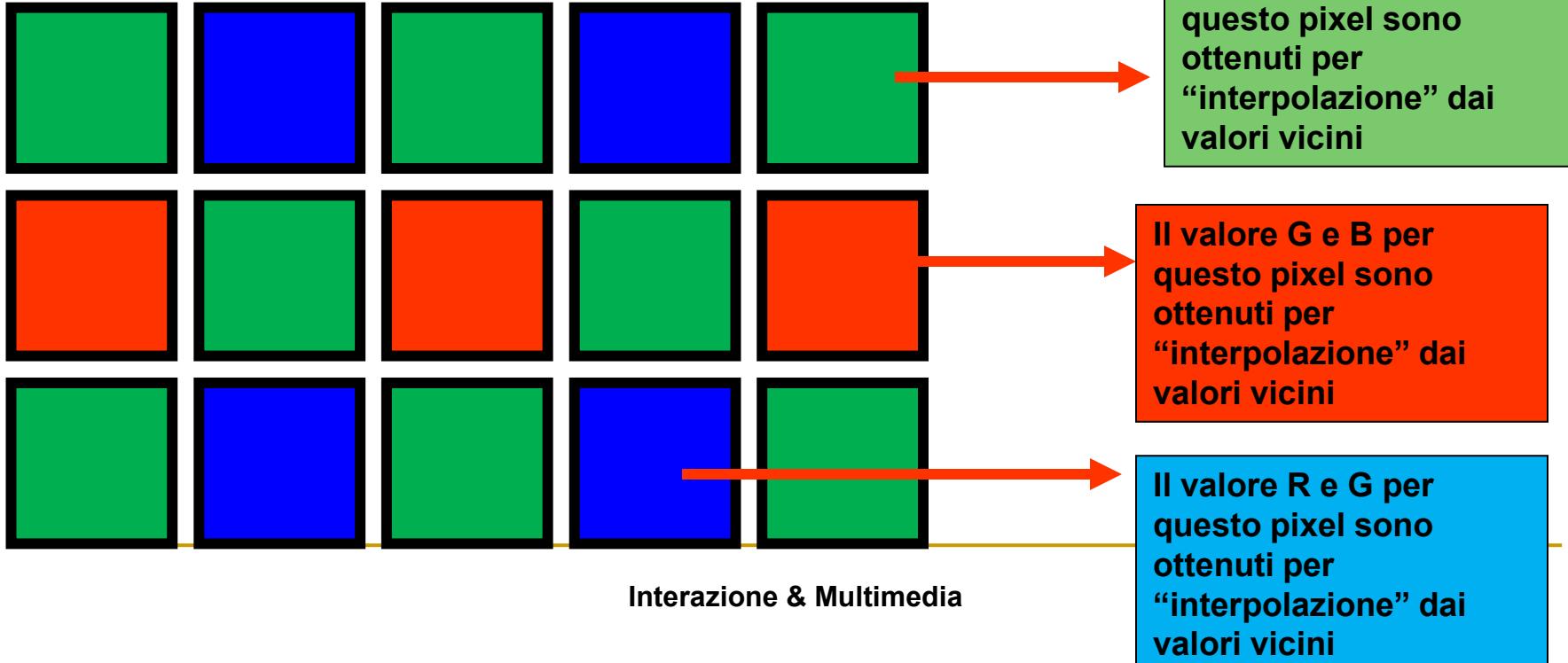
Formati proprietari Raw

- Canon: **CRW** (Canon RaW, estensione file: *.CR2);
- Epson: **ERW** (Epson RaW);
- Foveon: **X3F**.
- Fuji: **RAF** (RAw Fuji);
- Hasselblad: **3FR**.
- Kodak: **DCR** (Digital Camera Raw);
- Minolta: **MRW** (Minolta RaW);
- Nikon: **NEF** (Nikon Electronic Format);
- Olympus: **ORF** (Olympus Raw Format);
- Pentax: **PEF** (Pentax Electronic Format).
- Sony: **ARW** (Alpha RaW).
- Samsung: **SRW** (Samsung RaW)



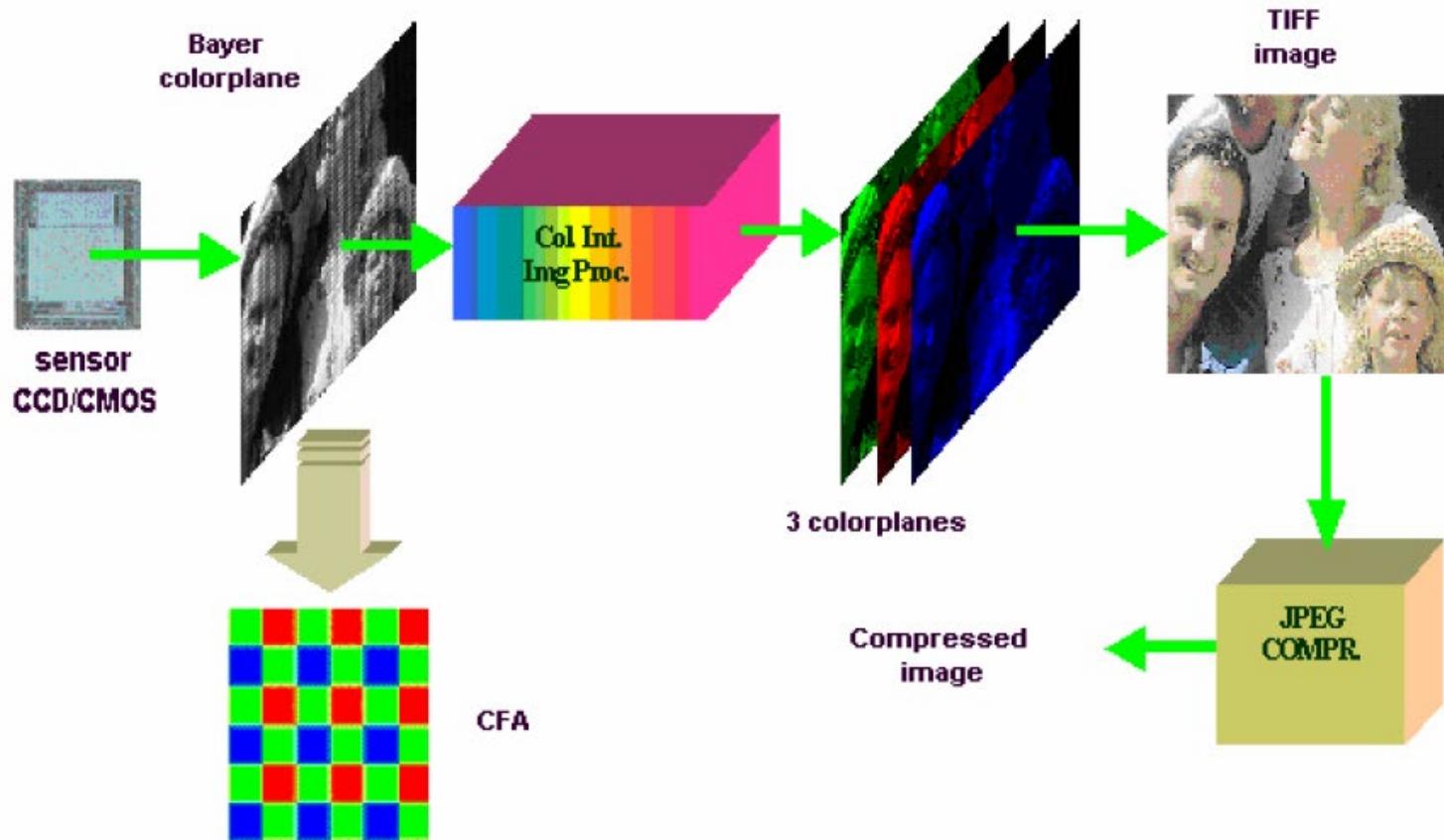
Bayer Pattern

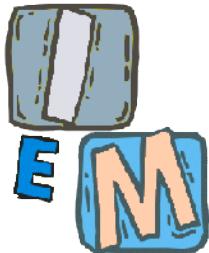
Se per ogni pixel, si memorizza solo una componente di colore, tutte le altre dovranno essere ottenute per interpolazione dai pixel vicini.





Più dettagliatamente





Altri modelli di CFA in fase di sperimentazione (da un paper scientifico)

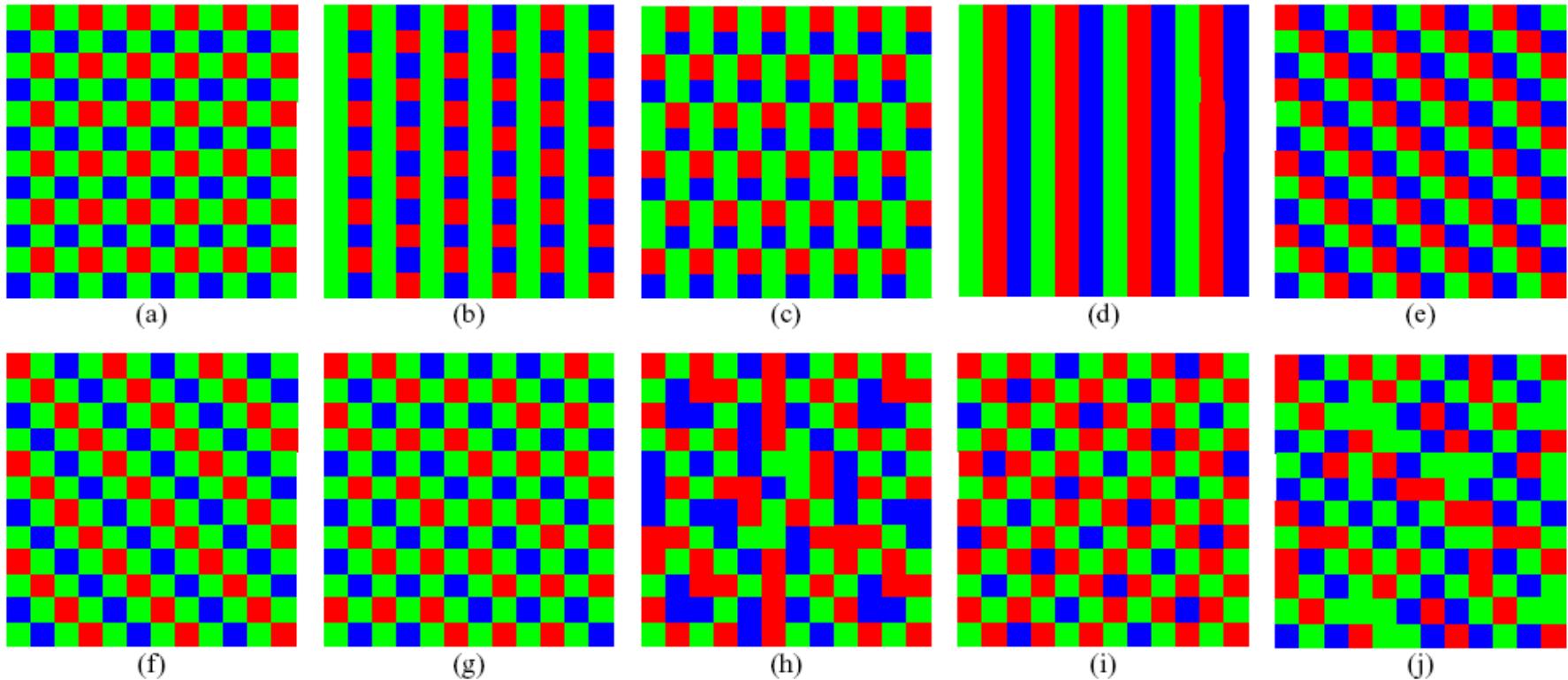


Fig. 2. RGB CFAs: (a) Bayer CFA [10], (b) Yamanaka CFA [11], (c) proposed here CFA, (d) vertical stripe CFA [12], (e) diagonal stripe CFA [12], (f) modified Bayer CFA [12], (g-i) pseudo-random CFA [12], (j) HVS-based CFA [13].



Color Interpolation

- La matrice di dati rilasciati dal sensore può essere visualizzata come immagine. In questo caso si vedrebbe una immagine in scala di grigi.
- L'aver conservato solo una componente della terna del colore comporta la visione dell'immagine come se fosse composta da un mosaico.
- Per ottenere una immagine a colori occorre procedere con un algoritmo di color interpolation che ricava i valori mancanti per ogni singola terna dai dati dell'intorno.
- Poichè dall'immagine a colori sparisce l'effetto a mosaico, l'algoritmo di color interpolation viene anche chiamato algoritmo di «demosaicking».



Bayer pattern

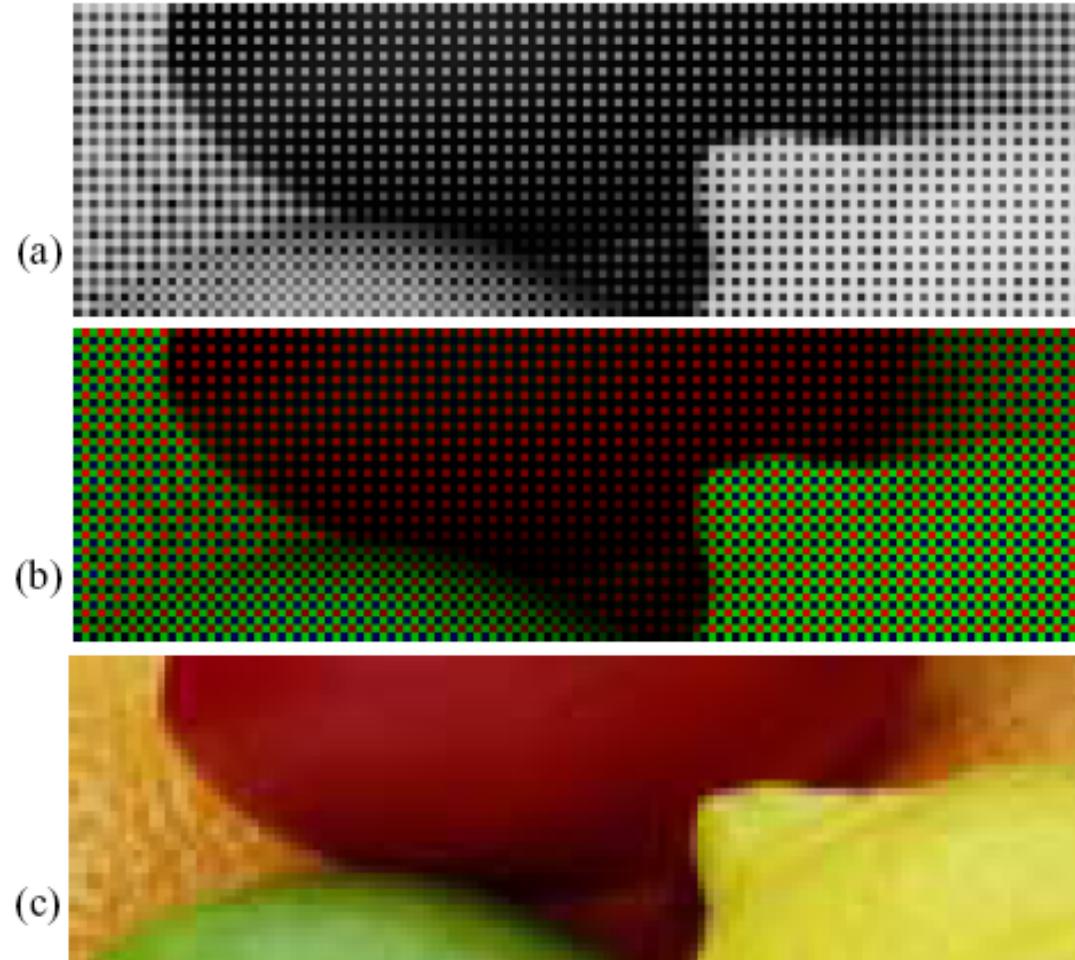
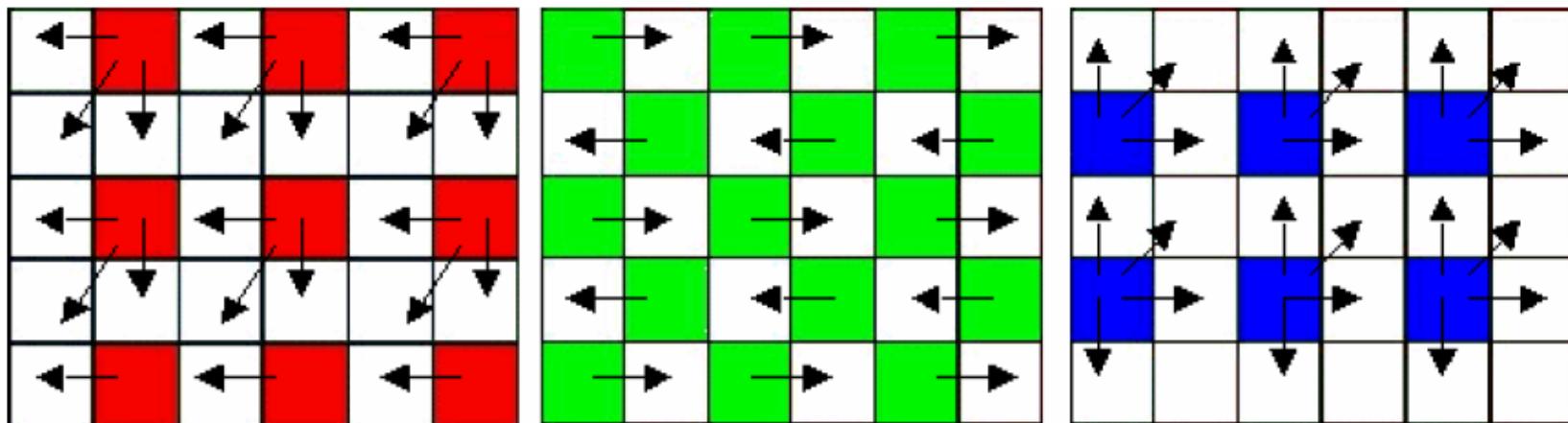


Fig. 1. Single-sensor imaging: (a) mosaic-like gray-scale CFA image, (b) color variant of the CFA image, (c) demosaicked full-color image.



Color interpolation: replication

- Per ogni singolo pixel gli elementi mancanti della terna vengono copiati dall'intorno.
- Questa tecnica viene anche chiamata «**Nearest-neighbor interpolation**»



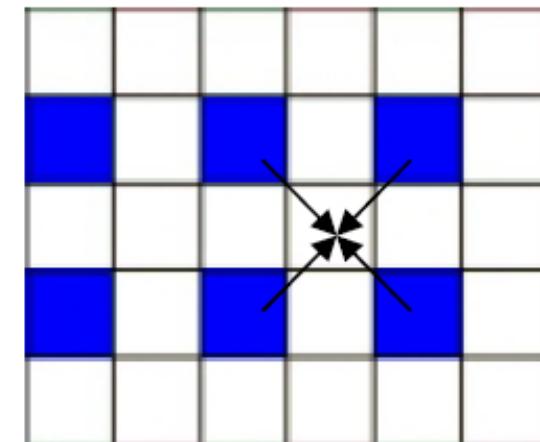
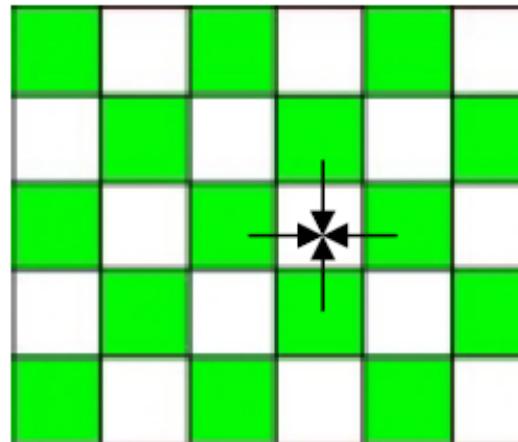
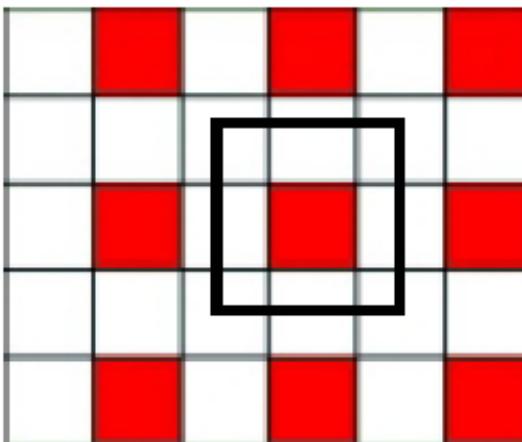


Color interpolation: bilinear

abbiamo l'informazione di R e manca G e B

- Nella matrice di R non si deve fare nulla.
- In G occorre ricavare i dati da un intorno selezionando i 4 valori rilasciati dal sensore.
- In B occorre ricavare i dati da un intorno selezionando i 4 valori rilasciati dal sensore.

Red position:

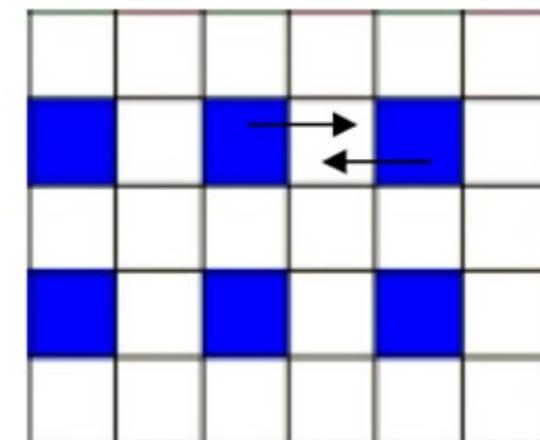
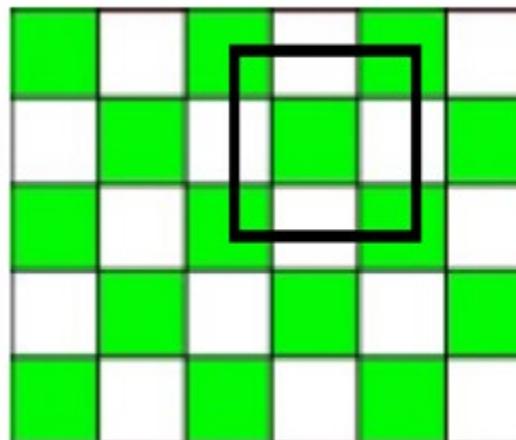
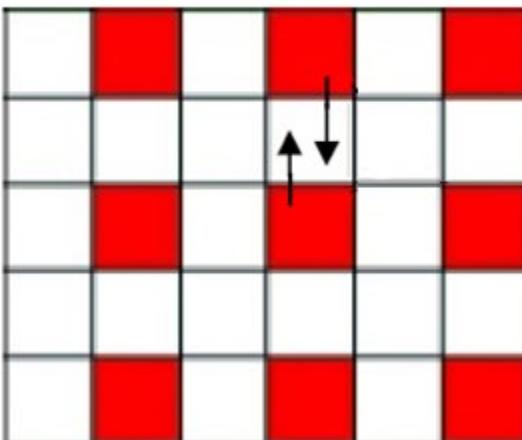




Color interpolation: bilinear abbiamo l'informazione di G e manca R e B

- Nella matrice di G non si deve fare nulla.
- In R occorre ricavare i dati da un intorno selezionando i 2 valori rilasciati dal sensore.
- In B occorre ricavare i dati da un intorno selezionando i 2 valori rilasciati dal sensore.

Green position:



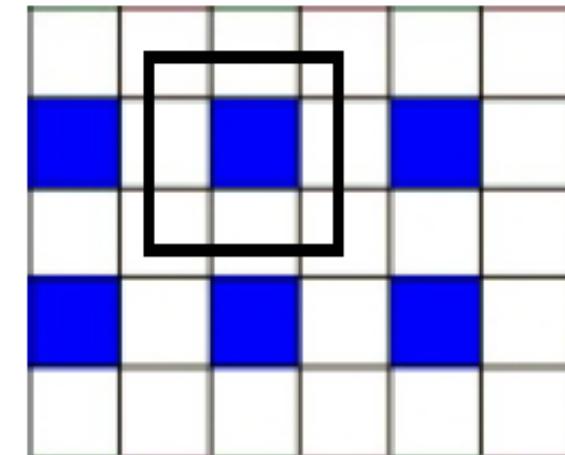
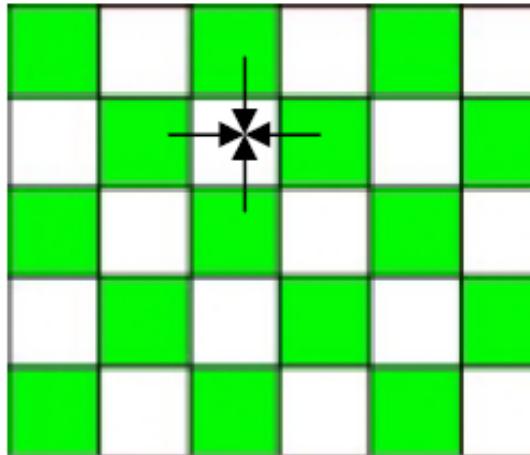
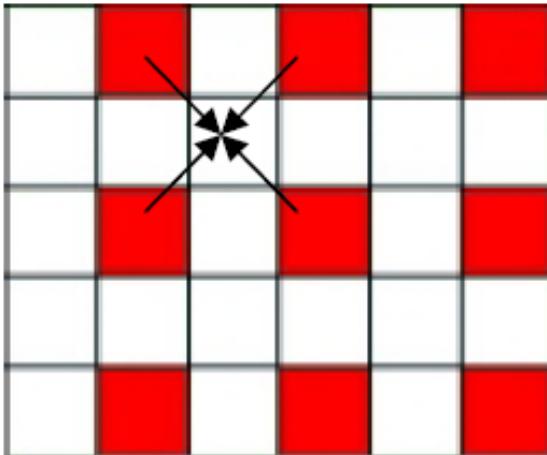


Color interpolation: bilinear

abbiamo l'informazione di B e manca R e G

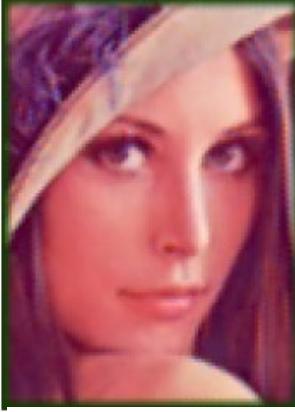
- Nella matrice di B non si deve fare nulla.
- In R occorre ricavare i dati da un intorno selezionando i 4 valori rilasciati dal sensore.
- In G occorre ricavare i dati da un intorno selezionando i 4 valori rilasciati dal sensore.

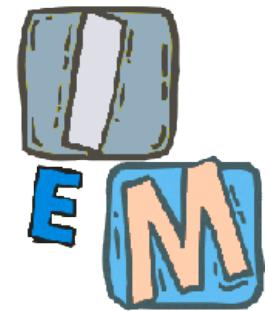
Blue position:





Risultati ottenuti usando diverse color interpolation

Ideale	Bayer Pattern	Replication
		
Bilineare	Bicubico	Altro



La risoluzione



La risoluzione

Definizione: si dice **risoluzione** il numero di pixel per unità di misura.

Si può misurare in pixel al centimetro, o in dots per inch (dpi).

Può anche essere espressa come il numero di pixel su tutta l'immagine (es. 16- Megapixel).



La risoluzione

- La risoluzione indica il grado di qualità di un'immagine.
- Lo schermo di un computer non può mostrare linee o disegni, ma soltanto punti; se questi sono sufficientemente piccoli, tali da essere più piccoli della risoluzione percepita dall'occhio umano, l'osservatore ha l'impressione di vedere linee anziché punti allineati, e disegni anziché ammassi di puntini distinti.



Il concetto di risoluzione è relativo e va considerato con attenzione a seconda di differenti situazioni:

- **Risoluzione dell'apparecchiatura di ripresa**
- **Risoluzione dell'apparecchiatura di resa**

La risoluzione equivalente di una normale pellicola fotografica è di 3-4.000 dpi.



Risoluzione dell'apparecchiatura di ripresa

Si contano quanti sensori ci sono per unità lineare di misura.

SCANNER: fino a 6000 dpi e oltre

FOTOCAMERE: numero di sensori presenti sul circuito di ripresa. Si misura in *MEGAPIXEL*.



Risoluzione dell'apparecchiatura di resa

Si contano quanti sensori ci sono per unità lineare di misura.

Stampanti: fino a 3000 dpi e oltre

Schermi: numero di elementi sullo schermo per unità di misura.
Tipicamente 72 dpi.



Risoluzione di stampe

- Quotidiano: 75 dpi;
- Riviste: 133 dpi;
- Brochure: 175 dpi;
- Libri fotografici: 2400 dpi.



Il rosone ha il diametro di 2m



**L'immagine si compone di 200 pixel di larghezza.
Si ha una risoluzione "reale" di 1 dot per 1 cm.**

Sono richiesti $200 \times 200 \times 24$ bit = 960 000 bit per la memorizzazione.

**L'immagine si compone di 100 pixel di larghezza.
Si ha una risoluzione "reale" di 1 dot per 2 cm.**

Sono richiesti $100 \times 100 \times 24$ bit = 240 000 bit per la memorizzazione.

**L'immagine si compone di 10 pixel di larghezza.
Si ha una risoluzione "reale" di 1 dot per 20 cm.
Sono richiesti $10 \times 10 \times 24$ bit = 2400 bit per la memorizzazione.**



Risoluzione (2)

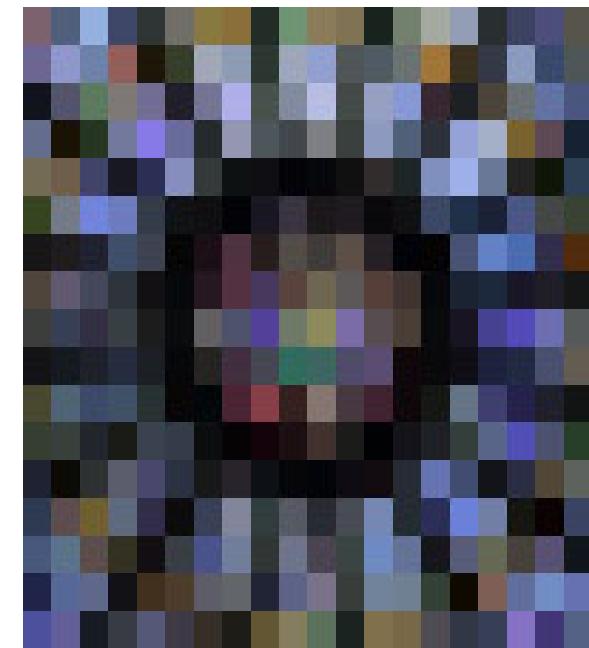
Per meglio comprendere il significato della risoluzione simuliamo pixel di varie dimensioni:



1 pixel per cm



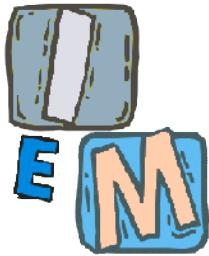
1/2 pixel per cm



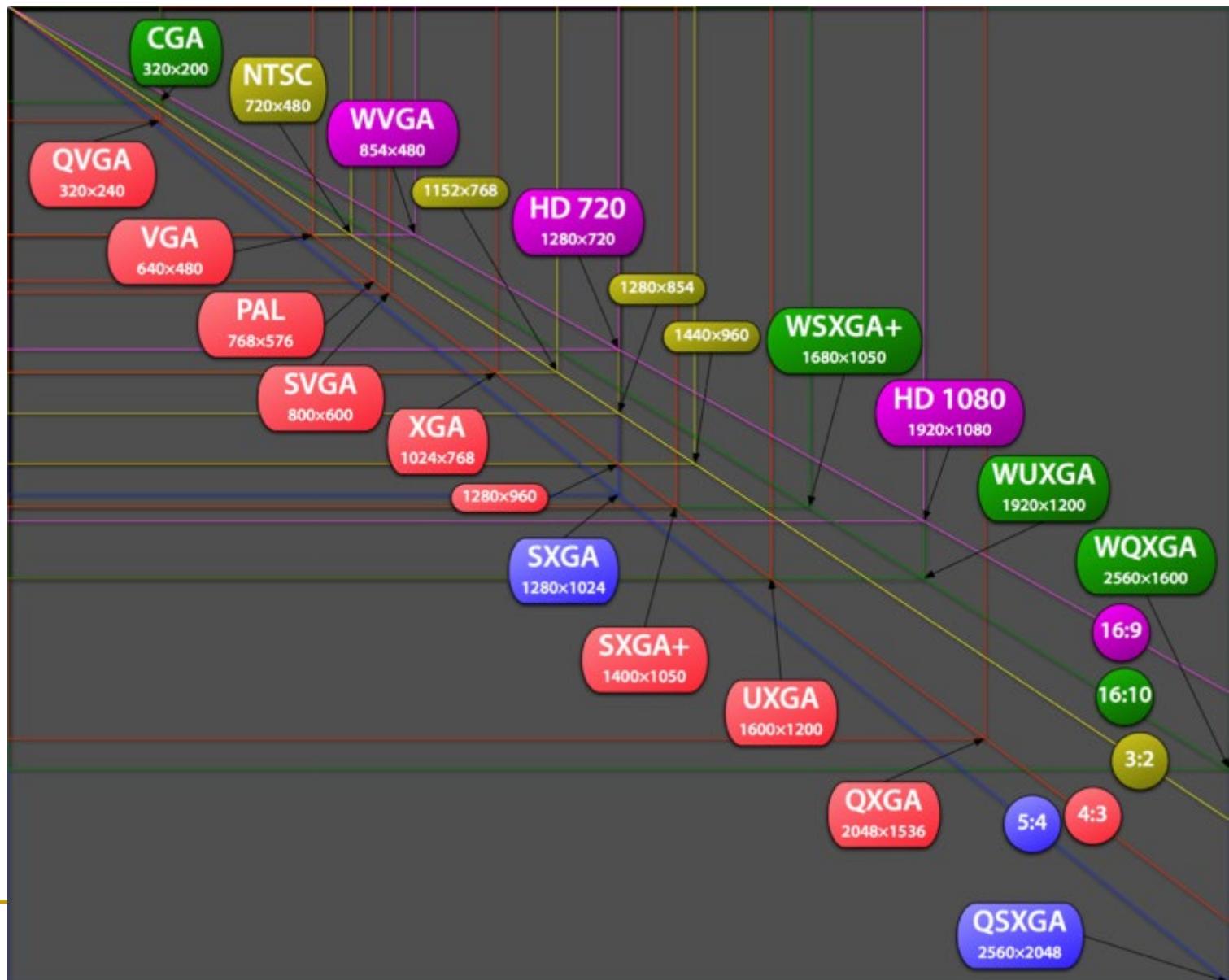
1/20 pixel per cm



FIGURE 2.20 Typical effects of reducing spatial resolution. Images shown at: (a) 1250 dpi, (b) 300 dpi, (c) 150 dpi, and (d) 72 dpi. The thin black borders were added for clarity. They are not part of the data.



- Immagini nate con una certa risoluzione devono essere visualizzate con la stessa risoluzione per avere il massimo della resa.
- Le principali dimensioni standard e i loro nomi sono riportati nell'immagine che segue (wikipedia).



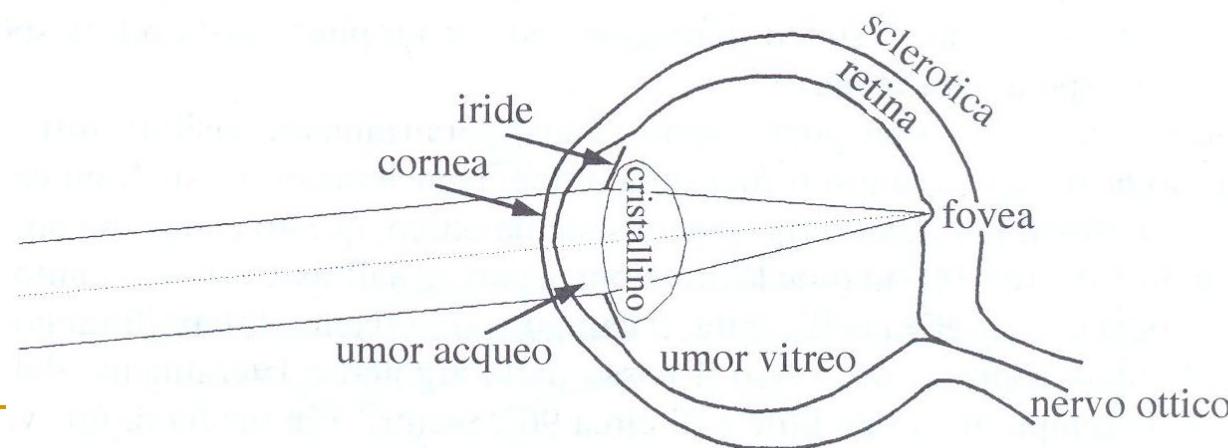


Sigla	Definizione	Risoluzione	Rapporto
Quarter QVGA	QQVGA	160 x 120	4:3
CGA o Quarter VGA	CGA / QVGA	320 x 240	4:3
Half VGA	HVGA	640 x 240	8:3
Monochrome Display Adapter	MDA	720 x 350	
Enhanced Graphics Array	EGA	640 x 350	
Video Graphics Array	VGA	640 x 480	4:3
Super VGA	SVGA	800 x 600	4:3
Quad VGA	QVGA	1280 x 960	4:3
eXtended Graphics Array	XGA	1024 x 768	4:3
Super XGA	SXGA	1280 x 1024	5:4
Super XGA Plus	SXGA+	1400 x 1050	4:3
Ultra XGA	UXGA	1600 x 1200	4:3
Quad XGA	QXGA	2048 x 1536	4:3
Quad Ultra XGA	QUXGA	3200 x 2400	4:3
(*) Wide XGA	WXGA	1366 x 768	~16:9
(*) Wide XGA	WXGA	1280 x 800	16:10
(*) Wide XGA	WXGA	1280 x 720	16:9
Wide XGA Plus	WXGA+	1440 x 900	16:10
Wide Super XGA Plus	WSXGA+	1680 x 1050	16:10
Wide Ultra XGA	WUXGA	1920 x 1200	16:10



L'occhio

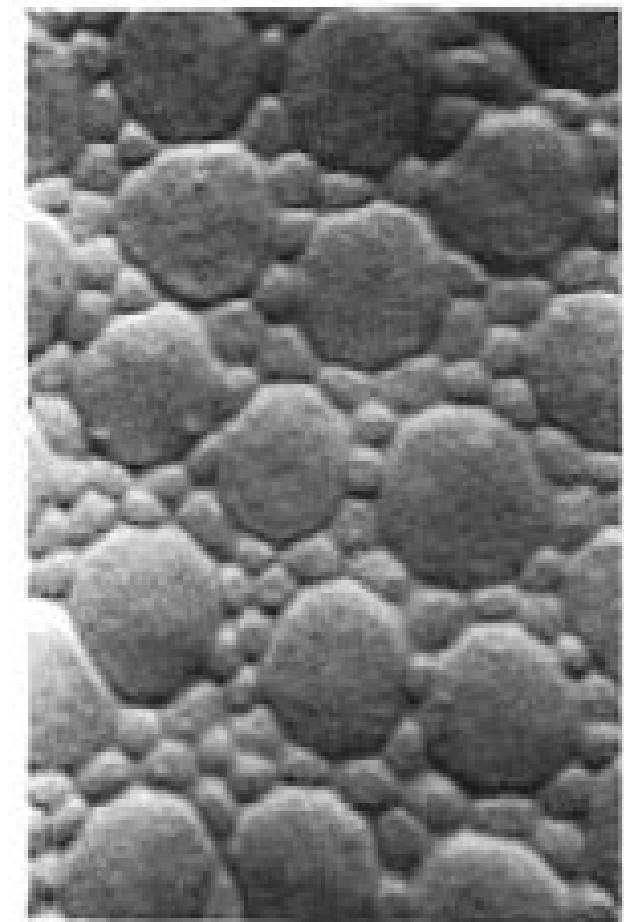
- A noi interessa molto la RETINA.
- È una membrana che ricopre la parte posteriore dell'occhio
- È formata da coni e bastoncelli che sono i fotorecettori.





I coni

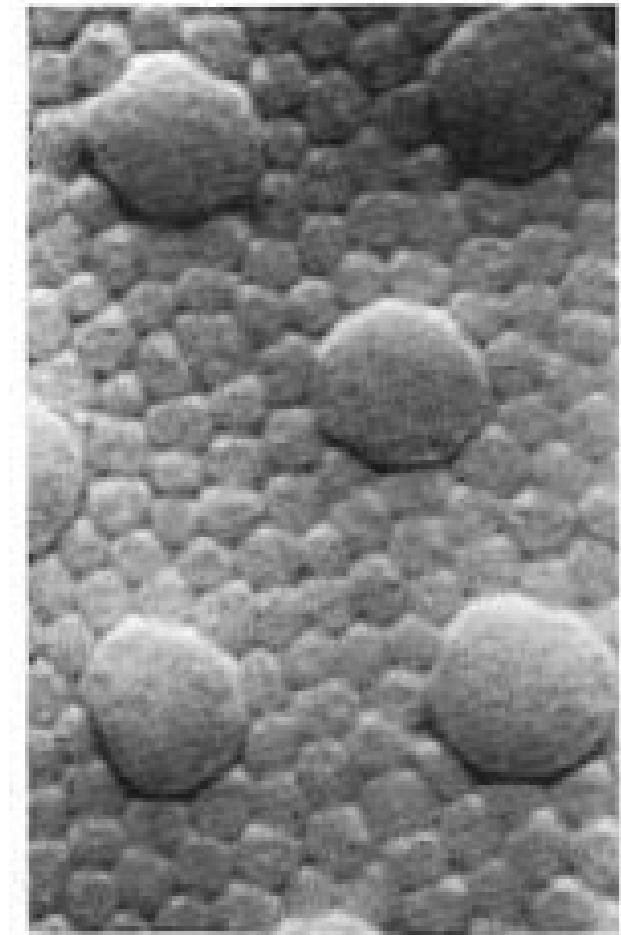
- I coni sono circa 6/7 milioni e sono concentrati in una zona centrale della retina, la fovea.
- Sono fortemente sensibili al colore ed ogni cono è collegato ad un nervo ottico.
- I coni sono responsabili della vista FOTOTICA o policroma.





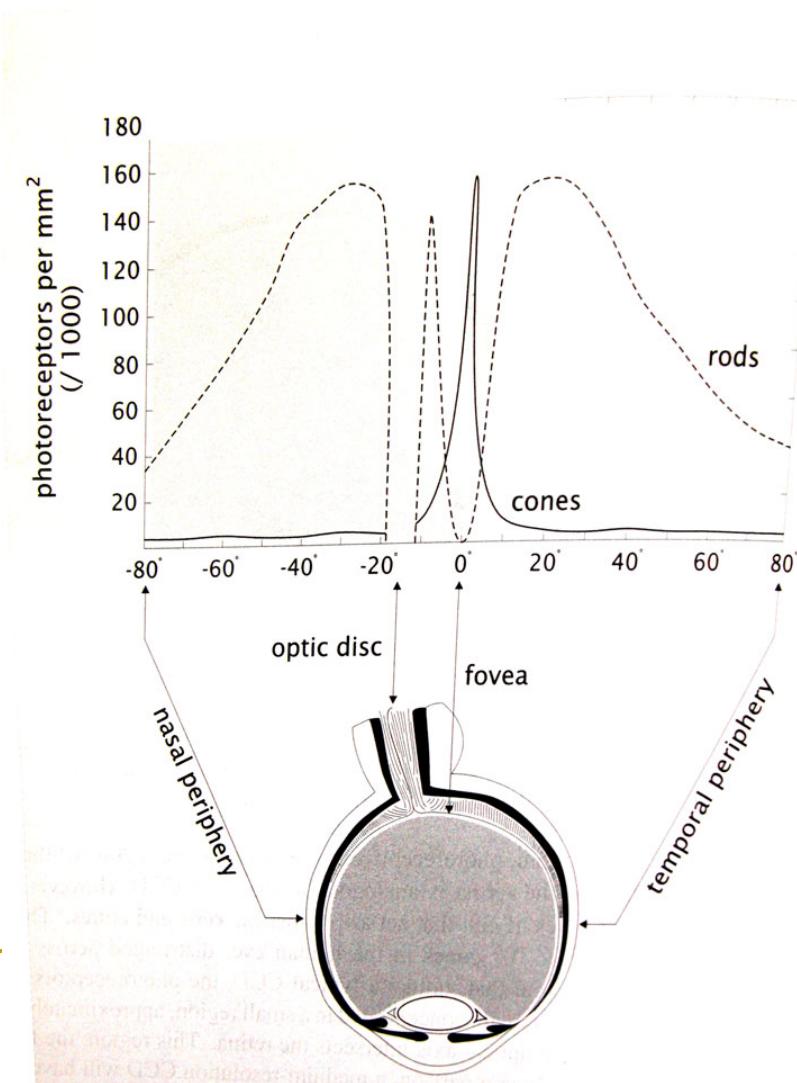
I bastoncelli

- 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.





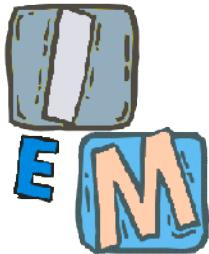
Disposizione dei sensori sulla retina



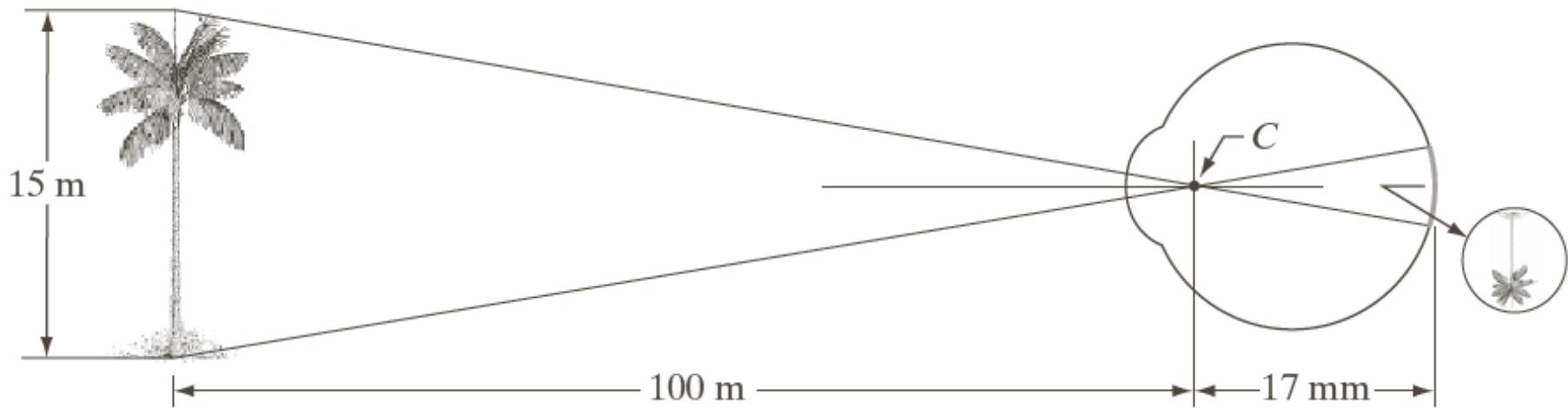


Da ricordare!

- 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^2
- 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



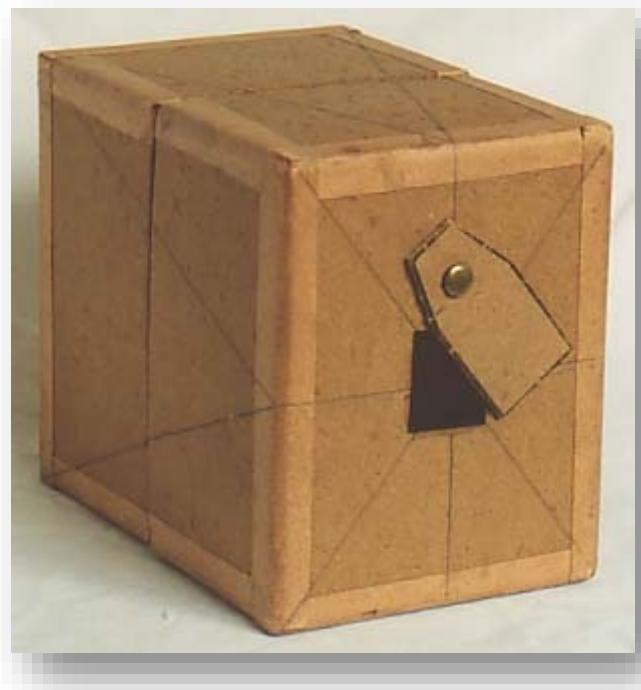


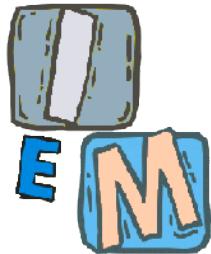
Come si forma l'immagine nell'occhio?

- 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)!

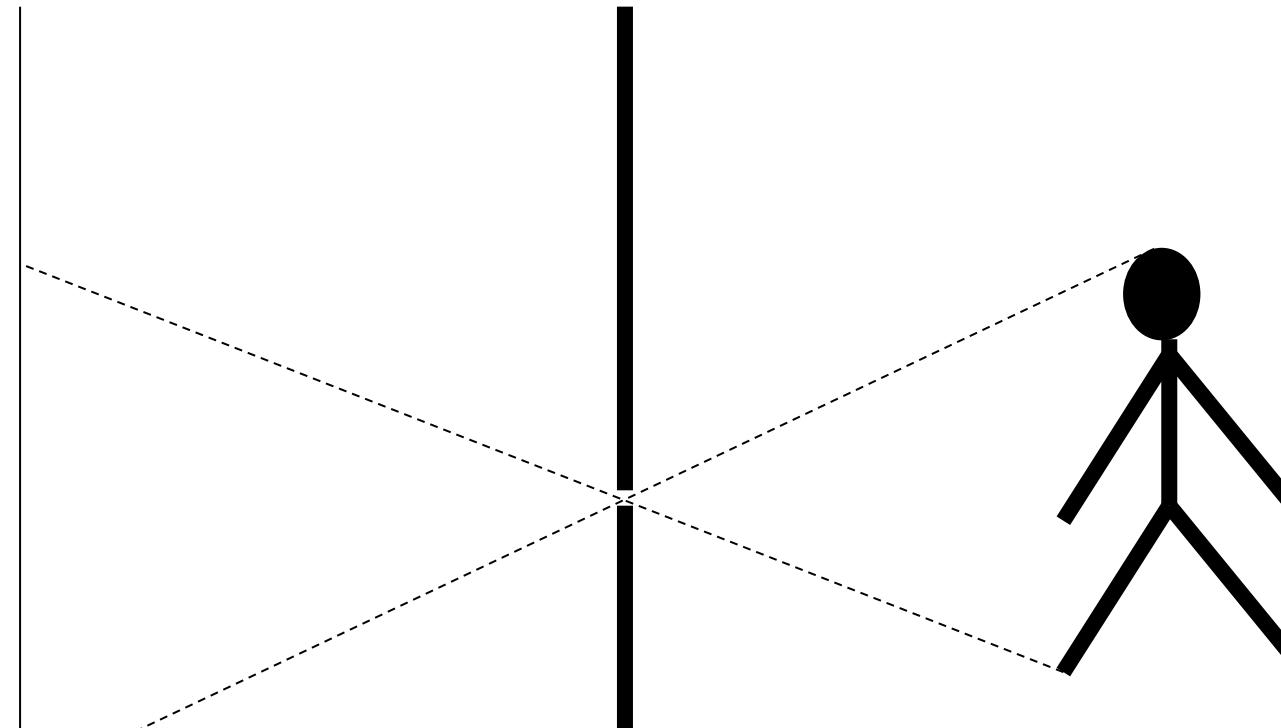


Il pinhole





In sezione



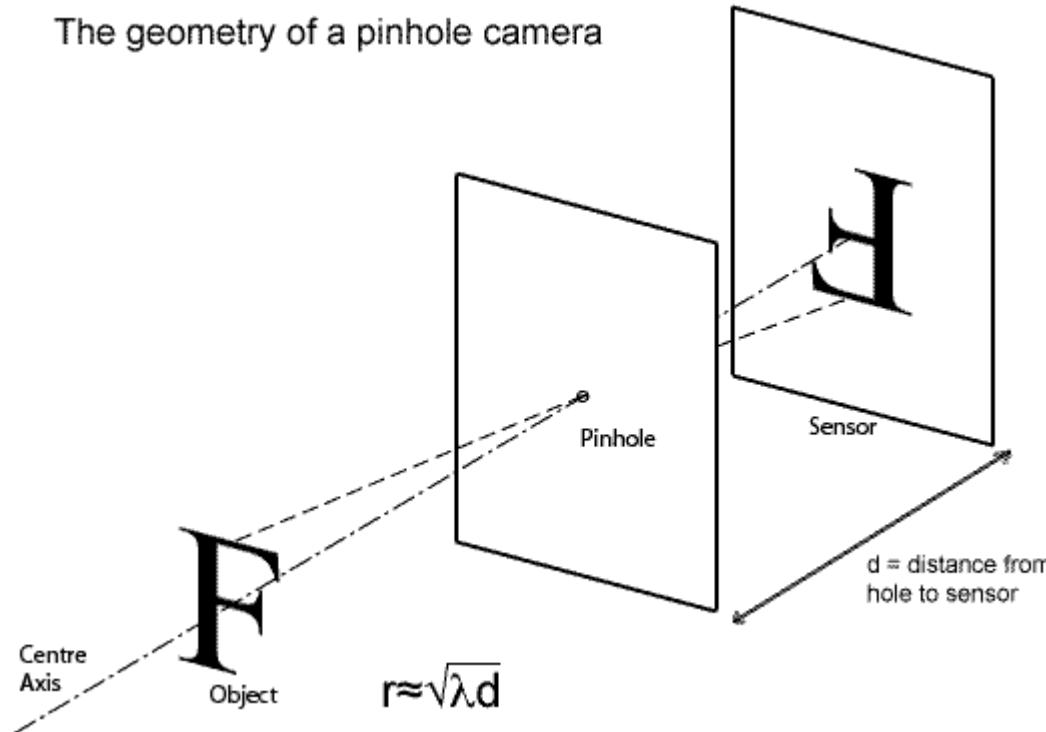
scena

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.

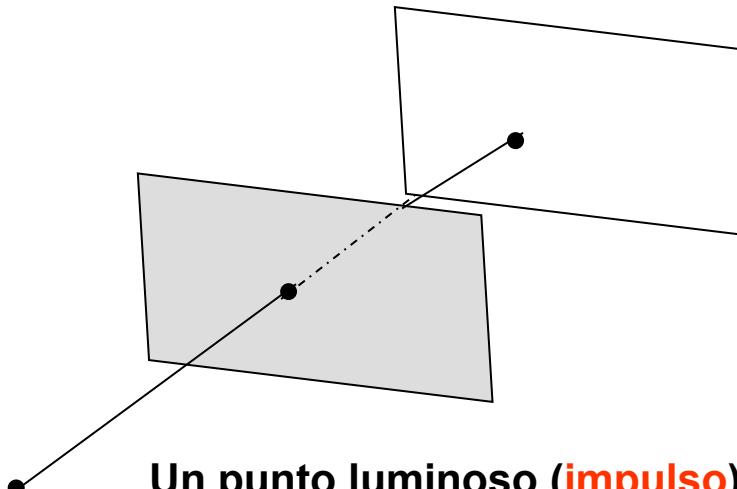


Pinhole ideale e reale

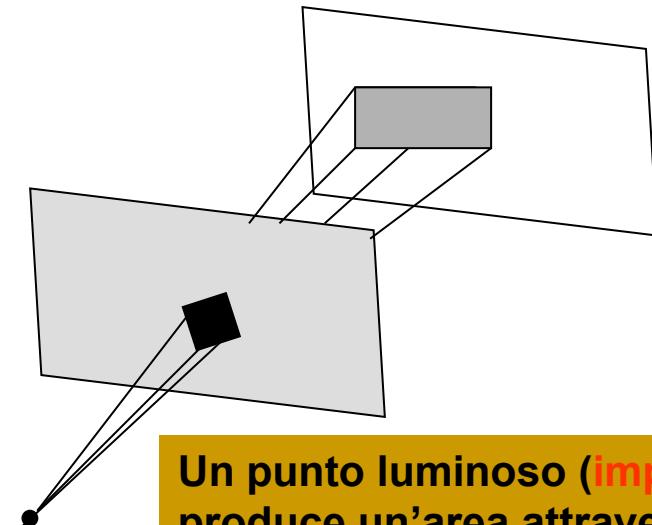
Un foro puntiforme infinitesimo (quindi senza estensione) non fa passare un numero sufficiente di fotoni per “attivare” i sensori.

Un foro puntiforme troppo piccolo genera fenomeni di diffrazione.

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



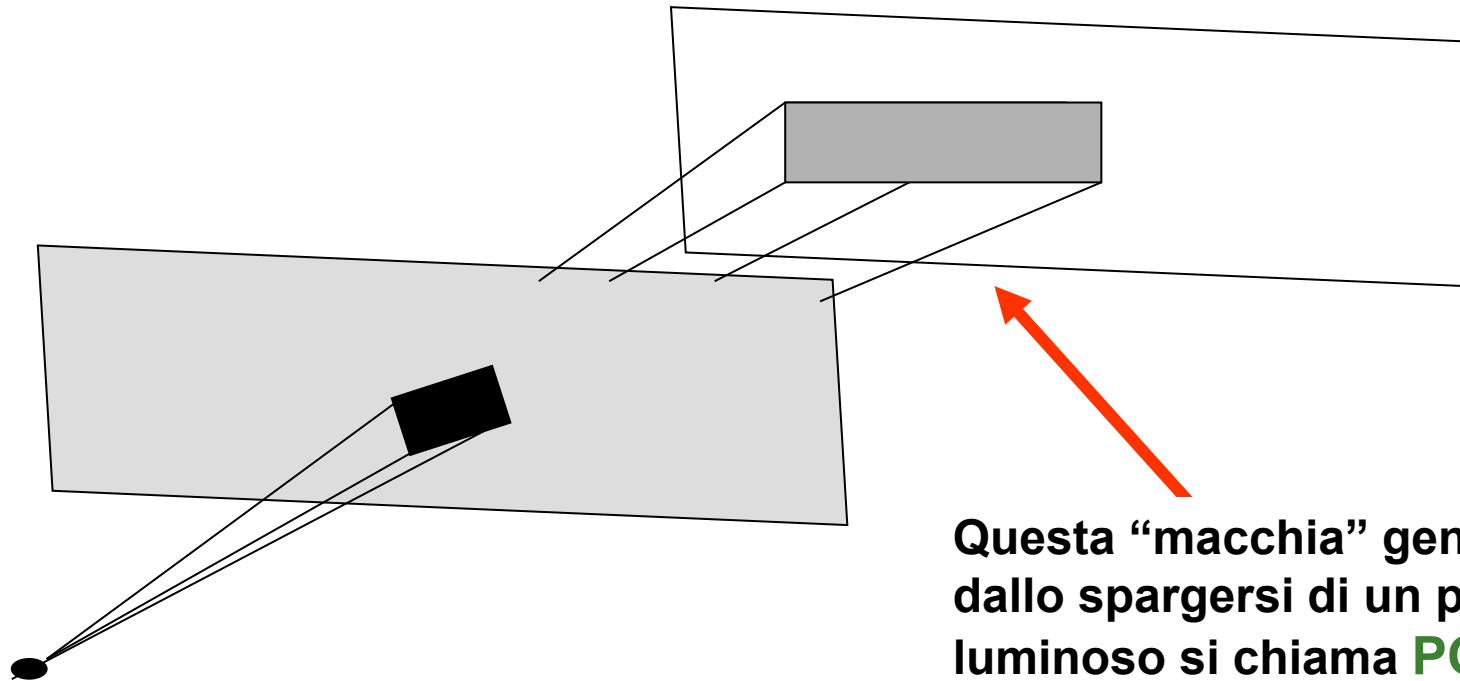
**Un punto luminoso (impulso)
produce un punto se passa
attraverso un pinhole ideale**



**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.

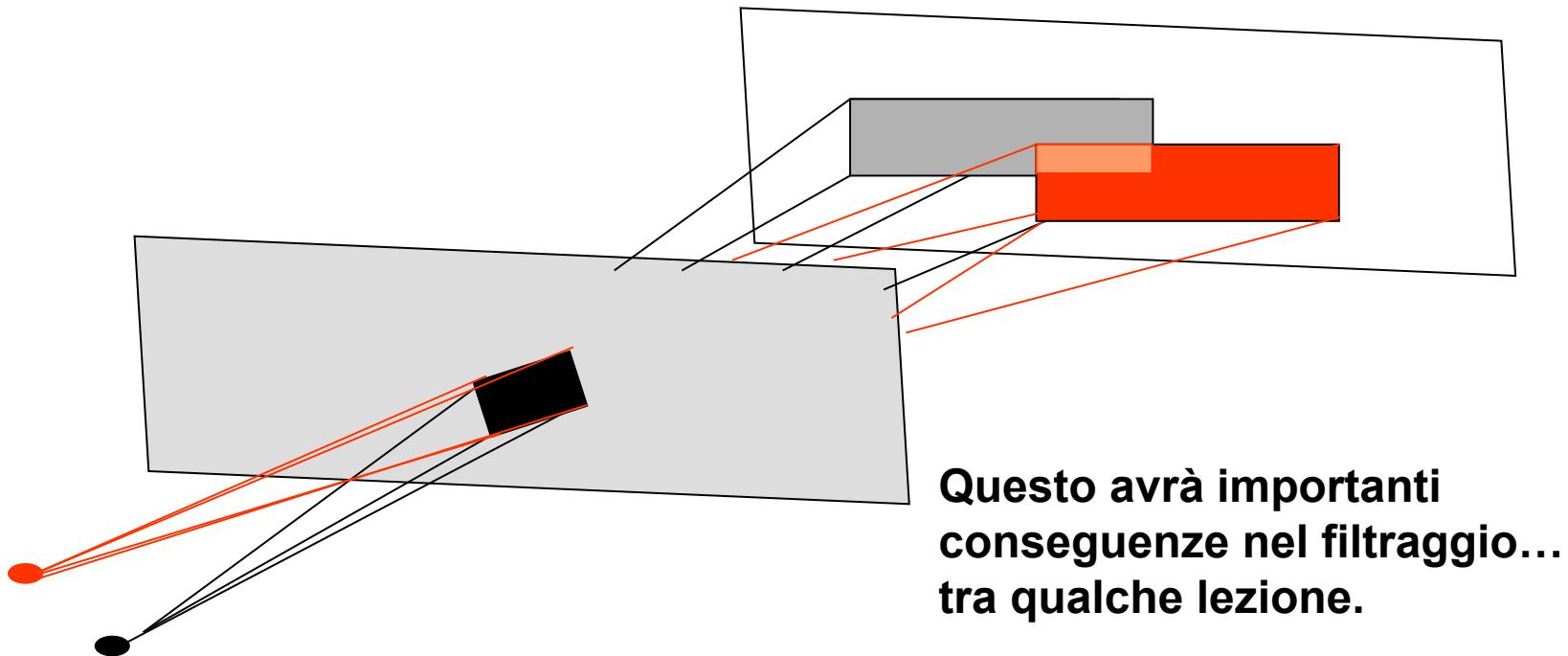


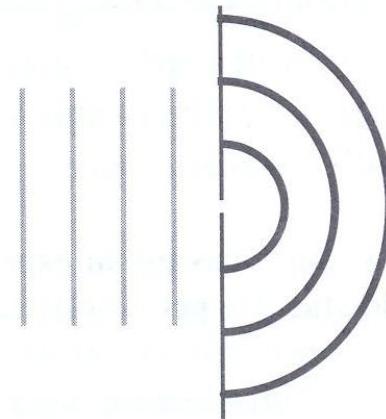
Questa “macchia” generata dallo spargersi di un punto luminoso si chiama **POINT SPREAD FUNCTION** del sistema di acquisizione di immagini



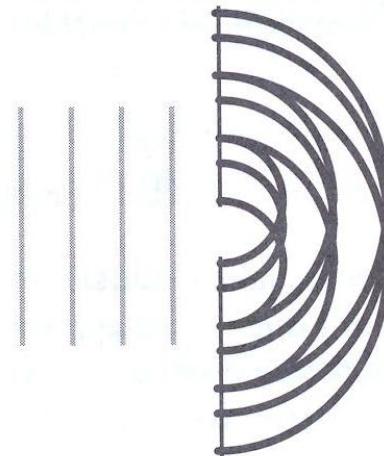
Principio di sovrapposizione

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

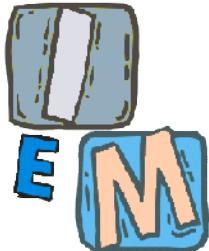




Apertura infinitesima



Apertura reale



Lenti sottili

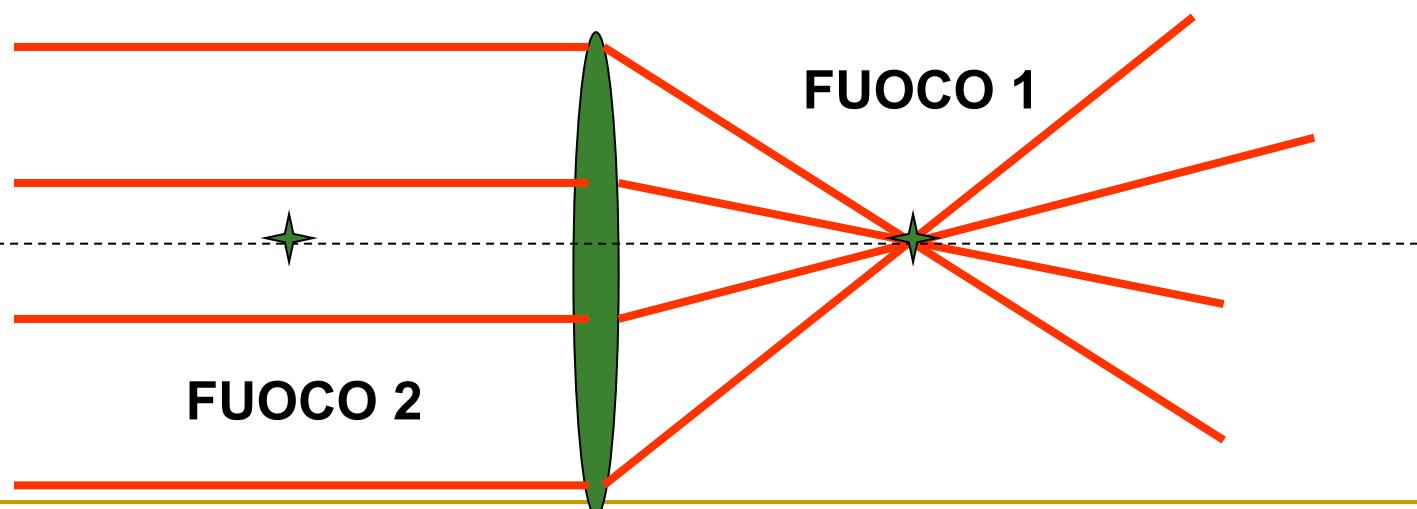
- In pratica i forellini sono inadeguati: raccolgono troppe poche radiazioni per consentire ai sensori misurazioni precise.
- Sin dal *rinascimento* si è diffuso, probabilmente osservando la rifrazione attraverso gocce d'acqua o particelle di ghiaccio, l'uso di lenti di vetro con forma lenticolare il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

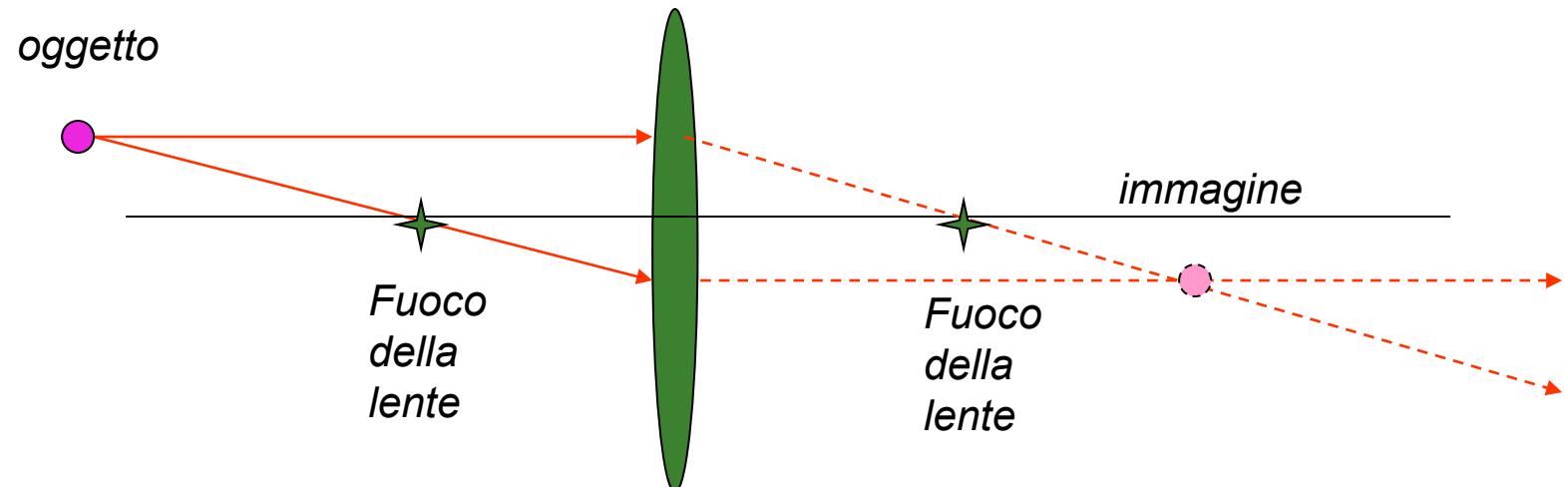


Definizione geometrica

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.

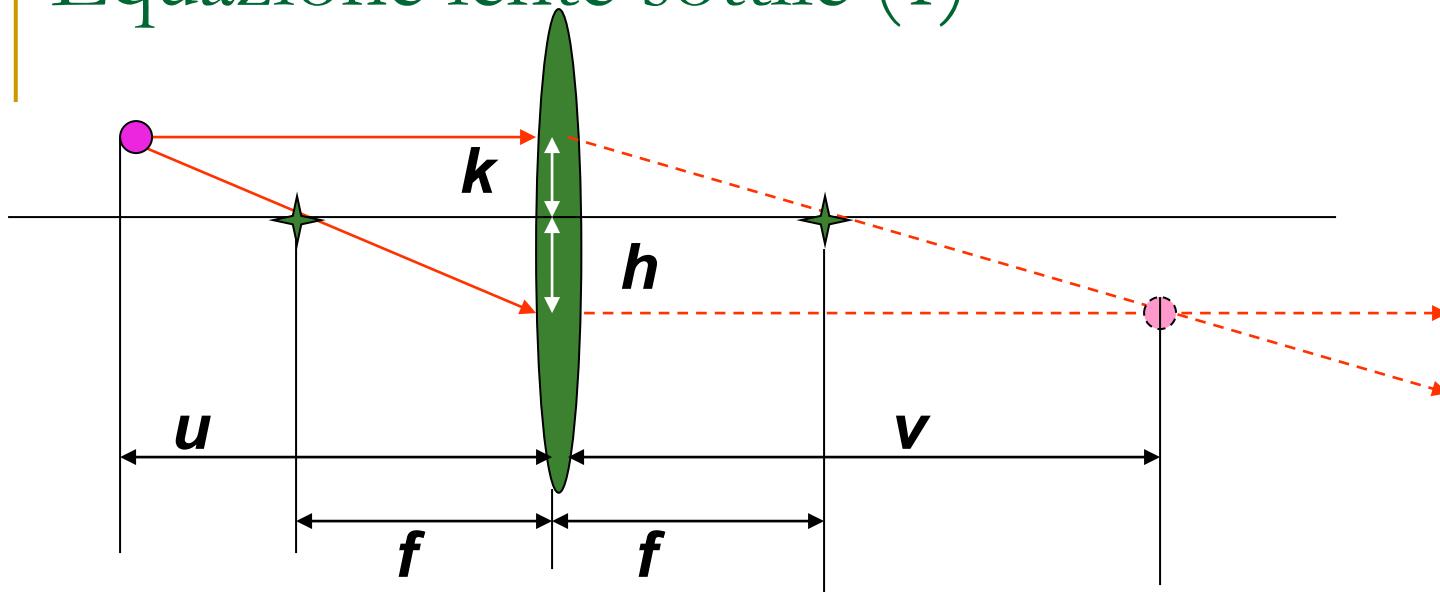




- Un oggetto puntiforme, emette raggi luminosi in ogni direzione, solo uno è parallelo all'asse ottico e la lente lo farà passare per il fuoco.
- Solo uno passa per il fuoco e la lente lo farà passare in un raggio parallelo alla lente.
- Il punto in cui i due raggi si incontrano è il punto di formazione 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.**

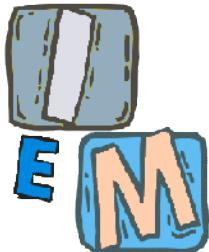


Equazione lente sottile (2)

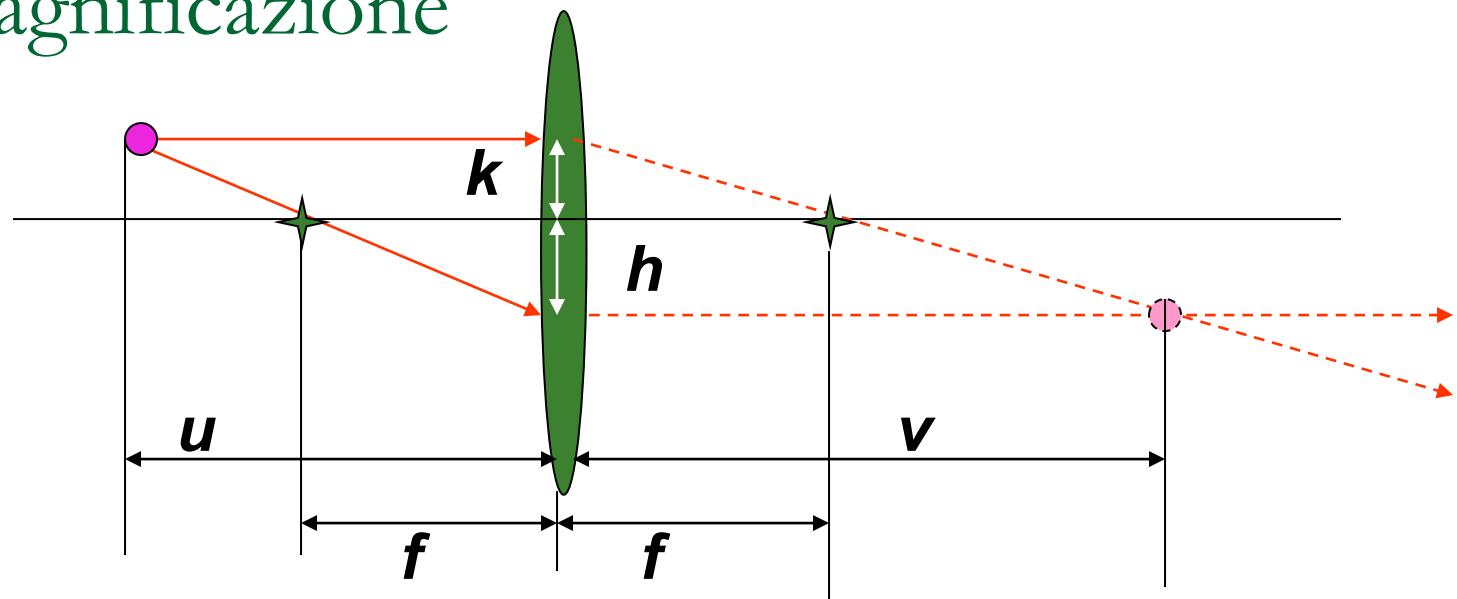
$$1/u + 1/v = 1/f$$

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.

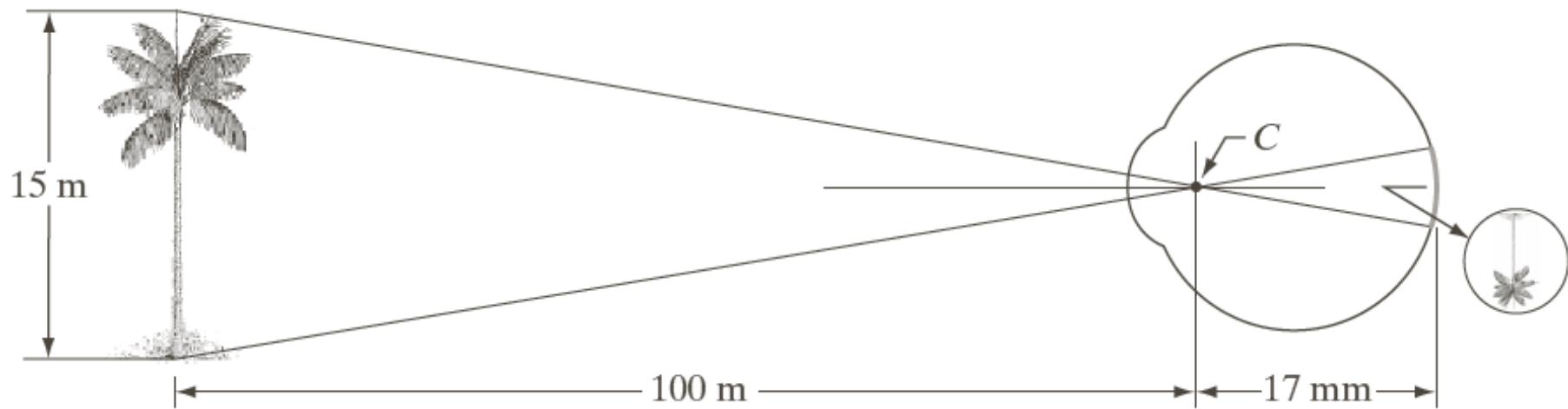


Magnificazione



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 **$f=um/(m+1)$** .



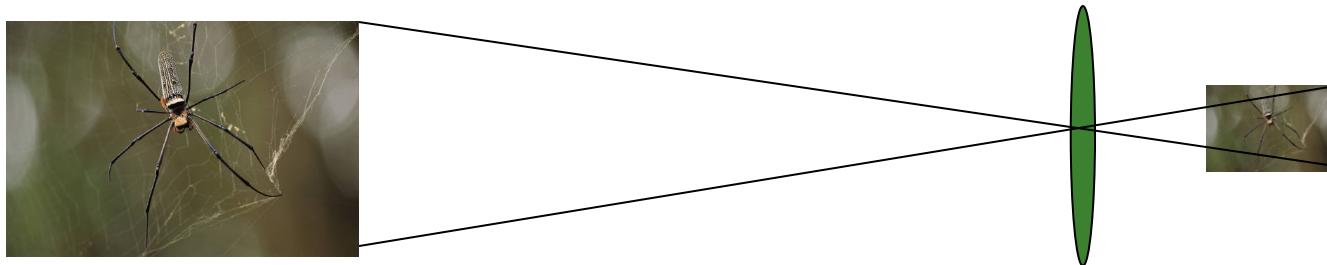
- Sempre per lo stesso principio, si ha che l'altezza h dell'immagine sulla retina è:
 $15/100 = h/17$ e cioè $h = 2,55$ mm



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).



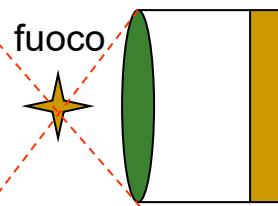
Esempio di magnificazione

- **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 $f =5*1/2 = 2.5\text{ cm}$.



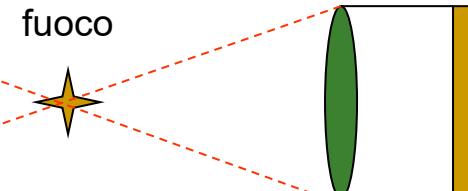
Aampiezza di campo e focale

Focale piccola,
grande campo



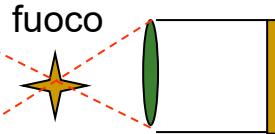
lente sensori

Focale grande,
piccolo campo



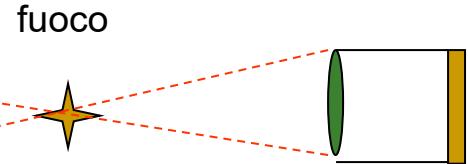
lente sensori

Focale piccola,
area sensori piccola
si riduce il campo



lente sensori

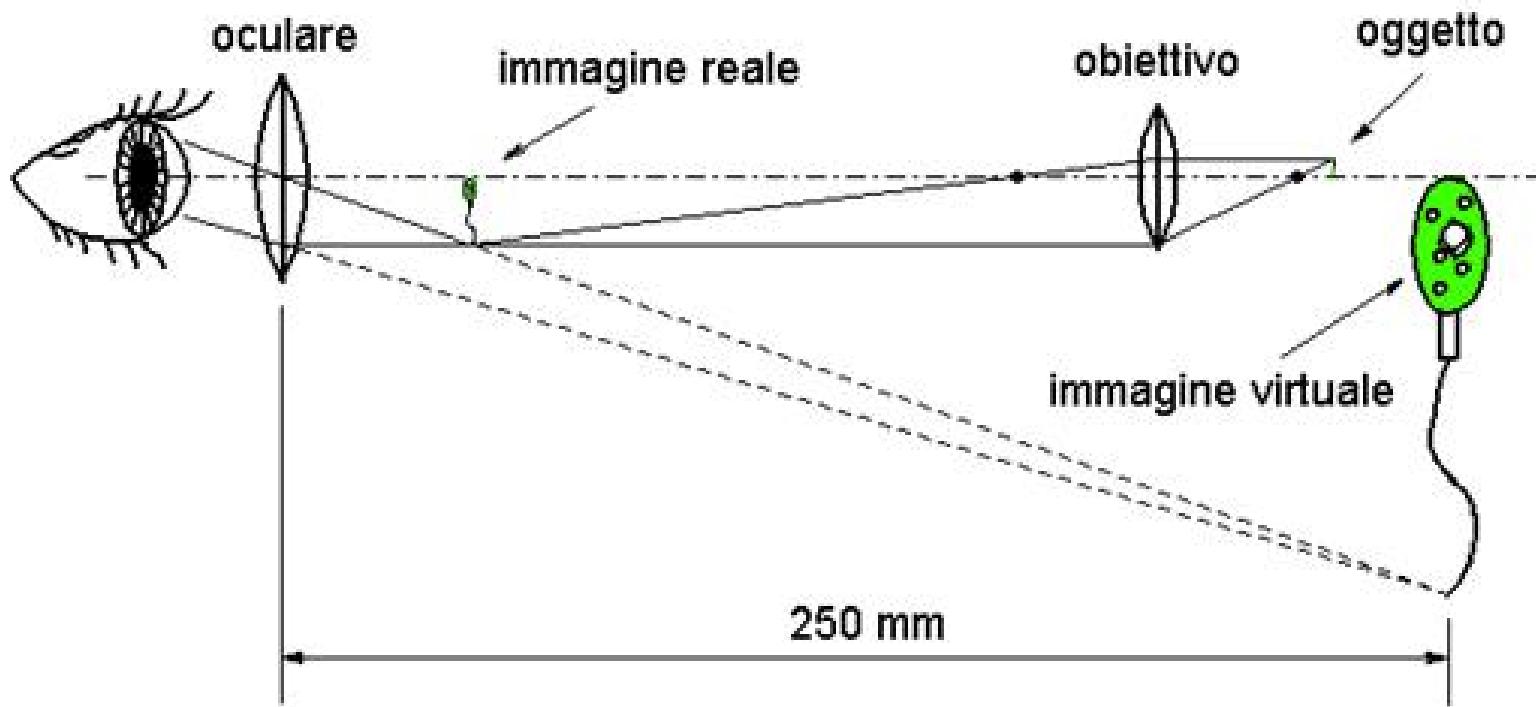
Focale grande,
area sensori piccola
si riduce il campo

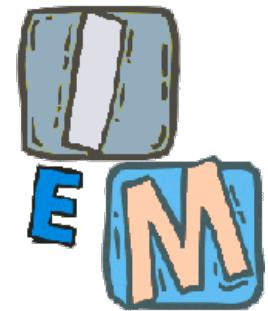


lente sensori



Combinando più lenti



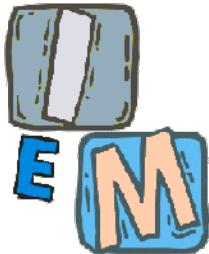


Campionamento e quantizzazione

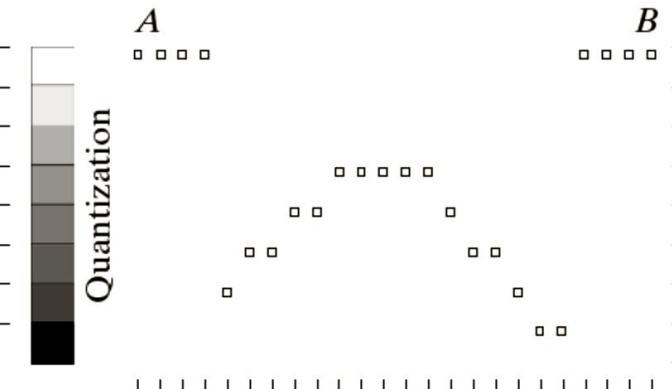
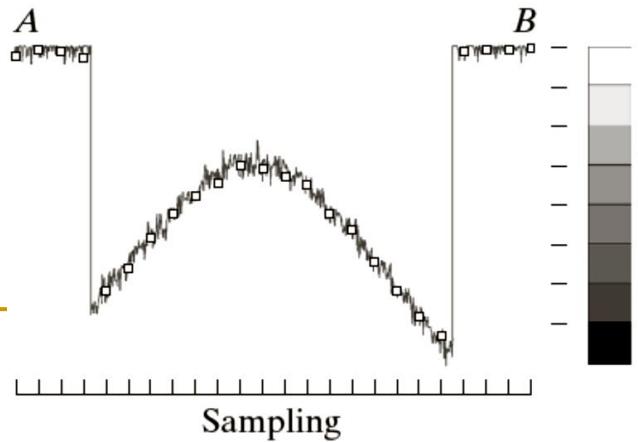
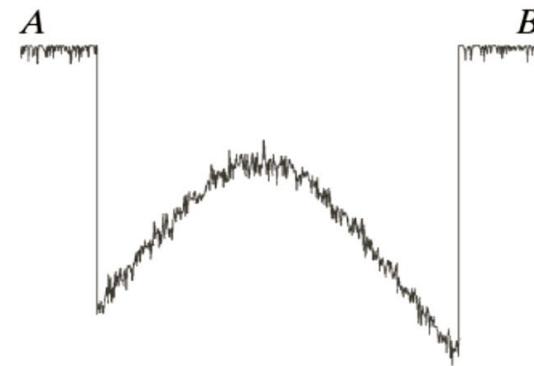
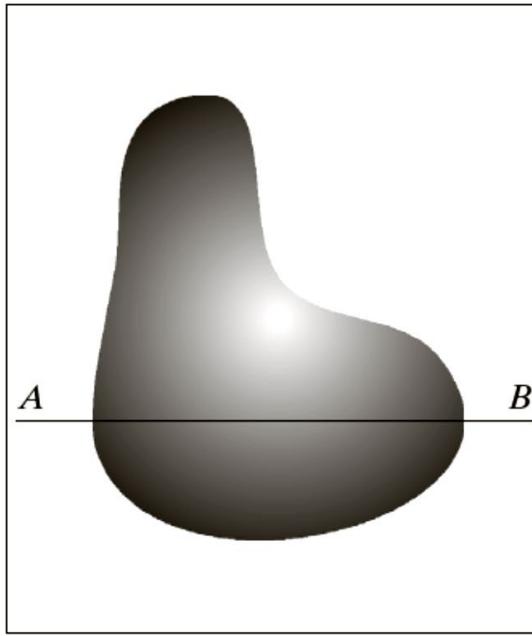


Campionamento e quantizzazione

- Dato un segnale continuo occorre scegliere un numero finito di “campioni” rappresentativi del segnale.
- Il valore in ogni singolo punto del segnale è un numero reale, occorre scegliere dei valori discreti per rappresentare correttamente il segnale.

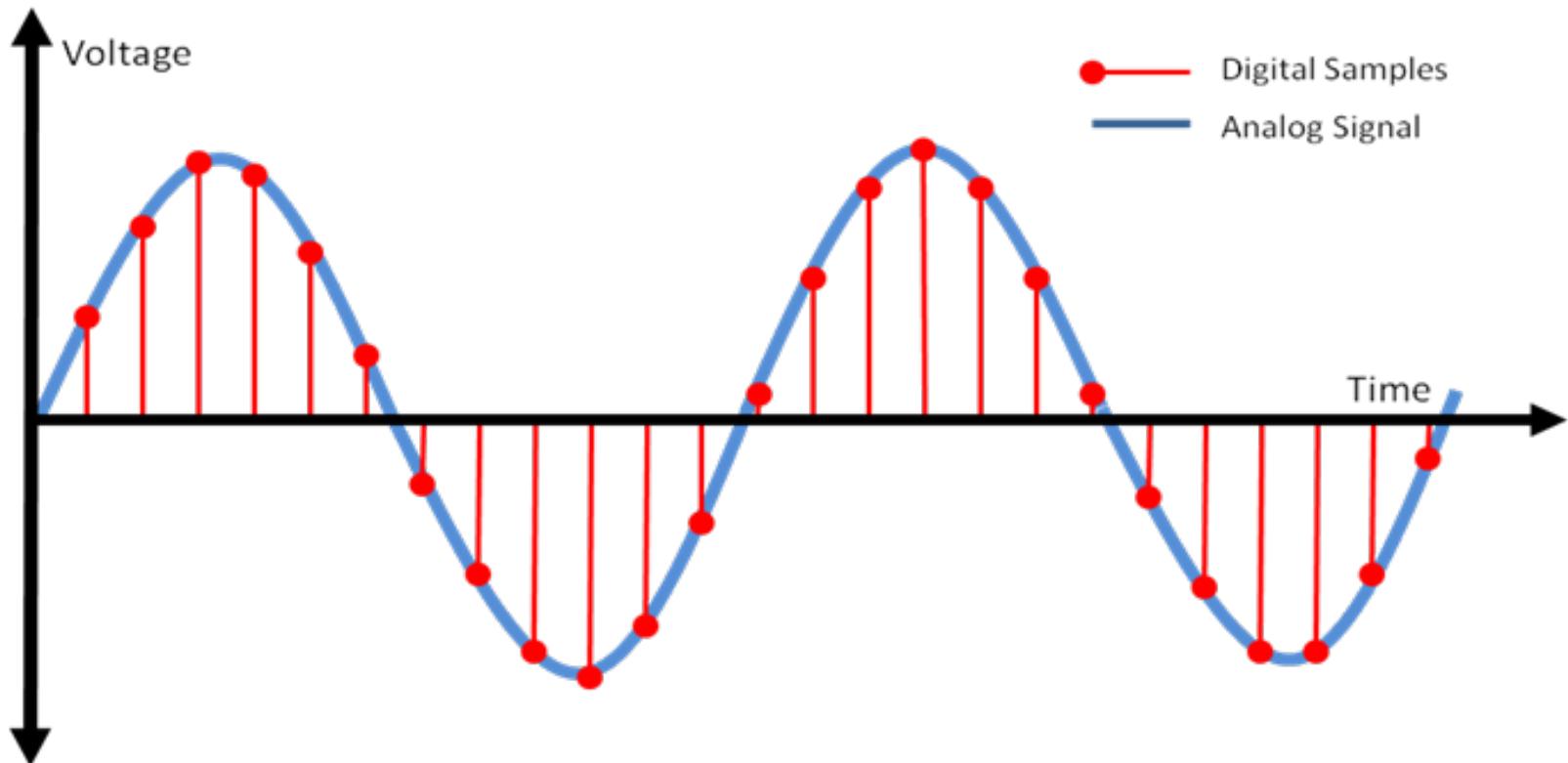


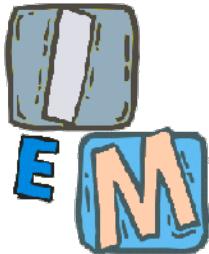
Campionamento e quantizzazione





Campionamento - Esempio





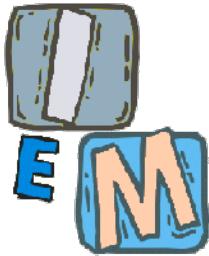
Un errore nel tasso di campionamento può stravolgere un segnale in due modi:

- a) **Un campionamento troppo basso fa perdere dettagli ed informazioni**; sebbene grave una tale perdita è spesso una necessità: non possiamo conservare milioni di campioni e ci accontentiamo di perdere informazioni pur di tenere il database delle misure ottenute in dimensioni maneggevoli.
- b) **Un campionamento troppo basso può far apparire nella immagine dettagli NON PRESENTI nell'originale**. Il segnale viene “alterato” e cambiato in qualcosa di “altro”. Si parla di “aliasing”.
L’aliasing è un fenomeno sottile ma poiché esso è imprevedibile richiede attenzione.



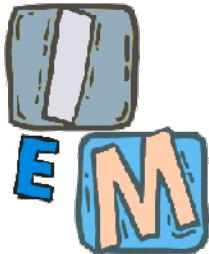
Come scegliere il giusto campionamento?

- Per scegliere il giusto valore di campionamento si ricorre ad un teorema fondamentale: **il teorema di Shannon**.
- Tale teorema si basa sulla misura del Nyquist rate.
- Ma cos'è?



Nyquist rate (Harry Nyquist, 1928)

- Si definisce Nyquist rate il doppio della più alta frequenza in un segnale continuo e limitato.



Nyquist rate (in pratica)

*Non daremo una definizione rigorosa ma una “operativa” in 1D.
La generalizzazione a 2d è immediata.*

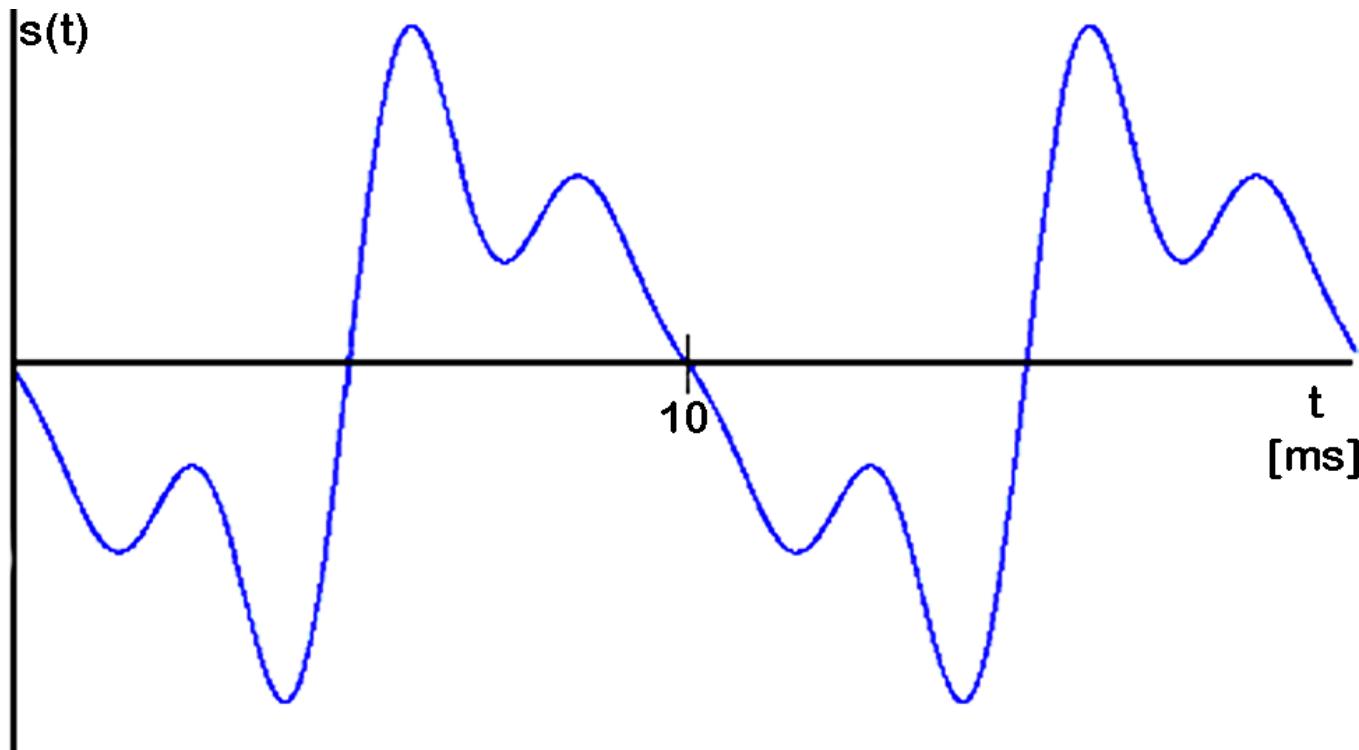
Si osservi un fenomeno che si svolge in un intervallo a...b

- Se il fenomeno è (approx) costante durante tutto l'intervallo, la più alta frequenza del segnale è 1: il fenomeno si svolge in un unico ciclo.
- Altrimenti si divide l'intervallo in 2 parti e si controlla per ciascun intervallino il fenomeno si mantiene (approx) costante (esso può però variare da intervallino ad intervallino).
- Si procede in tal modo dividendo l'intervallo in 3, 4, ... parti fino a trovare una suddivisione tale che entro ciascun intervallino il fenomeno sia in pratica costante.

Sia tale suddivisione in N parti. 2^*N si dice Nyquist rate del fenomeno sull'intervallo osservato.



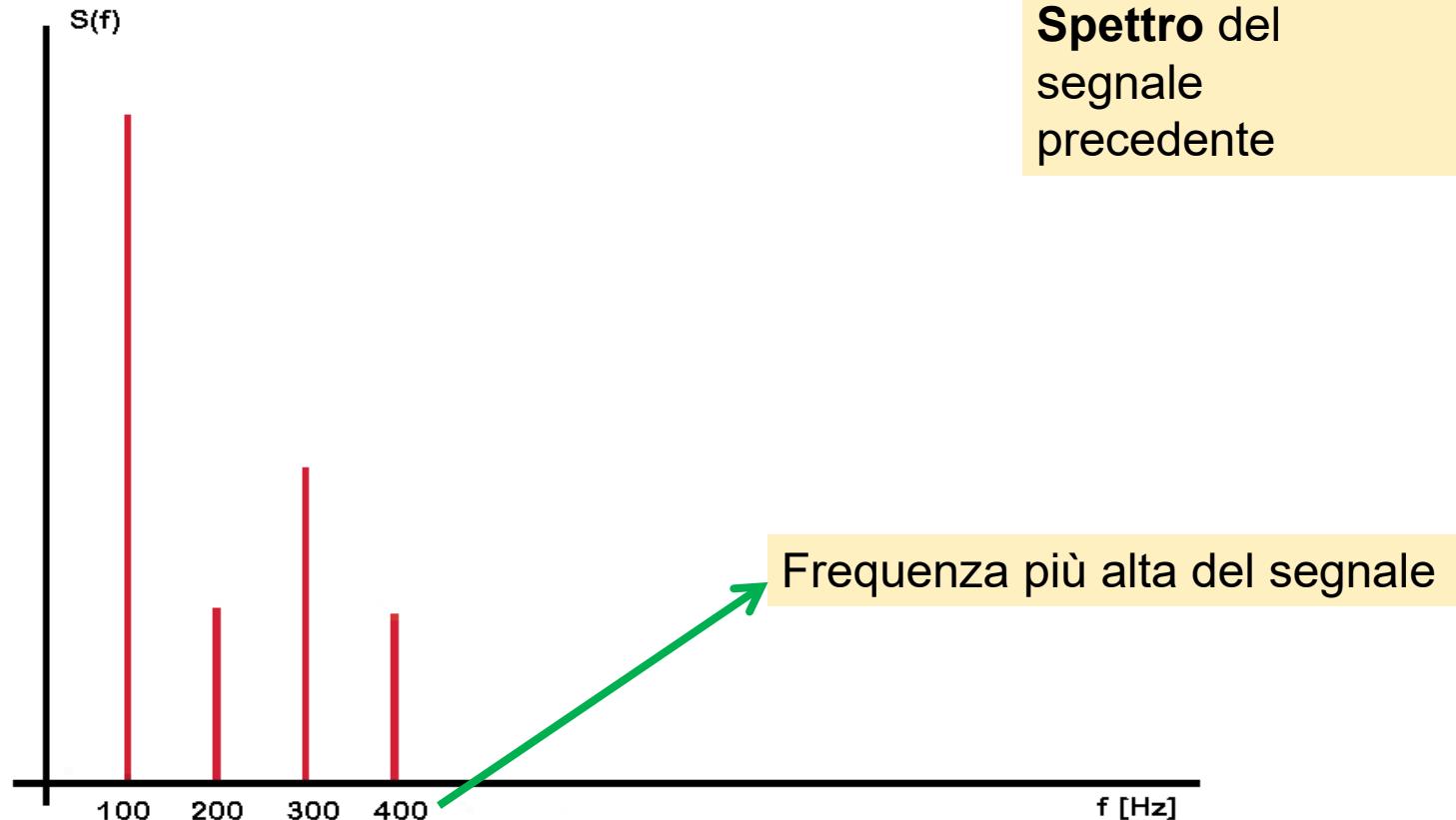
Dominio del tempo...



Attraverso l'operazione di **Serie di Fourier**...



... e della frequenza



... si passa ad un dominio differente: frequenze.

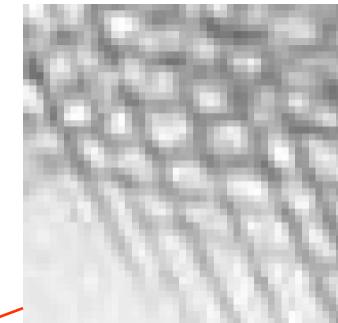
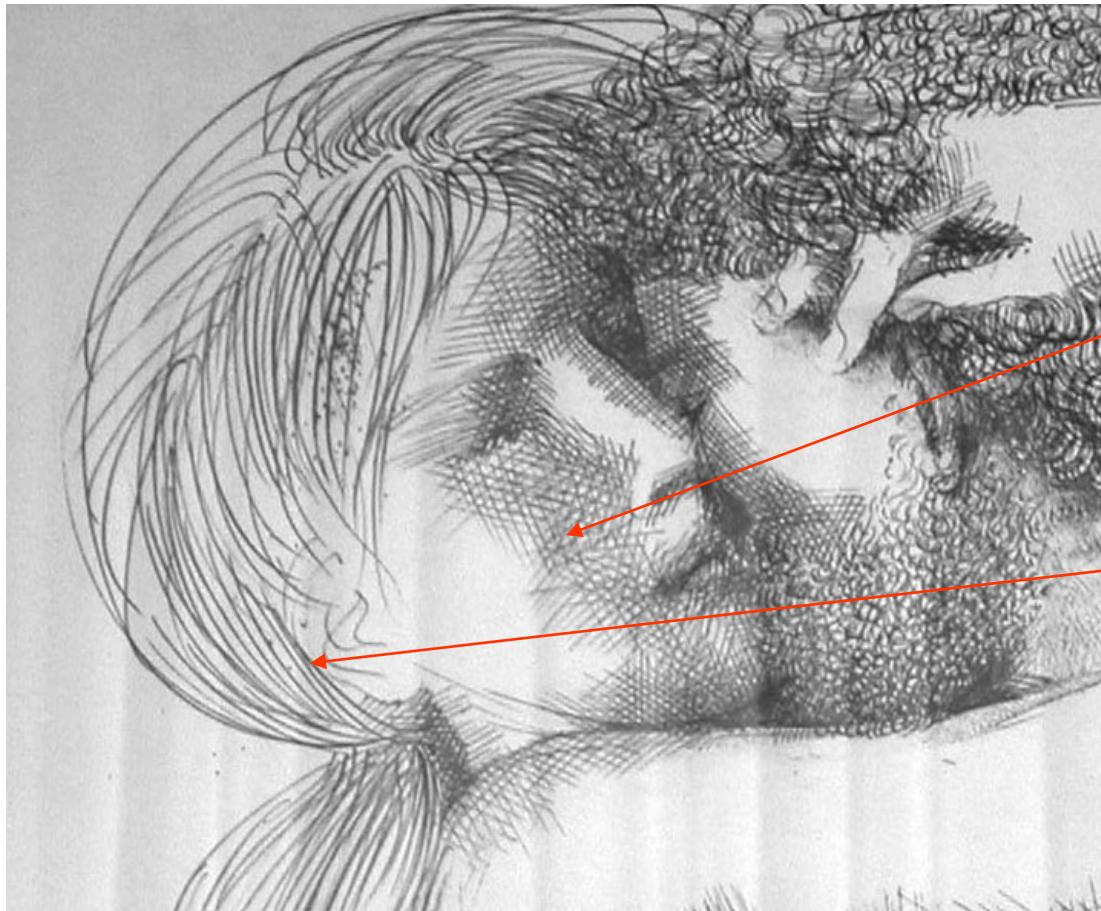


Teorema del campionamento di Shannon (Claude E. Shannon, 1949)

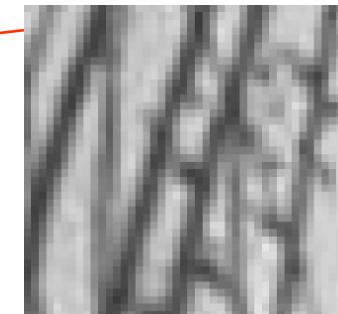
Se si raccolgono campioni con frequenza più alta del Nyquist rate il segnale può essere ricostruito FEDELMENTE in ogni suo punto!



Applicazione alle immagini



Diametro tratto: 4 pixel



Diametro tratto: 6 pixel



Campionamento corretto

Usiamo i tratti fini. Se preserviamo questi, allora abbiamo preservato anche gli altri. La nostra «frequenza più alta» è allora:

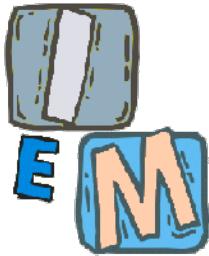
- dimensione quadro 720 pixel, dettaglio massimo 4 pixel, possiamo dividere l'intervallo in $720/4=180$ tratti.
- Il doppio di tale frequenza è il Nyquist rate: 360. Prenderemo allora solo 360 campioni e ricostruiremo con l'interpolazione bilineare l'immagine.

Originale con 720 x 720 campioni



Campionata con 360 x 360 campioni





Campionamento corretto

- Riscalzo l'immagine in modo che quella campionata abbia la stessa dimensione di quella originale (uso algoritmo di interpolazione).

Originale con 720 x 720 campioni



Ricostruita con 360 x 360 campioni





Campionamento sbagliato

Decidiamo di volere trascurare i tratti fini. La nostra ipotetica «frequenza più alta» è allora:

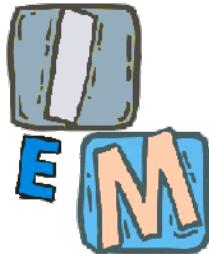
- dimensione quadro 720 pixel, dettaglio massimo 6 pixel, possiamo dividere l'intervallo in $720/6=120$ tratti.
- Il Nyquist rate è quindi $2*120=240$. Prenderemo allora solo 240 campioni e ricostruiremo con l'interpolazione binomiale l'immagine.

Originale con 720 x 720 campioni



Campionata con 240 x 240 campioni





Campionamento sbagliato

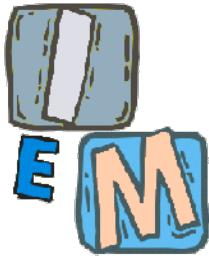
- Riscalo l'immagine in modo che quella campionata abbia la stessa dimensione di quella originale (uso algoritmo di interpolazione).

Originale con 720×720 campioni



Ricostruita con 240×240 campioni





Campionamento sbagliatissimo

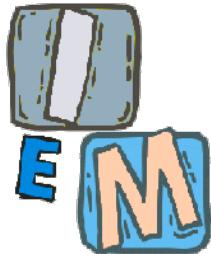
- Campioniamo a frequenza inferiore al Nyquist rate.

Originale con 720 x 720 campioni



Campionata con 120 x 120 campioni





Campionamento sbagliatissimo

- Riscalzo l'immagine in modo che quella campionata abbia la stessa dimensione di quella originale (uso algoritmo di interpolazione).

Originale con 720×720 campioni



Ricostruita con 120×120 campioni





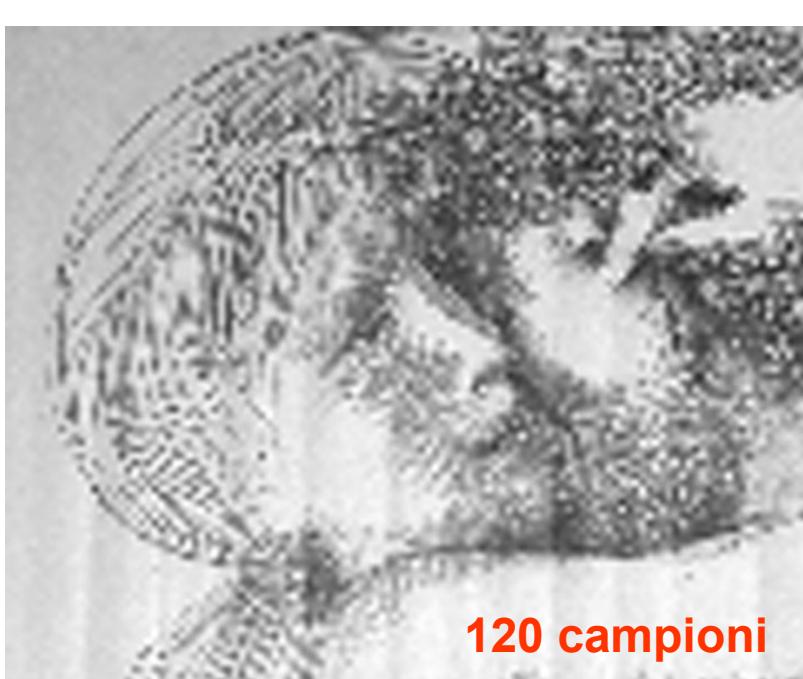
720 campioni



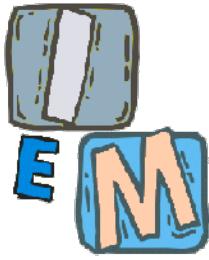
360 campioni



240 campioni

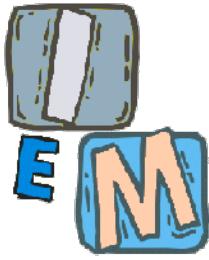


120 campioni



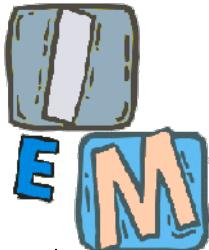
Sottocampionamento

- Ma cosa succede esattamente se si campiona a una frequenza inferiore a quella al Nyquist rate?
- Si perdono dei dettagli significativi e spesso si introducono nuovi dettagli che non sono presenti nella realtà.



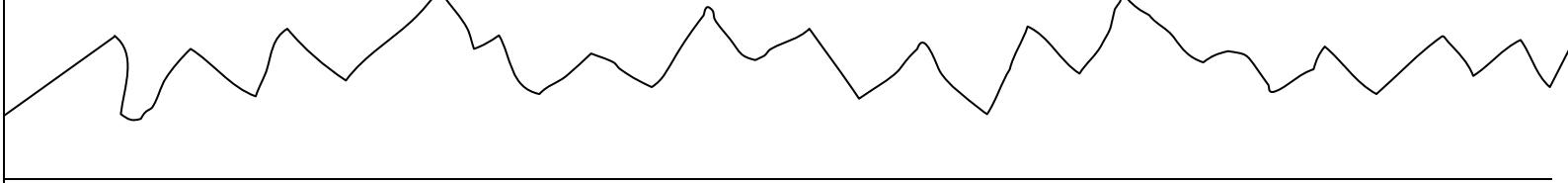
Aliasing

- Questo fenomeno è detto frequency aliasing o semplicemente aliasing
- Con l'aliasing le alte frequenze sono “mascherate” da basse frequenze e trattate come tali nella fase di campionamento.
- Aliasing proviene da Alias cioè falsa identità!

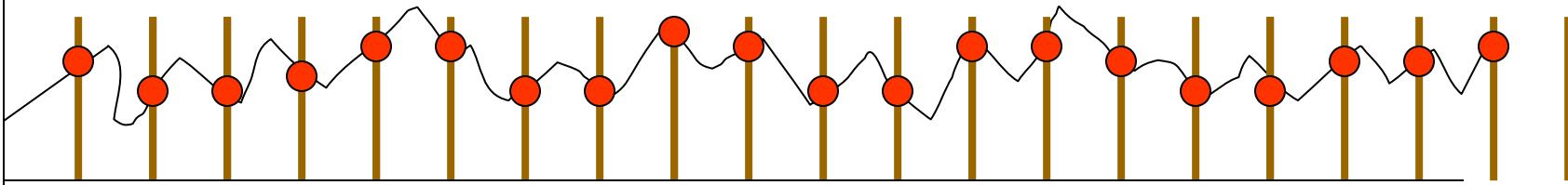


Perdita di dettagli

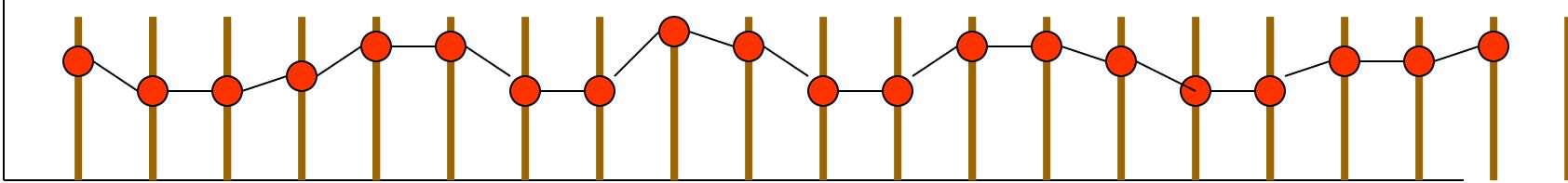
Segnale reale.

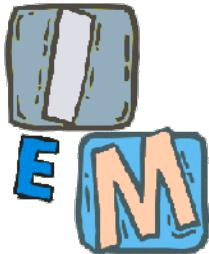


Campionamento “rado”



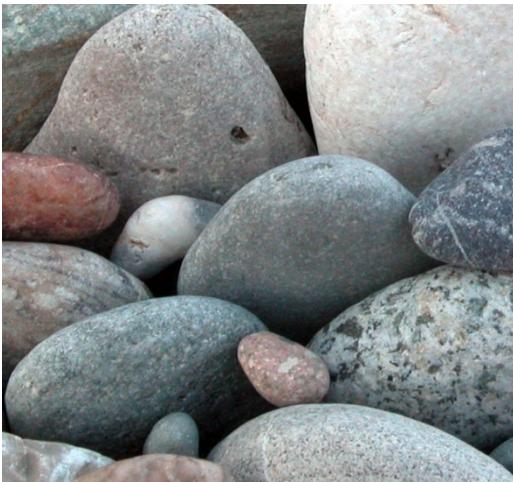
Ricostruzione per interpolazione (si perdono dettagli = alte frequenze)





Aliasing

Campionamento
Un pixel ogni 256

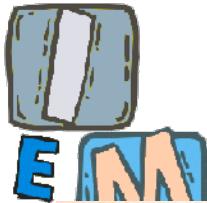


Ricostruzione con
interpolazione
bicubica

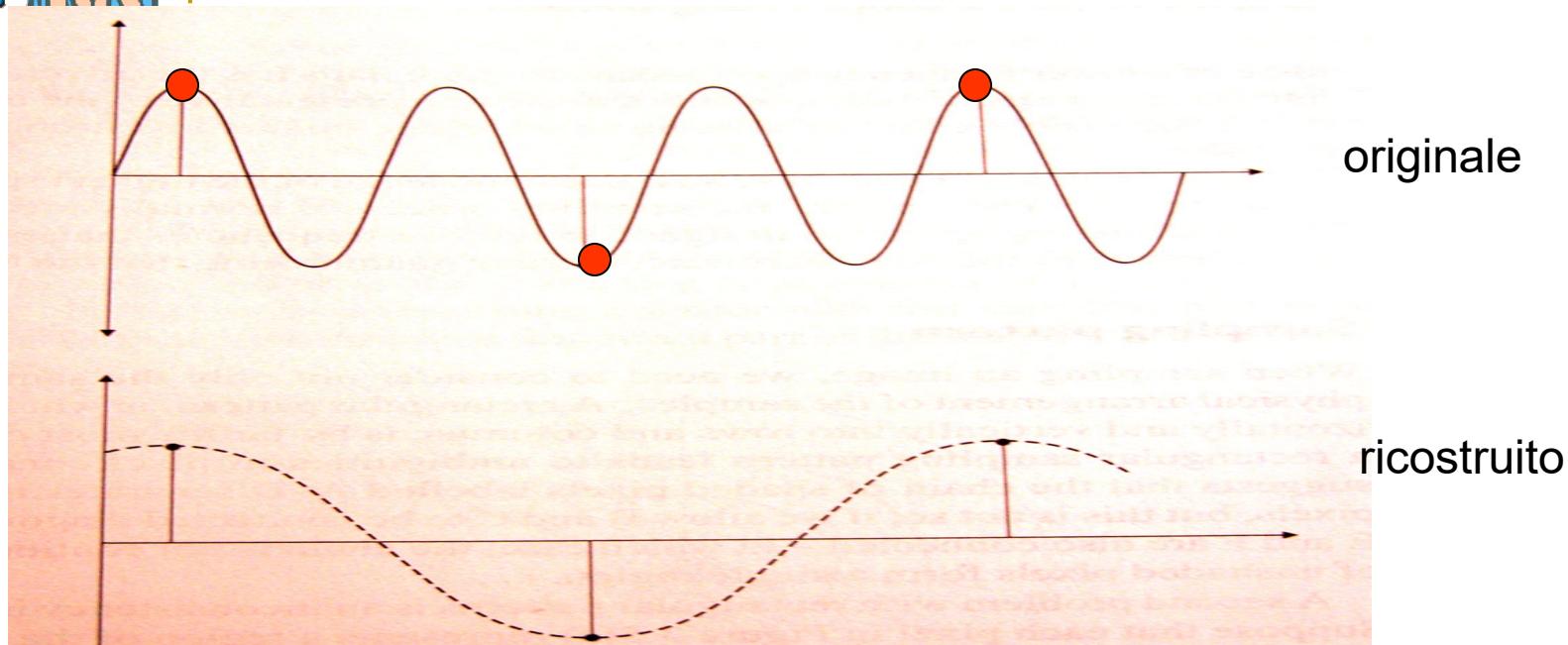


Si perdono dettagli, graffi e disegni sulle rocce sono divenuti indistinguibili e sono apparsi NUOVI dettagli!

- a) Ovvie scalettature sui bordi dei sassi.
- b) Fori che non erano presenti nell'originale!

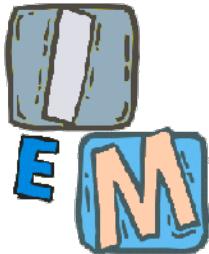


Aliasing

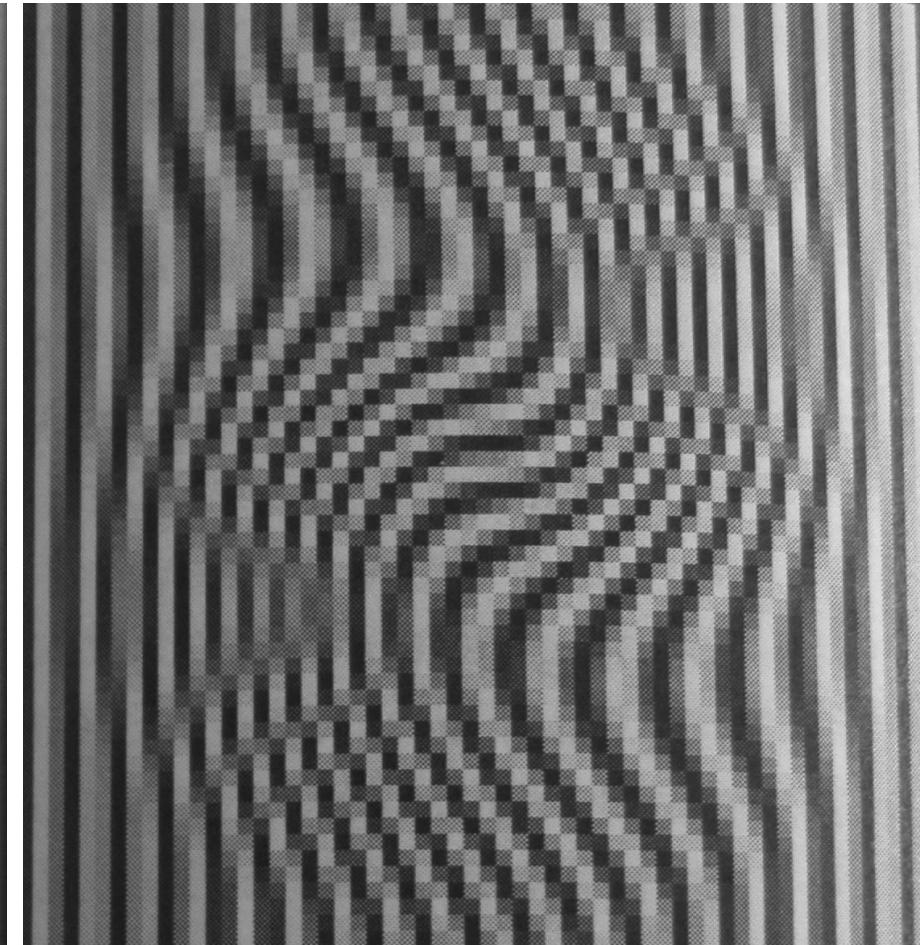


Se si fosse trattato di una onda sonora un suono acuto sarebbe stato sostituito da un suono grave!

Quanti campioni prendere per riprodurre un suono con fedeltà accettabile? (passo essenziale per fare un CD!)



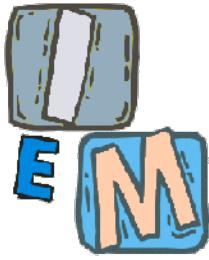
Aliasing



— originale

— Appaiano nuovi inesistenti
dettagli (“artifacts”)

— ricostruito



Aliasing

- Nella realtà l'aliasing è sempre presente anche se in condizioni minime.
- Esso viene introdotto quando si impone che il segnale sia limitato per essere campionato.
- L'aliasing può essere ridotto applicando una funzione di smussamento sul segnale originario prima del campionamento (anti-aliasing).

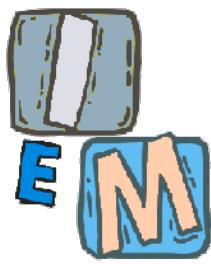


Aliasing

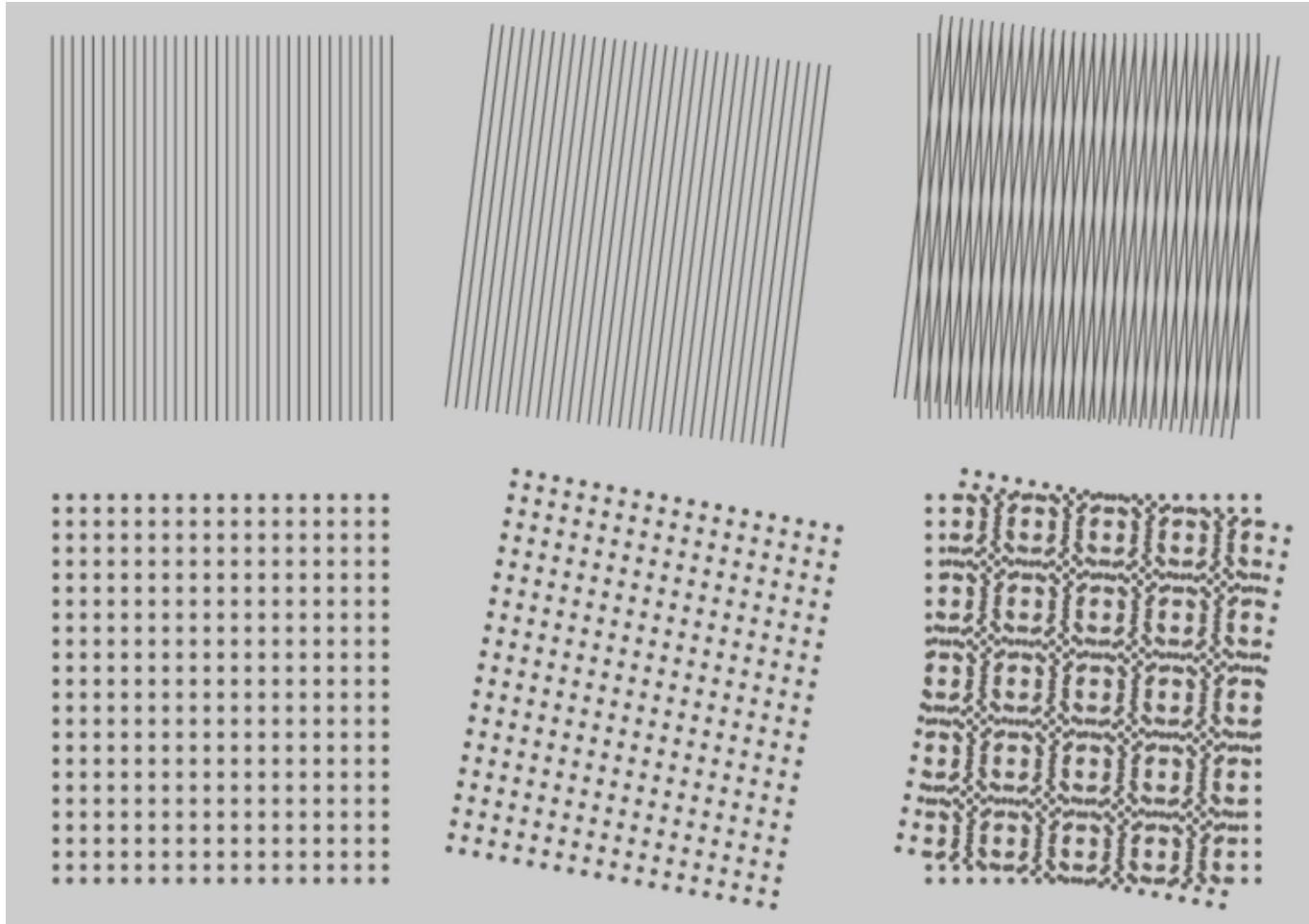


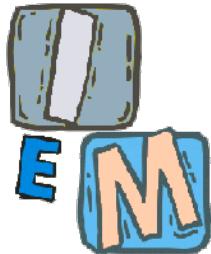
a b c

FIGURE 4.17 Illustration of aliasing on resampled images. (a) A digital image with negligible visual aliasing. (b) Result of resizing the image to 50% of its original size by pixel deletion. Aliasing is clearly visible. (c) Result of blurring the image in (a) with a 3×3 averaging filter prior to resizing. The image is slightly more blurred than (b), but aliasing is not longer objectionable. (Original image courtesy of the Signal Compression Laboratory, University of California, Santa Barbara.)



Moirè





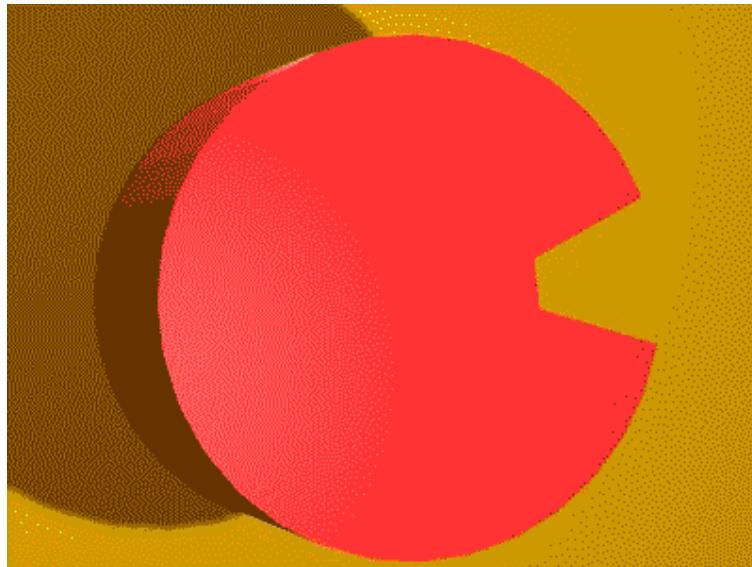
Cintura Moirè



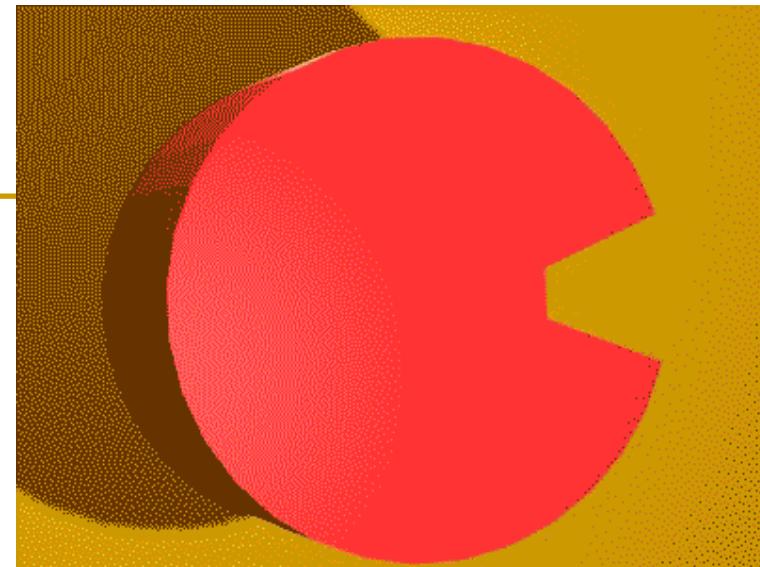


Immagini reali da Facebook

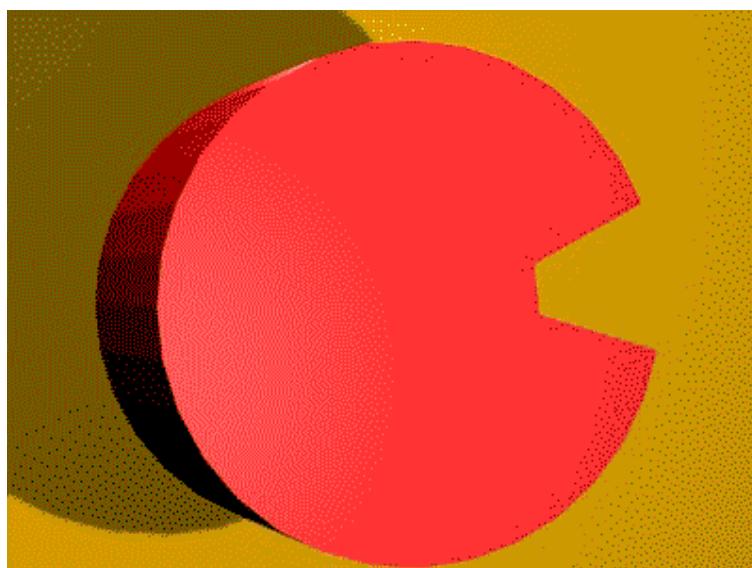




Animazione costruita
con tutti i campioni disponibili

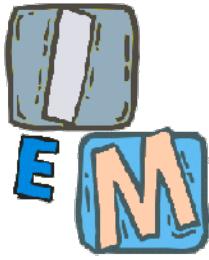


Animazione costruita
Usando un campione ogni 4



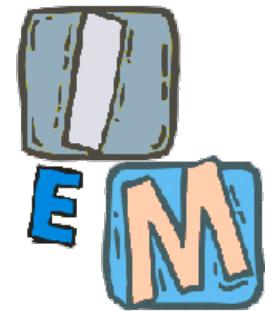
Animazione costruita
Usando un campione ogni 25

Essa viene percepita come retrograda!
(Alias temporale: un movimento viene sostituito ad un altro!)

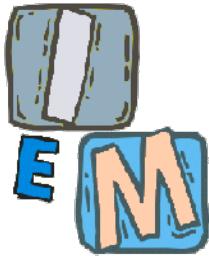


Wagon wheel

- Cercate i video su YouTube inserendo “wagon wheel aliasing”...

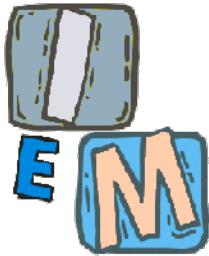


La quantizzazione



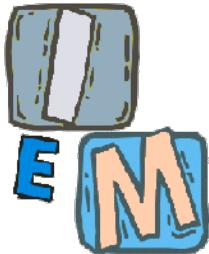
Quantizzazione

- I sensori sono apparecchiature analogiche: forniscono misure di luminosità come numeri REALI.
- È utile arrotondare tali valori e mantenerli in un certo range.
- Tale processo si chiama QUANTIZZAZIONE



Quantizzazione

- In più le misure sono sempre soggette a **ERRORE** a causa di difetti nel sensore o di perturbazioni termiche (“**rumore**”).
- Nei CCD anche a obiettivo chiuso ci sono correnti parassite che inducono rumore dentro il dispositivo elettronico dette “**dark current**”.



Quantizzazione: procedura generale

Se i valori da quantizzare sono numeri reali nel range $[a, b]$ e si vuole quantizzare su n livelli:

Si fissano $n+1$ numeri (t_0, t_1, \dots, t_n) in $[a, b]$ tali che:

$$t_0 = a < t_1 < t_2 < \dots < t_n = b$$

Il numero x in $[a, b]$ verrà assegnato al livello di quantizzazione k se risulta:

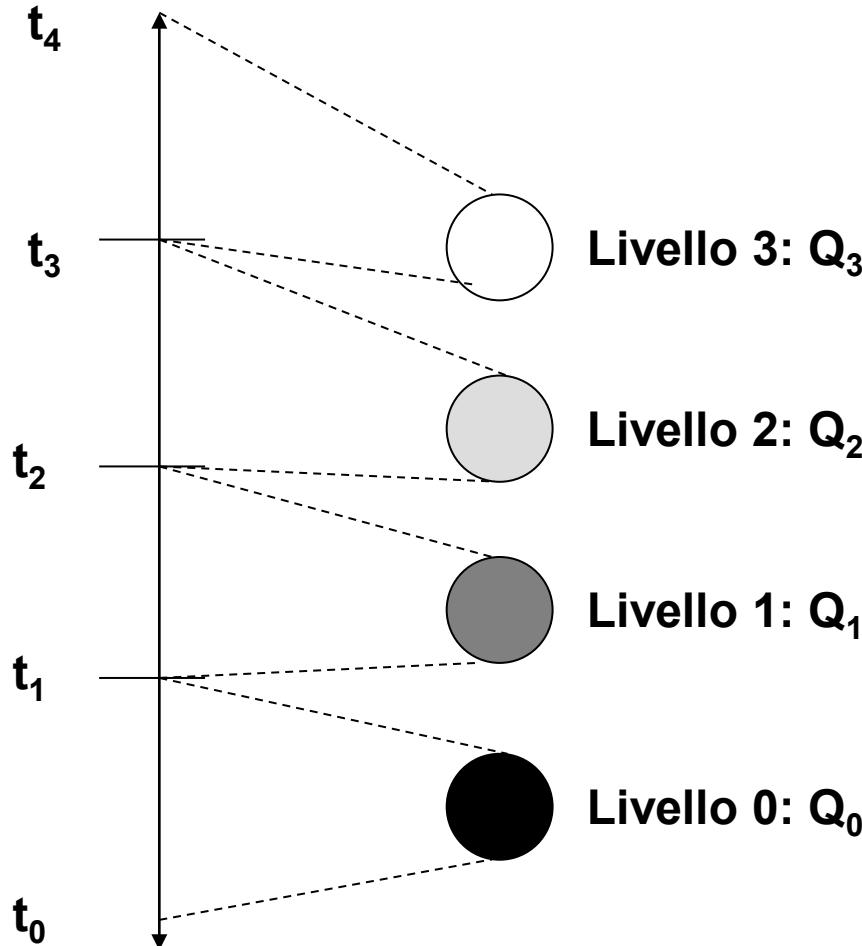
$$t_k \leq x < t_{k+1}$$

(b viene assegnato al livello k .)

A ciascun livello si assegna un valore rappresentativo Q_i



Quantizzazione: diagramma



Fissato il numero di livelli di quantizzazione si pone il problema di come rappresentare in memoria tali livelli. Ovviamente utilizzeremo delle etichette numeriche.

Quanti bit sono necessari per ricordare quale livello di luminosità si misura in un punto?

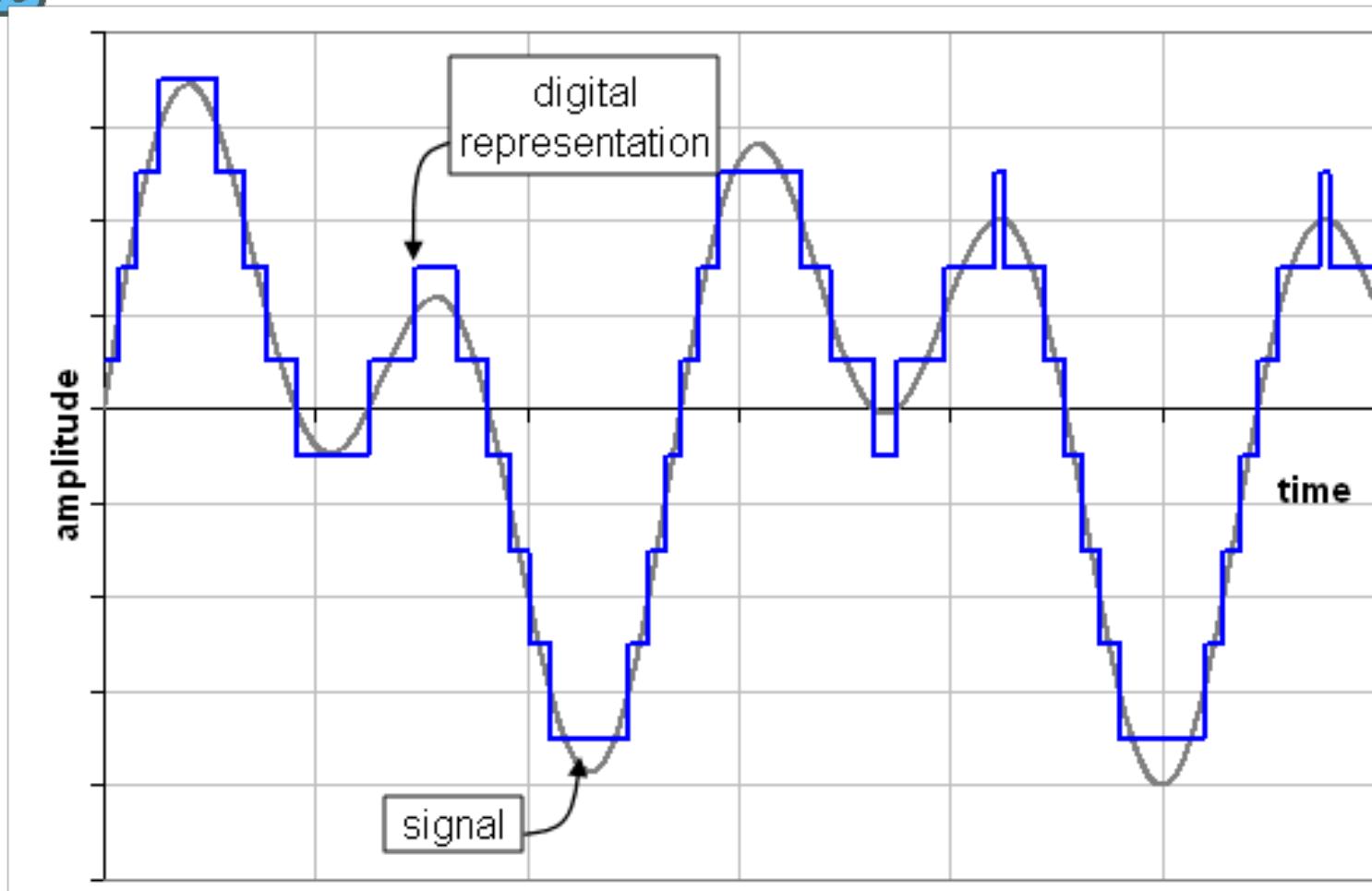
Nell'esempio ne bastano $2 = \log(4)$

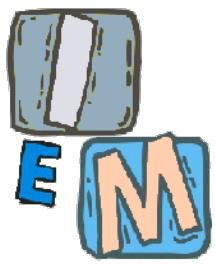
In generale se ci sono N livelli occorre rappresentare N etichette numeriche e avremo bisogno di un numero di bit pari a:

$$B = \log (N)$$

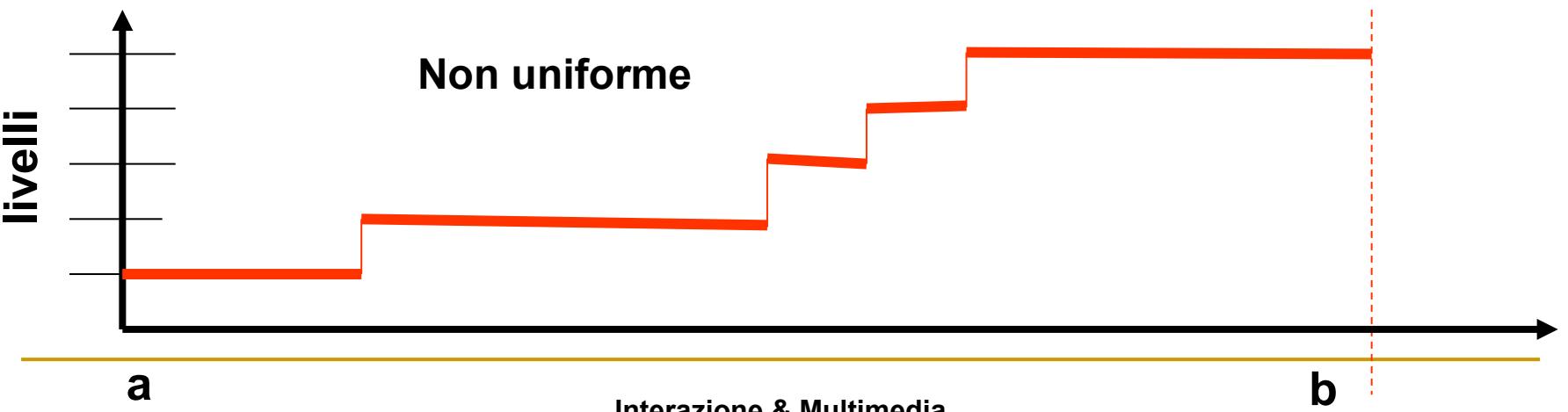
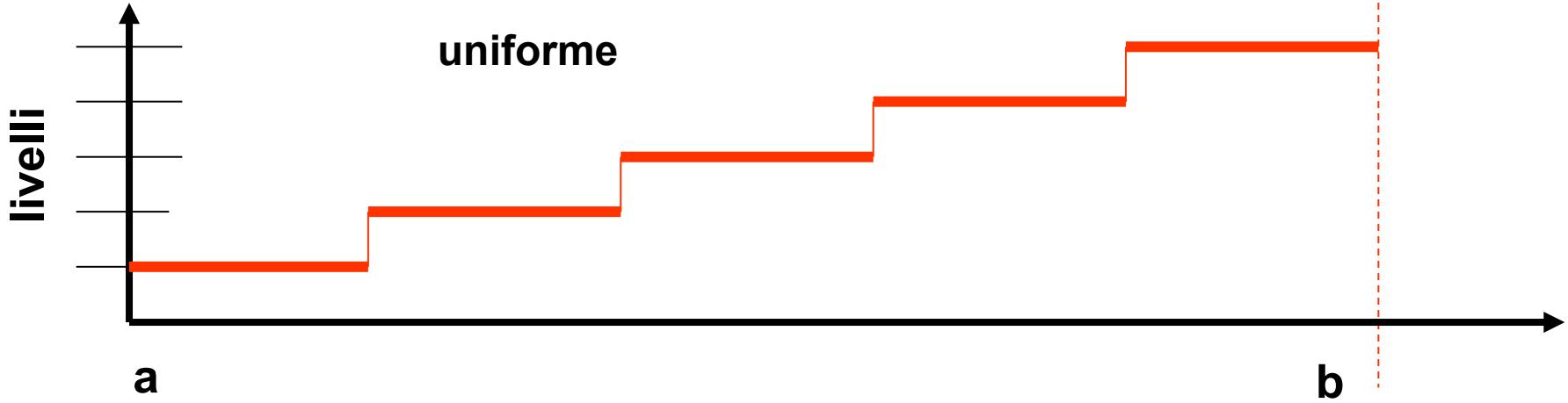


Quantizzazione - Esempio





Tipi di quantizzazione





La quantizzazione

La quantizzazione effettuata dagli scanner commerciali e dalla fotocamere digitali è **non uniforme e logaritmica**: ciò permette di assegnare più livelli nella area dei toni scuri e meno livelli nella area dei toni chiari.

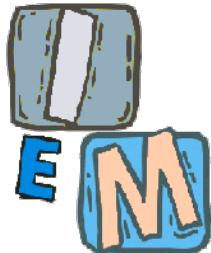
Questo è particolarmente importante quando si elaborano dati medici (es.radiografie)



**Quantizzazione
uniforme**



**Quantizzazione
logaritmica**

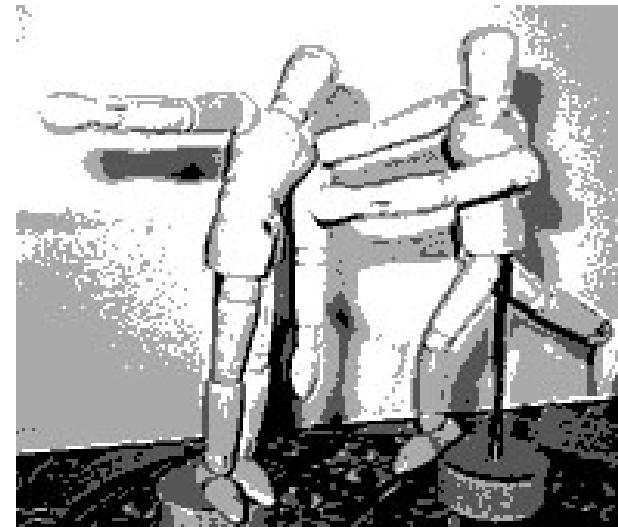


Quantizzazione: effetti sulle immagini

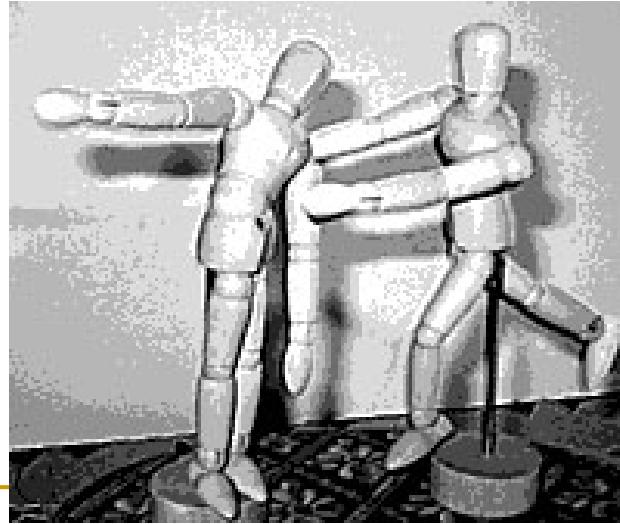
**2 livelli
1 bit**



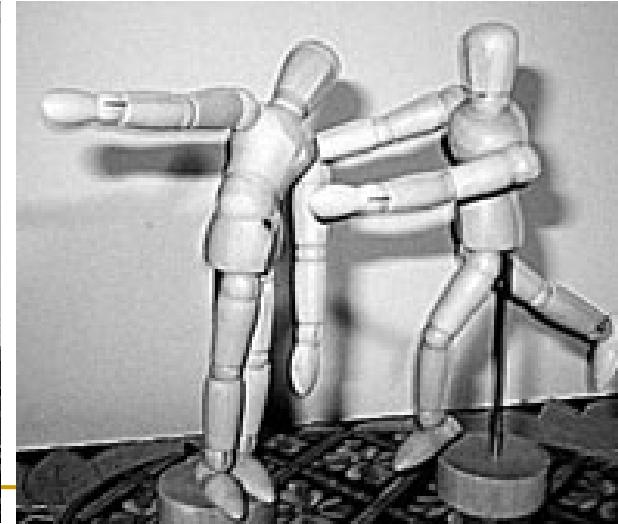
**4 livelli
2 bit**



**8 livelli
3 bit**



**256
livelli
8 bit**

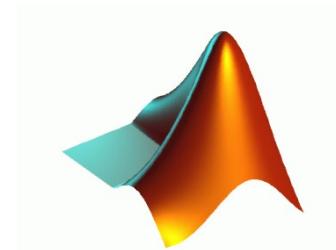




Quantizzazione

Quantizzazione uniforme:

- range in ingresso 0...N-1,
- range in uscita 0...K-1 con $K \leq N$.



Se L è il livello di ingresso rappresentato da un intero
il livello L' corrispondente dopo la quantizzazione è:

$$L' = (L * K) / N$$

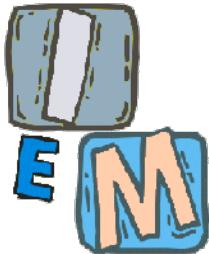
Esempio: portare 0...255 in 0...7 con quantizzazione uniforme.

Il livello 10 diviene $(10 * 8) / 256 = 0$

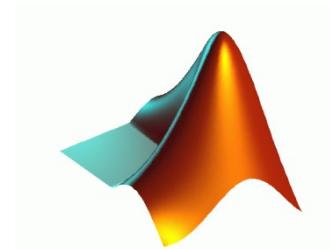
Il livello 20 diviene $(20 * 8) / 256 = 0$

Il livello 30 diviene $(30 * 8) / 256 = 0$

Il livello 32 diviene $(32 * 8) / 256 = 1$ eccetera...



Quantizzazione



Quantizzazione non uniforme:

- range in ingresso 0...N-1,
- range in uscita 0...K-1 con K<=N.

Se L è il livello di ingresso rappresentato da un intero il livello L' corrispondente dopo la riquantizzazione è:

$$L' = f(L, N, K)$$

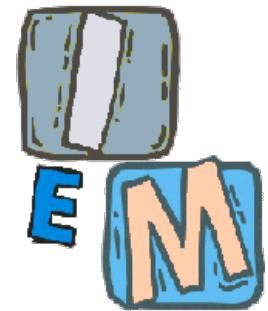
La funzione $f(L, N, K)$ definisce lo schema di riquantizzazione, e può avere le forme più varie. Tra le più comuni è la

Quantizzazione logaritmica: $f(L, N, K) = (\log_2(L) * K) / \log_2(N)$ (si intende per log la parte intera del logaritmo in base 2)

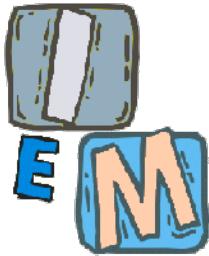
Nel caso più comune $N=256$, $\log(N)=8$ e $K=8$, o comunque in generale $\log(N)=K$, per cui $f(L, N, K)=\log_2(L)$.

Tuttavia si potrebbe volere portare il range 0...255 in 0...15 e in tal caso la formula di cui sopra ritorna utile.

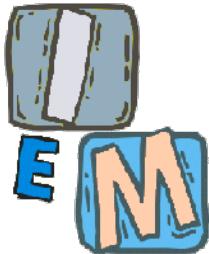




Colore

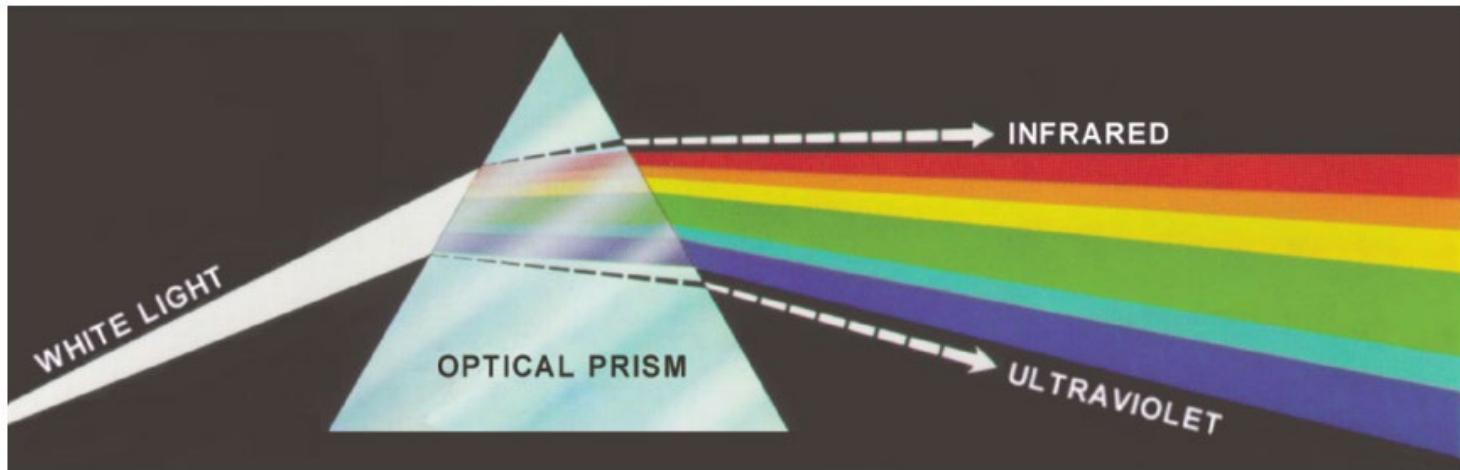


- Abbiamo studiato come funziona l'occhio e come il cervello elabora le informazioni ricevute.
- Adesso dobbiamo capire come è fatta la luce!



Sir Isaac Newton, 1666

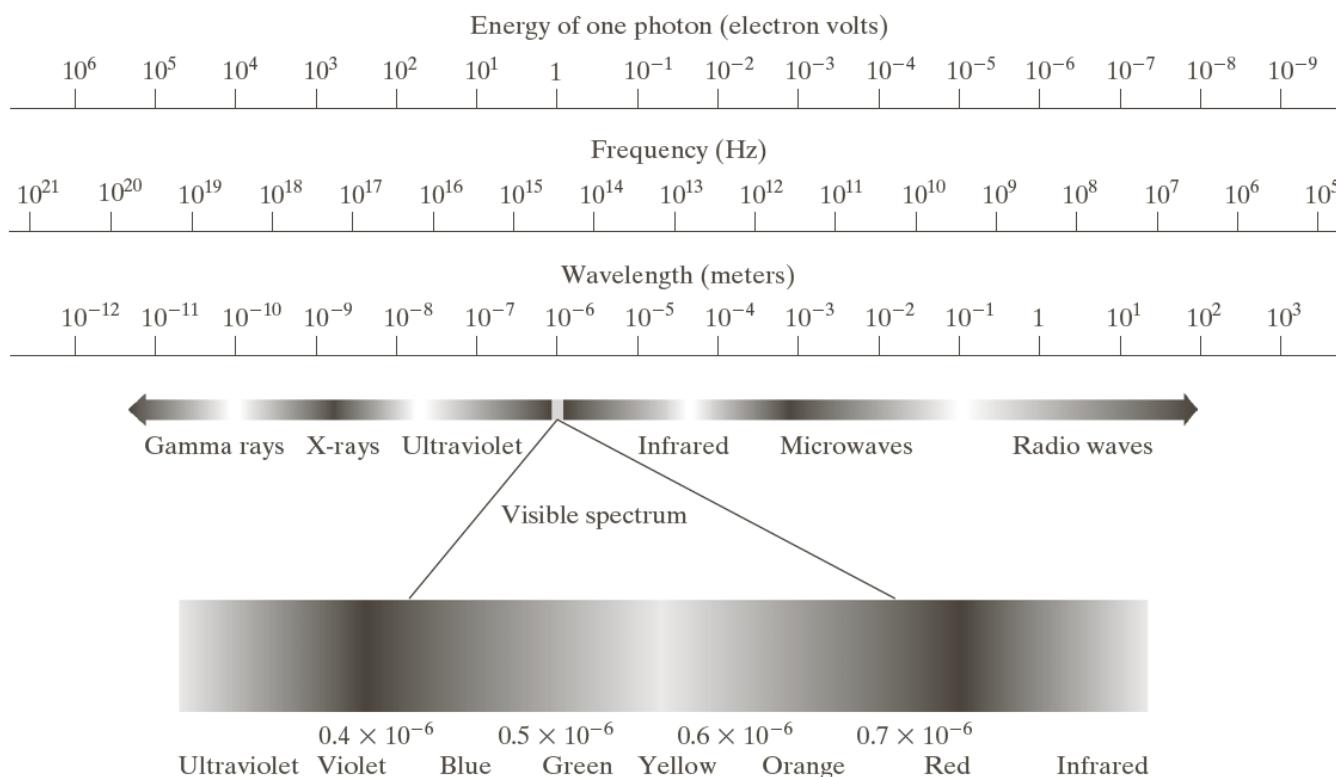
- Se un raggio luminoso bianco attraversa un prisma di vetro, ciò che si ottiene non è luce bianca, ma è uno spettro di colori che vanno dal violetto al rosso.
- Quindi la luce può essere decomposta in onde luminose di tipo differente.





Lo spettro elettromagnetico

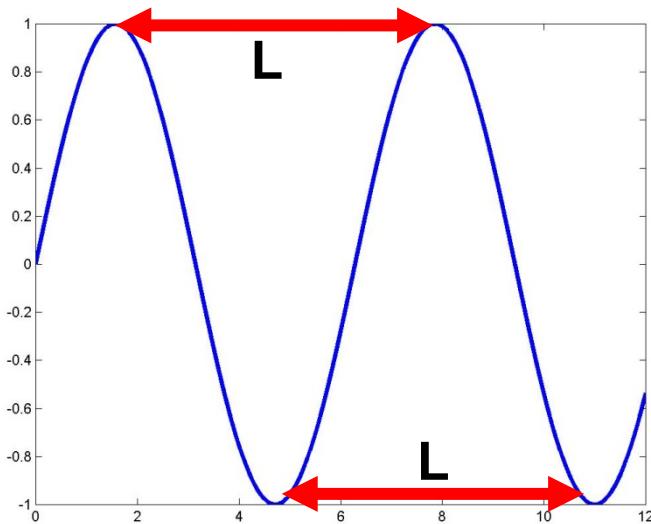
- Quello che il nostro occhio percepisce è solo una piccola porzione dello spettro elettromagnetico.





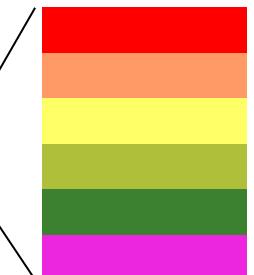
Colore

I colori sono legati alle lunghezze d'onda (Newton-Huygens).

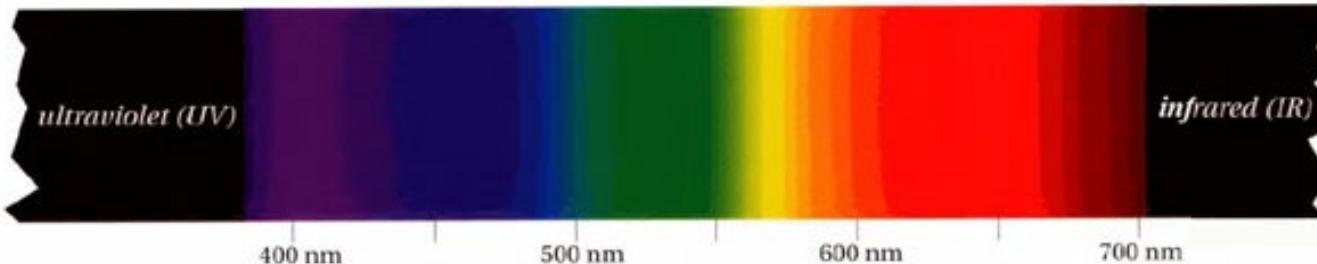


L=Lunghezza d'onda

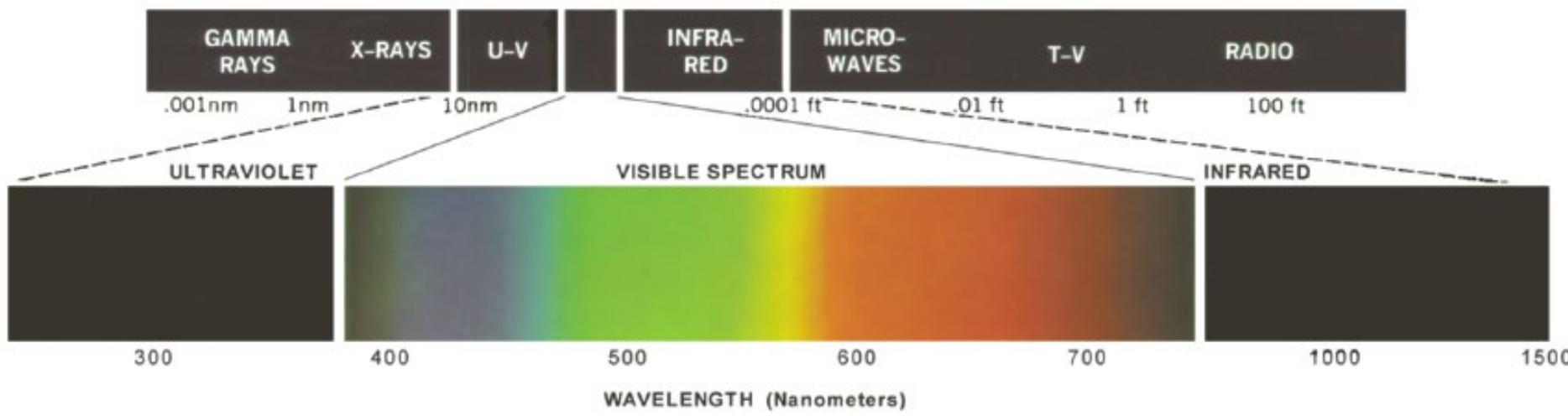
Lung. in nanometri	Tipo radiazione
$10^{17} - 10^{13}$	Osc.elettriche
$10^{13} - 10^9$	Onde radio
$10^9 - 10^6$	Micro-onde
$10^6 - 10^3$	Infrarosso
$10^3 - 10^2$	Visibile
$10^2 - 10$	Ultravioletto
$10 - 10^{-3}$	Raggi X
$10^{-3} - 10^{-7}$	Raggi gamma e cosmici

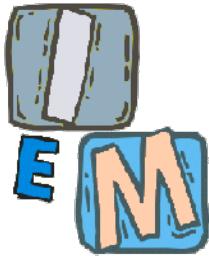


Un nanometro= 1 metro / 1.000.000.000

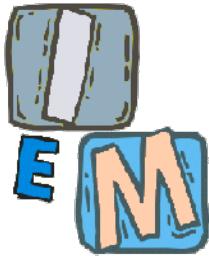


- La luce è formata da tutte quelle lunghezze d'onda percepite dall'occhio umano.
- Lo spettro della luce visibile oscilla tra il violetto e il rosso.
- Per comodità lo spettro del visibile è diviso in sei regioni: violetto, blu, verde, giallo, arancio e rosso.
- Le bande di colore non sono tutte della stessa grandezza e degradano in quelle limitrofe.

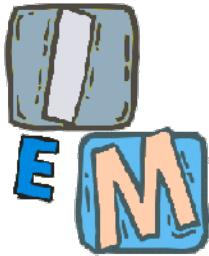




- L'occhio umano percepisce come colore di un oggetto quella luce che l'oggetto stesso riflette.
- Se un oggetto riflette tutte le lunghezze d'onda luminosa, allora l'oggetto sarà percepito come bianco.
- Un oggetto che riflette le lunghezze d'onda da 500 a 570 nm ed assorbe tutto il resto, sarà percepito come di colore verde.



- Per descrivere la luce bastano i seguenti valori:
- *Radianza*: cioè la quantità di luce emessa dalla sorgente luminosa;
- *Luminanza*: cioè la misura dell'energia percepita dall'utente;
- *Brillantezza*: è un valore soggettivo che indica la sensazione di colore.



I coni

Nella retina ci sono tre tipi di coni:

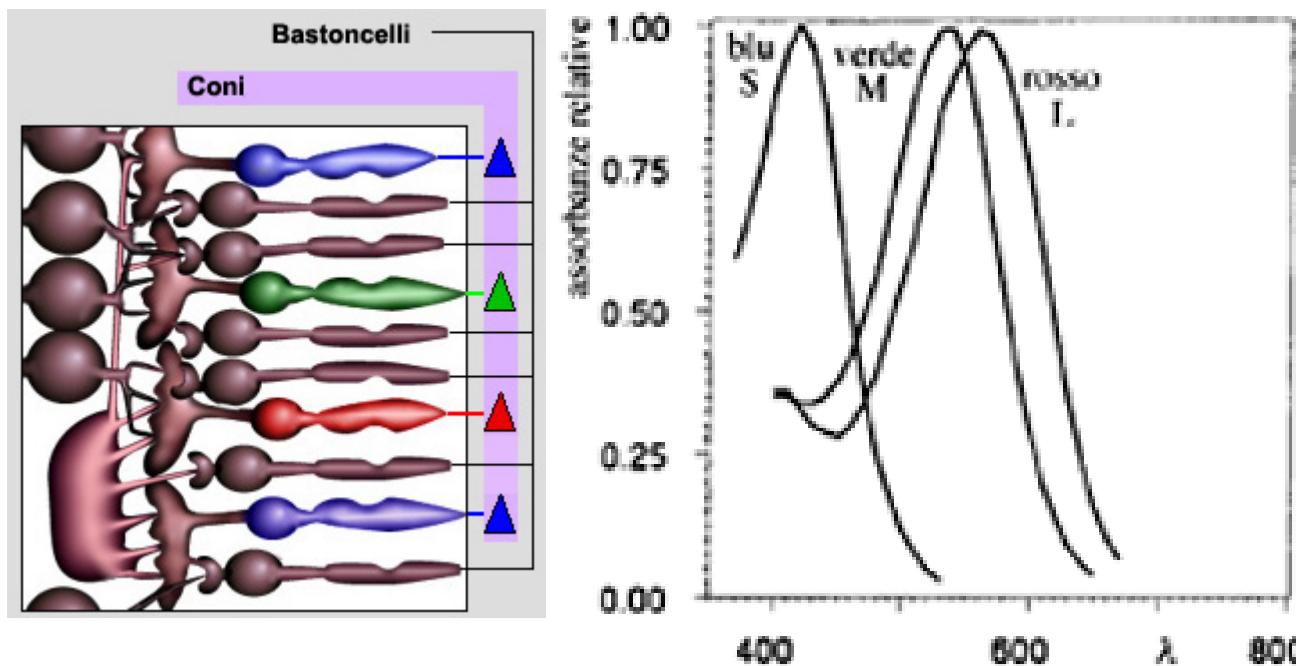
TIPO S: Sensibili alle lunghezze d'onda corte (short, colori bluastri)

TIPO M: Sensibili alle lunghezze d'onda medie (middle, colori verdastri)

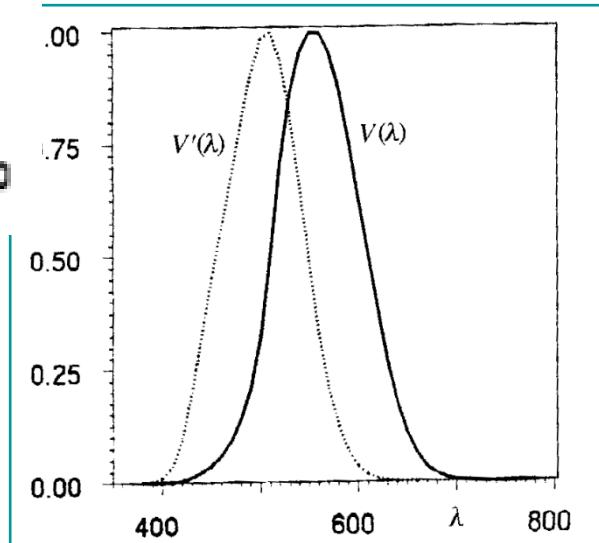
TIPO L: Sensibili alle lunghezze d'onda lunghe (long, colori rossastri)

Tutti i primati hanno questi tre tipi di cellule retinali. I non primati hanno solo due tipi di cellule retinali per i colori mentre gli uccelli ne hanno ben 5 tipi differenti!

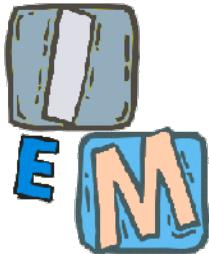
Spettro di assorbimento dei coni



Spettri di assorbimento per i tre tipi di coni, **rosso (L)**, **verde (M)** e **blu (S)**, normalizzati ai rispettivi massimi



Funzioni di efficienza luminosa per **visione fotopica e scotopica**



Teoria del tristimolo (Young, 1802)

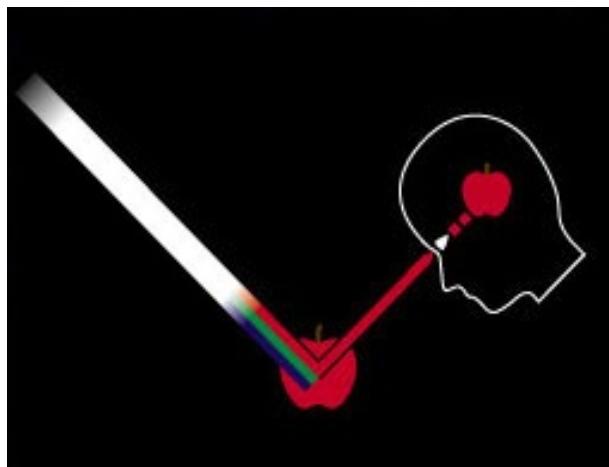
**Tutti i colori si possono ottenere
“mescolando” tre colori fondamentali in
proporzioni differenti.**

Dimostreremo che questa *ipotesi* è *FALSA* se
non in prima approssimazione.

Il colore

A differenza delle misure di lunghezza o di peso, **non esiste una scala fisica per misurare il colore.**

Il colore è una questione di **percezione** o di **interpretazione soggettiva**.

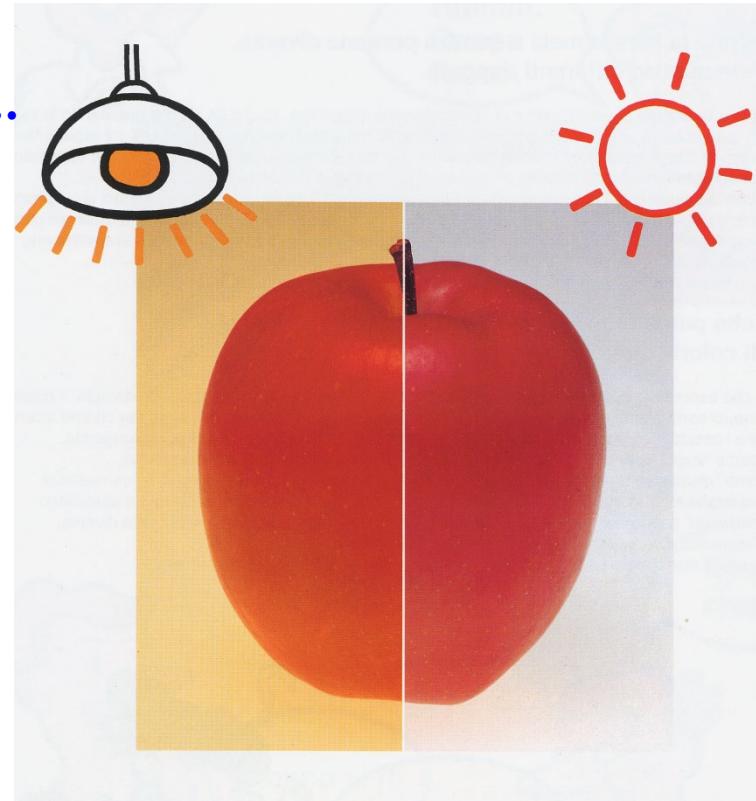


Il riconoscimento dei colori da parte dell'uomo è basato sulla **luce**, sugli **oggetti** che riflettono la luce e sugli **occhi** e il **cervello** dell'osservatore.

Differenze di colore

Differenze di sorgenti luminose

luce solare, lampade ad incandescenza, neon,...



Differenze di osservatore

sensibilità, vista,...

Differenze di dimensioni

Effetto area = colori che ricoprono vaste superfici appaiono più luminosi e vivaci

Differenze di sfondo

Effetto contrasto = colori appaiono più cupi se lo è sfondo scuro

Differenze di direzione

Caratteristiche direzionali di alcune vernici
costanza degli angoli di osservazione e di illuminazione



misure

Composizione dei colori

Illuminando una superficie bianca (coefficiente di riflessione del 100%) con una o più luci monocromatiche si ottiene (per riflessione) una radiazione colorata per

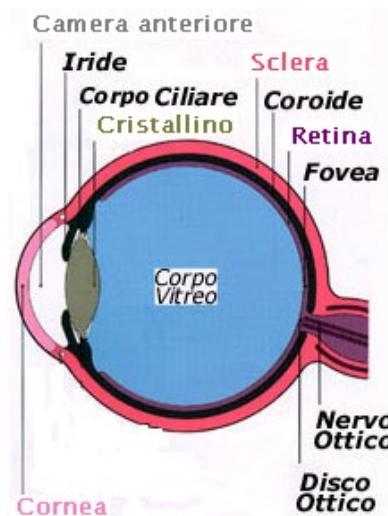
Sintesi Additiva

Qualsiasi luce di spettro complesso può essere ottenuta come “somma” di tre luci monocromatiche agenti simultaneamente.

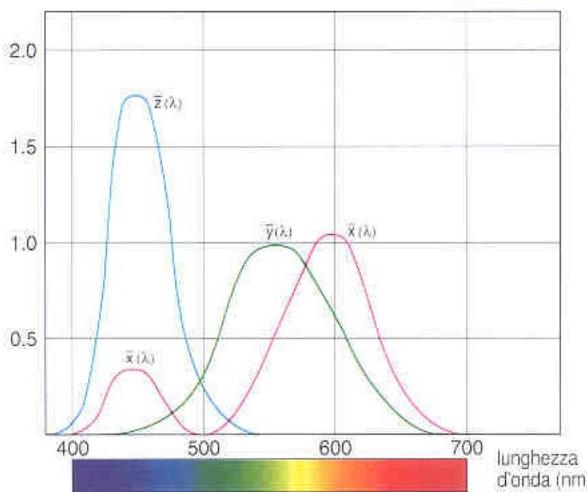
La CIE, partendo dall’ipotesi che tutti i colori possono essere valutati in termini di tre componenti pure, ha scelto le tre radiazioni primarie in modo che le lunghezze d’onda siano il più possibile distanziate nello spettro.

Rosso	700.0 nm
Verde	546.1 nm
Blu	435.8 nm

Colorimetria



- L'occhio è lo strumento umano per la misura del colore.
- La retina ha tre tipi di **coni**.



Sensibilità spettrale dell'occhio umano

valori del tristimolo X, Y, Z

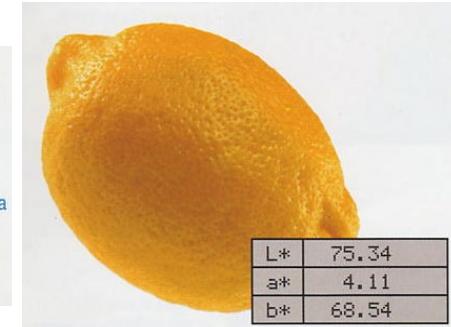
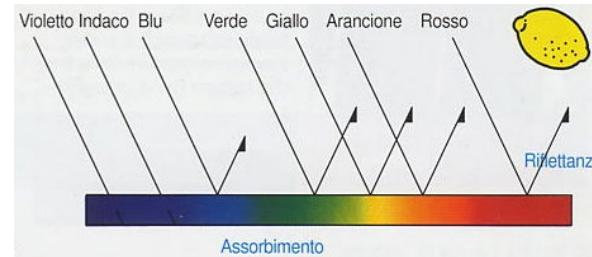
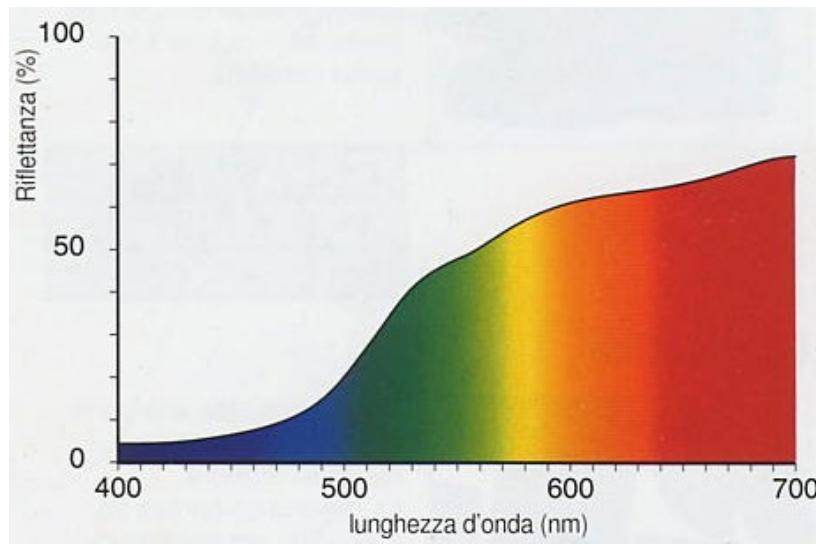
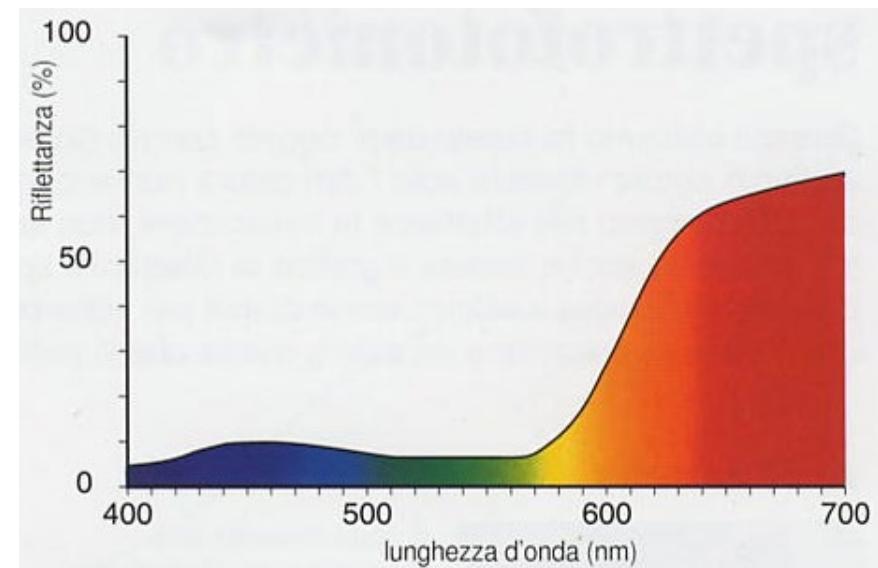
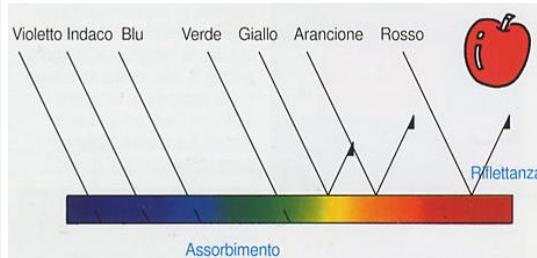
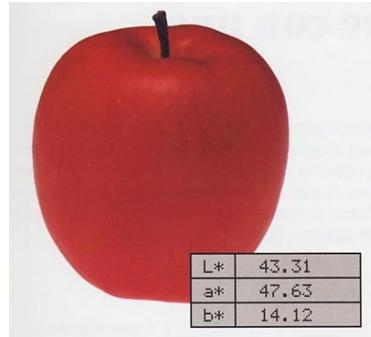
$$X = \int_{380}^{780} L_{e,\lambda} \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int_{380}^{780} L_{e,\lambda} \bar{y}(\lambda) d\lambda = \int_{380}^{780} L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

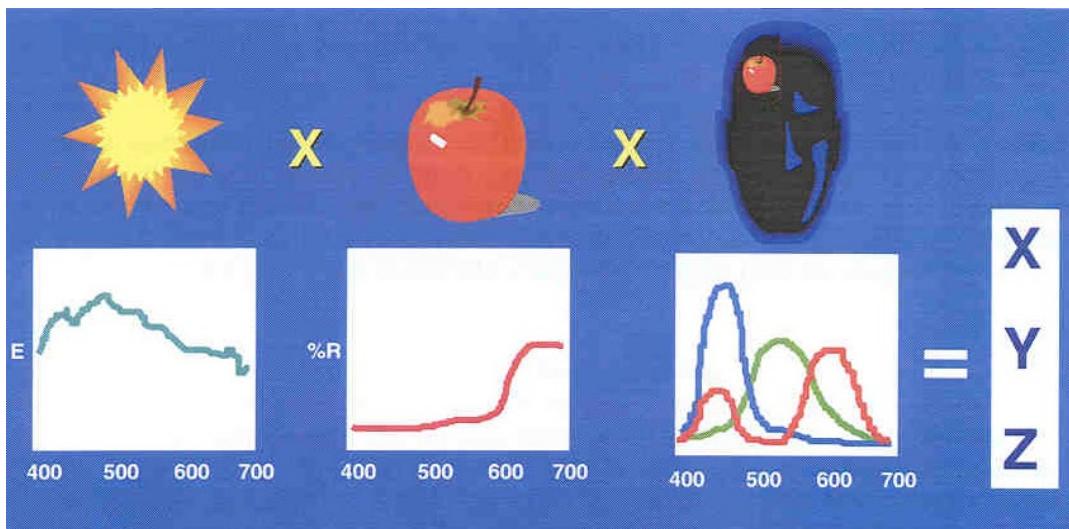
$$Z = \int_{380}^{780} L_{e,\lambda} \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

spazio colorimetrico CIE 1931.

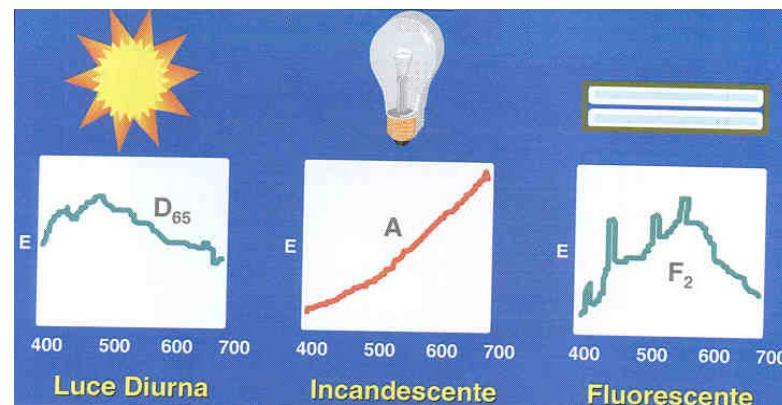
Colore e riflettanza spettrale



Dati colorimetrici

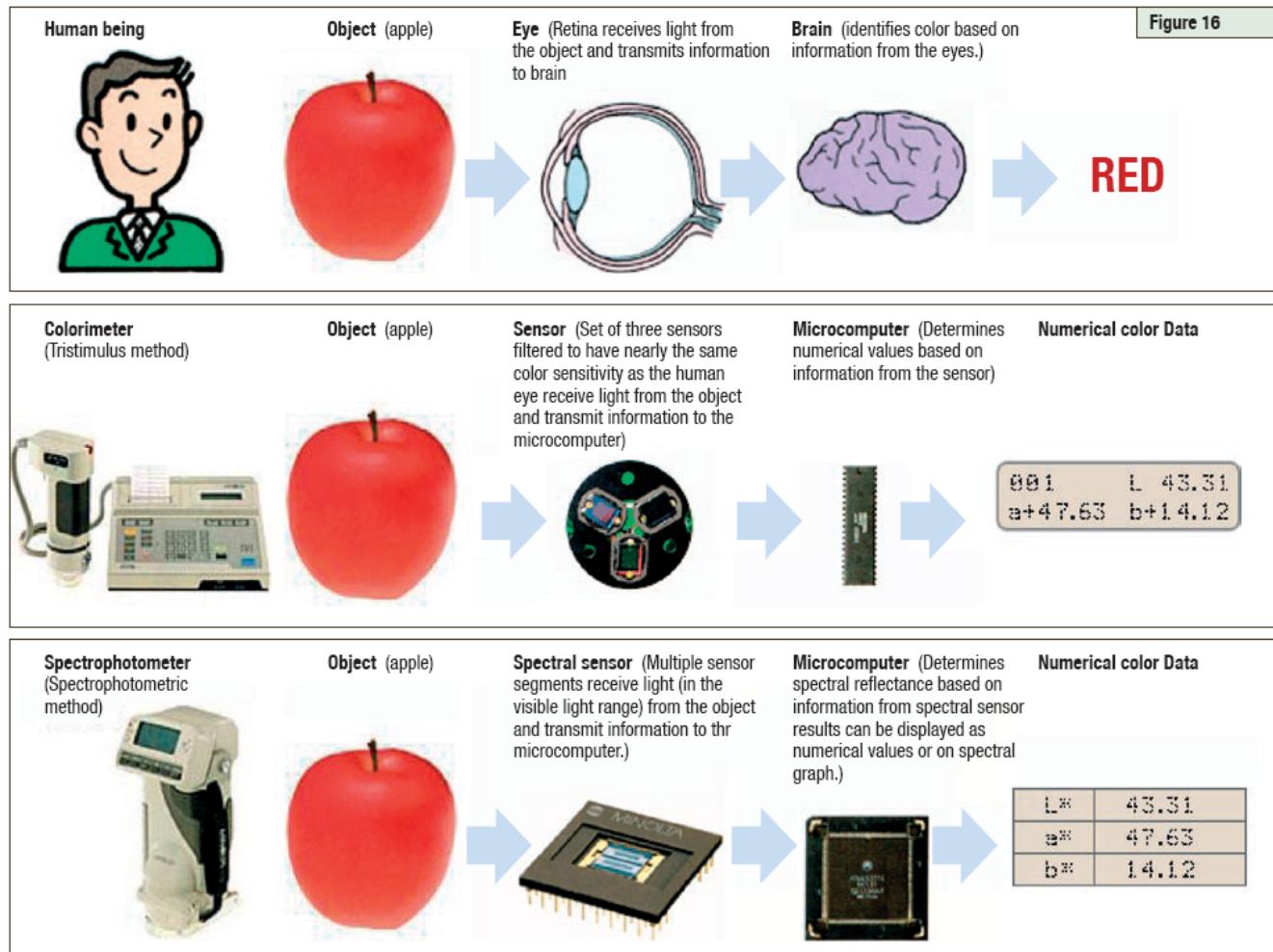

 (L^*, a^*, b^*)

Distribuzione spettrale degli illuminanti più diffusi:



- 1. Distribuzione energetica della luce che lo illumina**
- 2. Curva spettrale dell'oggetto colorato,**
- 3. Sensibilità al colore dell'occhio umano.**

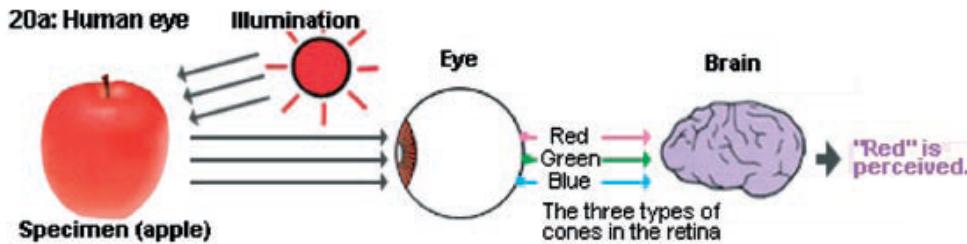
Visione e misura



Visione e misura

Figure 20

20a: Human eye

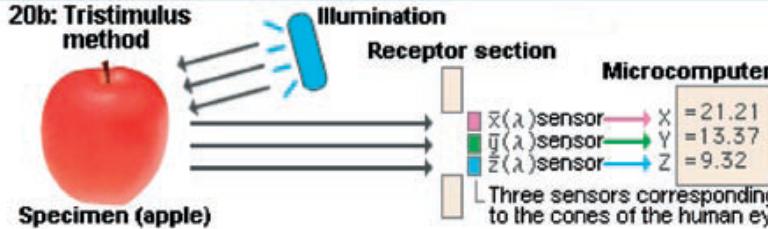


This is how I see color of the apple.



The human eye has a great ability for comparing colors, but there are problems with differences between individuals and memory characteristics.

20b: Tristimulus method

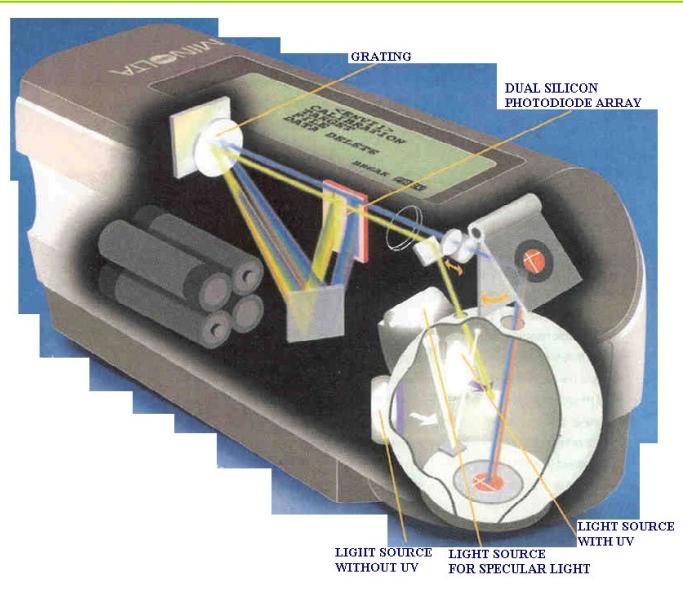
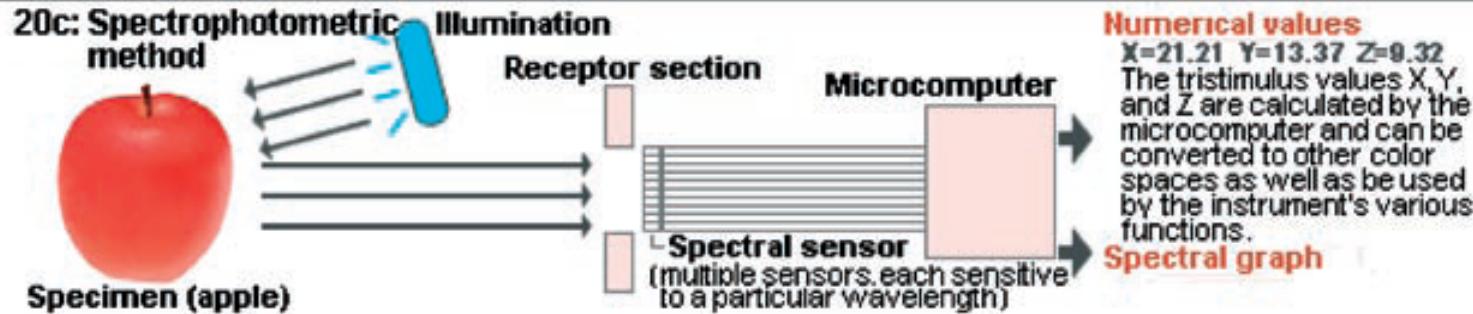


This is how I measure color. It's basically the same as the human eye.



Tristimulus instruments have the advantages of small size and portability. They are used mainly for color-difference measurement in the production and inspection areas.

Visione e misura



- Una **luce** allo Xenon illumina il campione in maniera uniforme;
- La luce riflessa dalla superficie del **campione** viene raccolta da un **sistema di lenti** ed entra nel sensore spettrale principale
- La luce che entra in ciascun **sensore** viene divisa in lunghezze d'onda da un reticolo di diffrazione e convertita in segnale elettrico da una array di fotodiodi

Illuminanti

Illuminante : Energia radiante con distribuzione spettrale di energia relativa definita nel campo di lunghezza d'onda capace di influenzare la visione del colore degli oggetti.

Illuminante CIE : Gli illuminanti colorimetrici A, B, C e D65 sono quelli le cui distribuzioni spettrali di energia relativa sono definite dalla CIE.

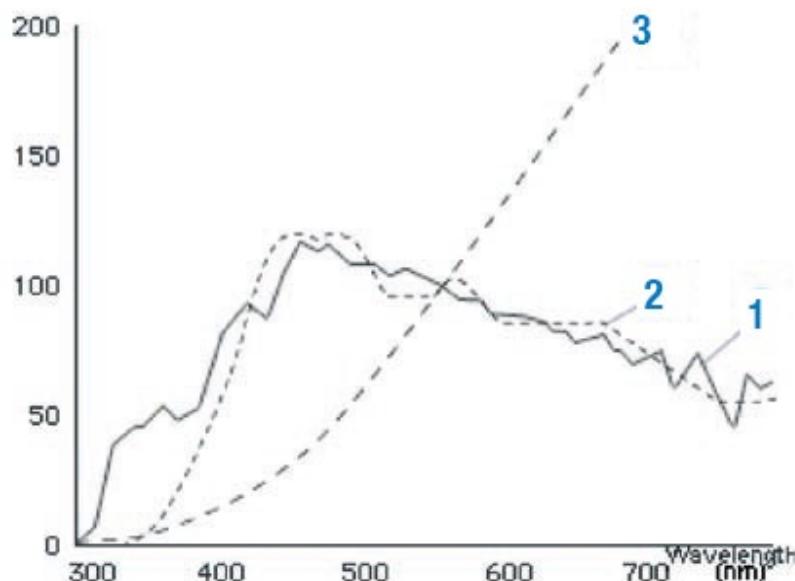


Figure 22a: Standard Illuminants

1 Standard Illuminant Average daylight (including ultraviolet wavelength region) with a correlated color temperature of 6504K; should be used for measuring specimens which will be illuminated by daylight including ultraviolet radiation. **2** Standard Illuminant C Average daylight (not including ultraviolet wavelength region) with a correlated color temperature of 6774K; should be used for measuring specimens which will be illuminated by daylight in the visible wavelength range but not including ultraviolet radiation. **3** Standard Illuminant A Incandescent light with a correlated color temperature of 2856K; should be used for measuring specimens which will be illuminated by incandescent lamps.

Nome	CIE 1931 2°		CIE 1964 10°		CCT (K)	Hue	Note
	x ₂	y ₂	x ₁₀	y ₁₀			
A	0.44757	0.40745	0.45117	0.40594	2856		Incandescente / Tungsteno
B	0.34842	0.35161	0.34980	0.35270	4874		{obsoleta} luce diretta del sole a mezzogiorno
C	0.31006	0.31616	0.31039	0.31905	6774		{obsolete} Average / North sky Daylight
D50	0.34567	0.35850	0.34773	0.35952	5003		Horizon Light. ICC profile PCS
D55	0.33242	0.34743	0.33411	0.34877	5503		Mid-morning / Mid-afternoon Daylight
D65	0.31271	0.32902	0.31382	0.33100	6504		Luce diurna a mezzogiorno: Televisione, sRGB
D75	0.29902	0.31485	0.29968	0.31740	7504		North sky Daylight
E	1/3	1/3	1/3	1/3	5454		Equal energy
F1	0.31310	0.33727	0.31811	0.33559	6430		luce diurna fluorescente
F2	0.37208	0.37529	0.37925	0.36733	4230		Luce Fluorescente bianca fredde
F3	0.40910	0.39430	0.41761	0.38324	3450		luce fluorescente bianca
F4	0.44018	0.40329	0.44920	0.39074	2940		Warm White Fluorescent
F5	0.31379	0.34531	0.31975	0.34246	6350		luce diurna fluorescente
F6	0.37790	0.38835	0.38660	0.37847	4150		Fluorescente bianco chiaro
F7	0.31292	0.32933	0.31569	0.32960	6500		D65 simulatore, simulatore di luce diurna
F8	0.34588	0.35875	0.34902	0.35939	5000		D50 simulator, Sylvania F40 Design 50
F9	0.37417	0.37281	0.37829	0.37045	4150		Cool White Deluxe Fluorescent
F10	0.34609	0.35986	0.35090	0.35444	5000		Philips TL85, Ultralume 50
F11	0.38052	0.37713	0.38541	0.37123	4000		Philips TL84, Ultralume 40
F12	0.43695	0.40441	0.44256	0.39717	3000		Philips TL83, Ultralume 30

Illuminanti

Figure 22b: Fluorescent Illuminants
(recommended by JIS for measurements)

4 F6: Cool white

5 F8: Daylight

6 F10: Three narrow band daylight white

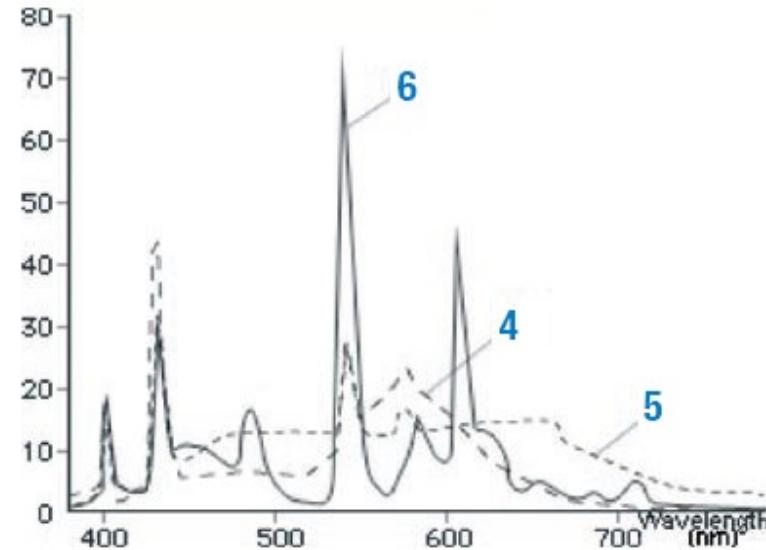
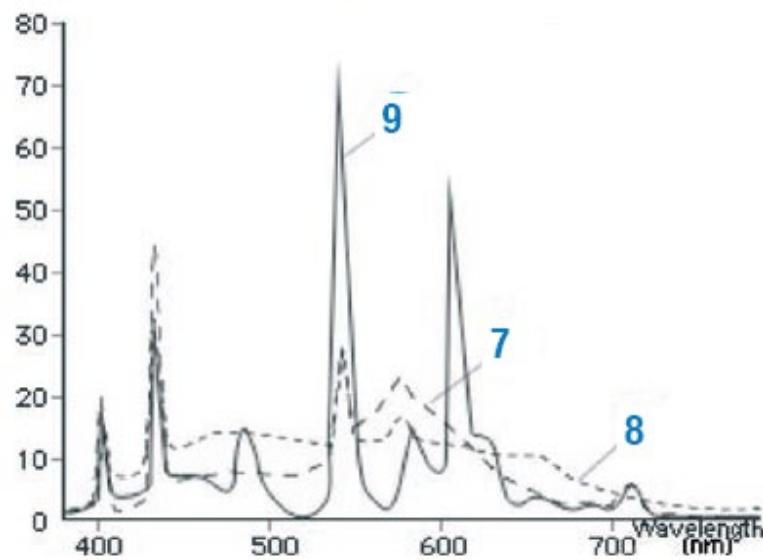


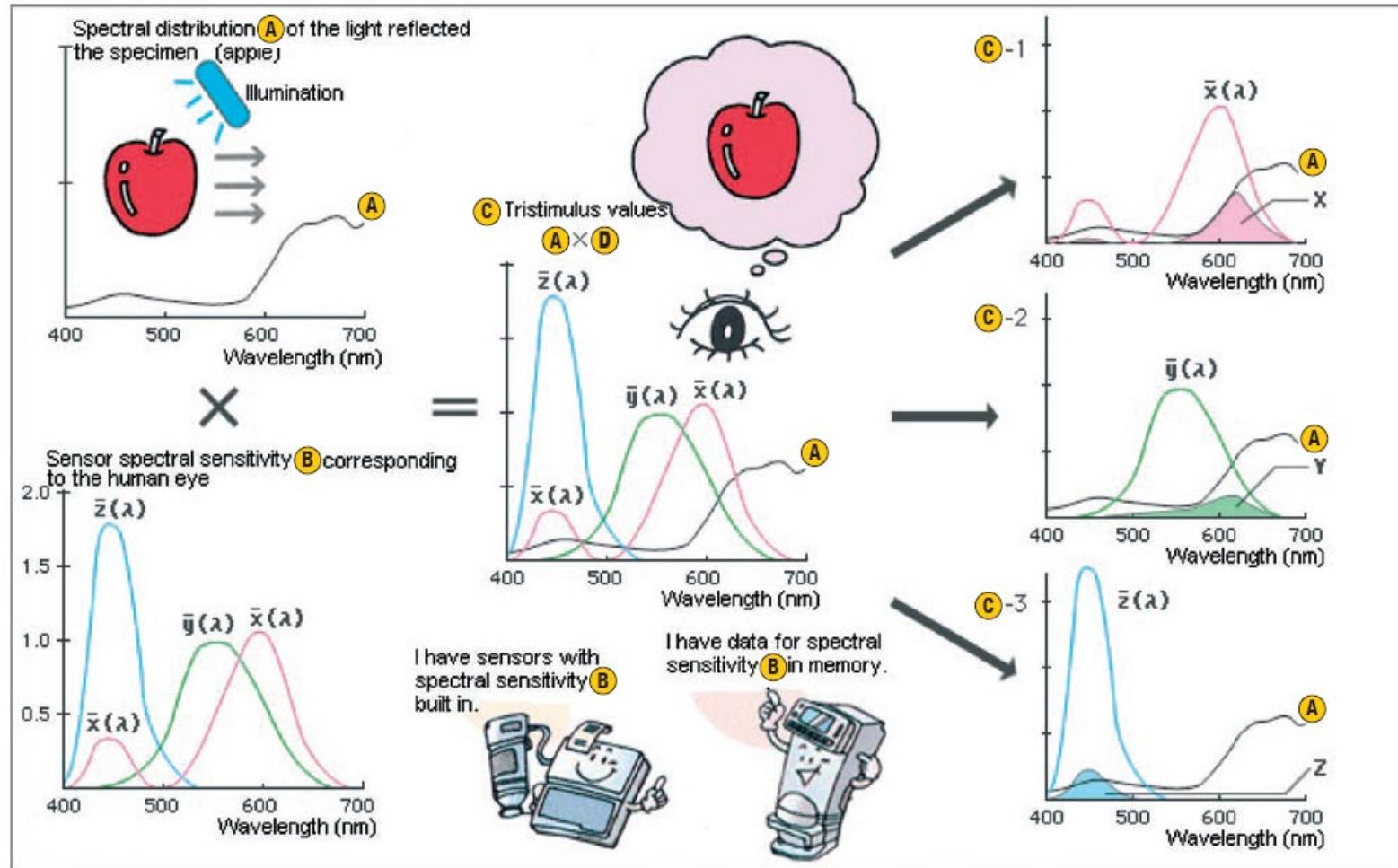
Figure 22c: Fluorescent Illuminants
(recommended by CIE for measurements)

7 F2: Cool white

8 F7: Daylight

9 F11: Three narrow band cool white

Misura

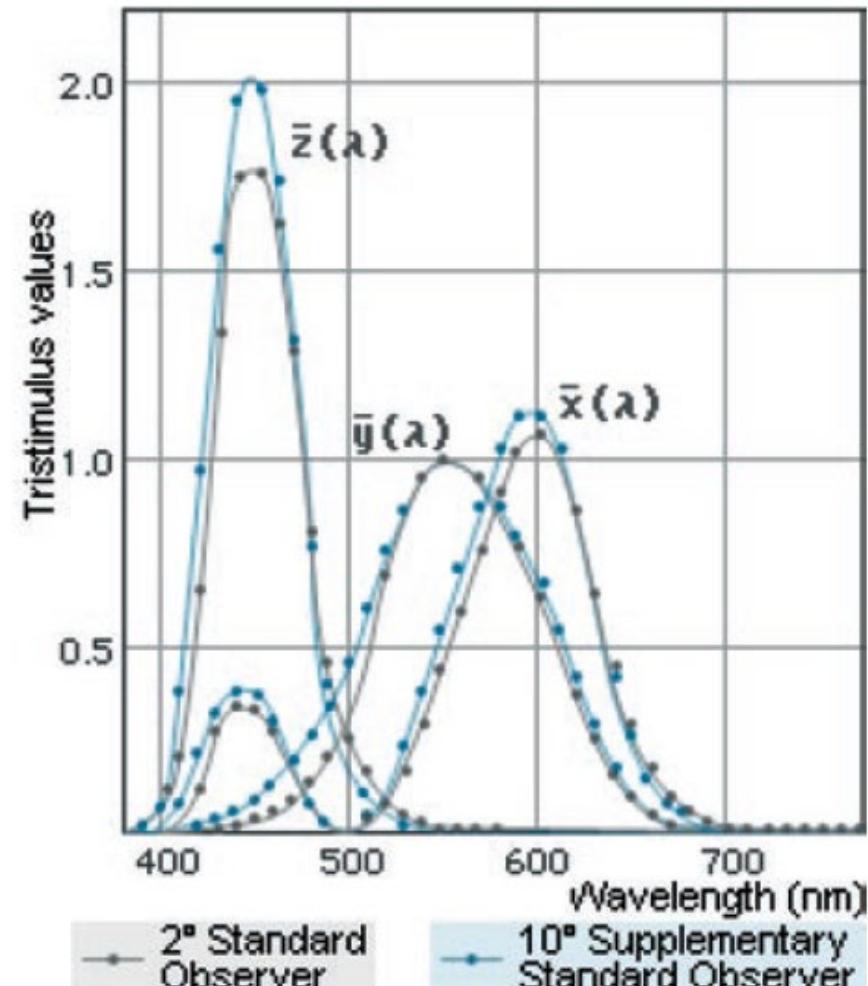


Osservatori Standard e CMF

2° viewing angle



10° viewing angle



CIE 1931 e 1964

XYZ Tristimulus Values (CIE 1931)

$$X = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$

$$Y = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$

$$Z = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$

$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda)}$$

Tristimulus values determined based on the color matching functions $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ and $\bar{z}(\lambda)$ defined in 1931 by CIE; also referred to as 2° XYZ tristimulus values. They are suitable for a viewing angle of 4° or less and are defined for reflecting objects by the following formulas:

where

$S(\lambda)$: Relative spectral power distribution of the illuminant

$\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$: Color-matching functions for CIE 2° Standard Observer (1931)

$R(\lambda)$: Spectral reflectance of specimen

X₁₀ Y₁₀ Z₁₀ Tristimulus Values (CIE 1964)

$$X_{10} = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{x}_{10}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$

$$Y_{10} = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$

$$Z_{10} = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{z}_{10}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$

$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda) d(\lambda)}$$

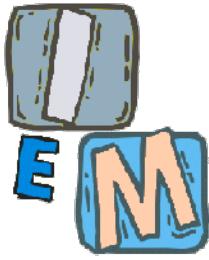
Tristimulus values determined based on the color matching functions $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ and $\bar{z}(\lambda)$ defined in 1964 by CIE; also referred to as 10° XYZ tristimulus values. They are suitable for a viewing angle of more than 4° and are defined for reflecting objects by the following formulas:

where

$S(\lambda)$: Relative spectral power distribution of the illuminant

$\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$: Color-matching functions for CIE 10° Supplementary Standard Observer (1964)

$R(\lambda)$: Spectral reflectance of specimen



Standard CIE

- Nel 1931 il CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) ha fissato le lunghezze d'onda standard per i tre colori primari:

Blue = 435,8 nm

Verde = 546,1 nm

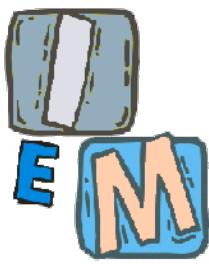
Rosso = 700 nm

- Anche se nel 1964 i dati sperimentali hanno dimostrato che in realtà il valore reale è lievemente differente.

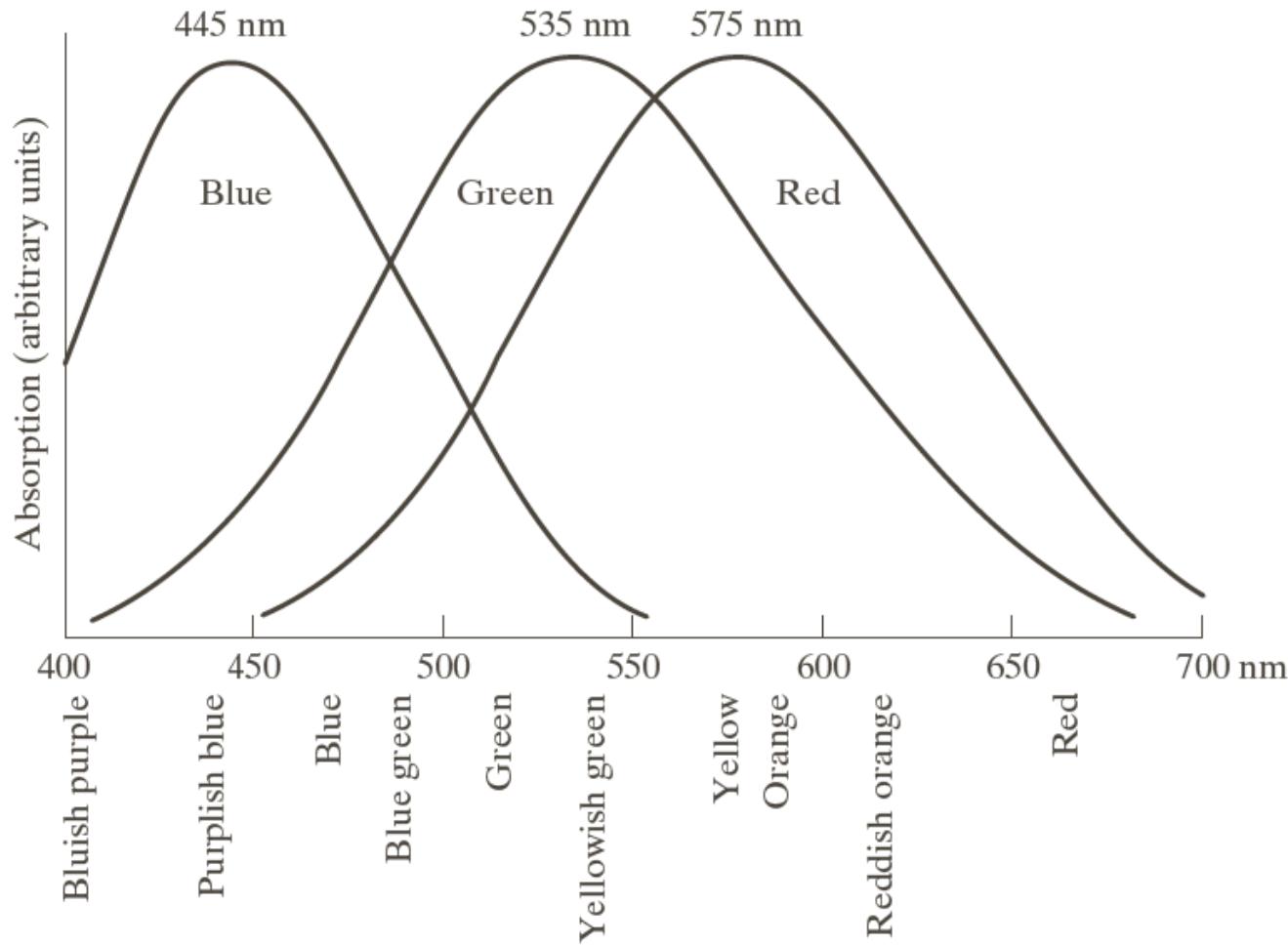
Blue = 445 nm

Verde = 535 nm

Rosso = 575 nm



Standard CIE



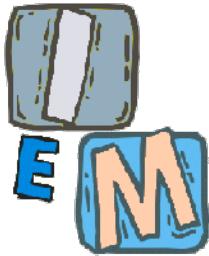


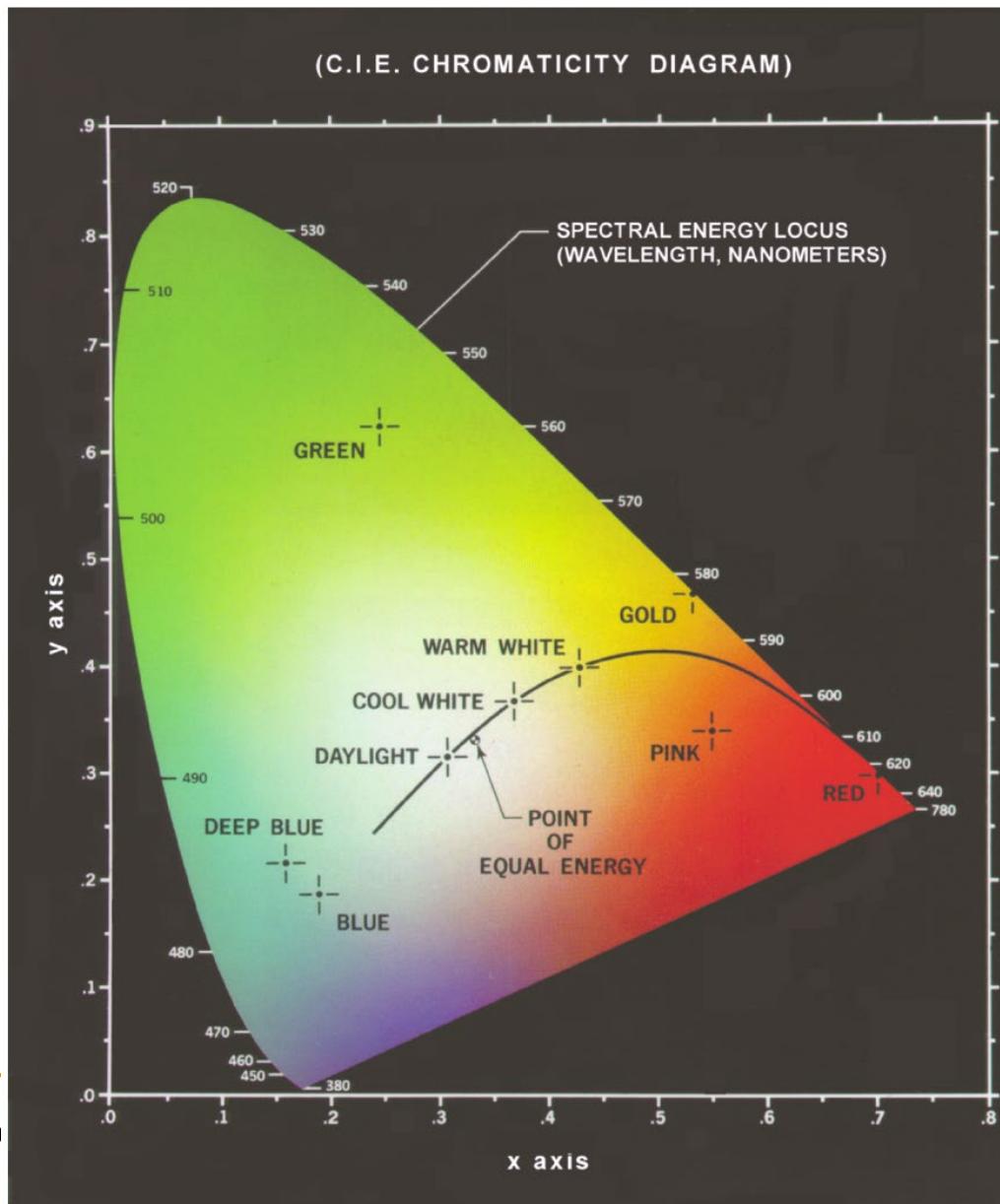
Diagramma cromatico CIE

- Se x è la quantità di rosso
- Se y è la quantità di verde
- z è la quantità di blu ottenuta come
$$z = 1 - (x + y)$$
- La rappresentazione grafica al variare di x e y da origine al diagramma cromatico CIE



Diagramma cromatico CIE

- Tutti i colori delle lunghezze d'onda visibili sono disposti lungo i bordi.
- Il punto di uguale energia è il bianco.
- Qualsiasi colore lungo il bordo non ha bianco, quindi è puro.



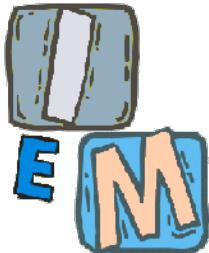


Diagramma cromatico CIE

- Unendo due colori con una linea, tutti i colori nella linea sono quelli ottenibili mischiando i due colori.
- Unendo un colore con il bianco si ottengono tutte le tonalità di quel colore

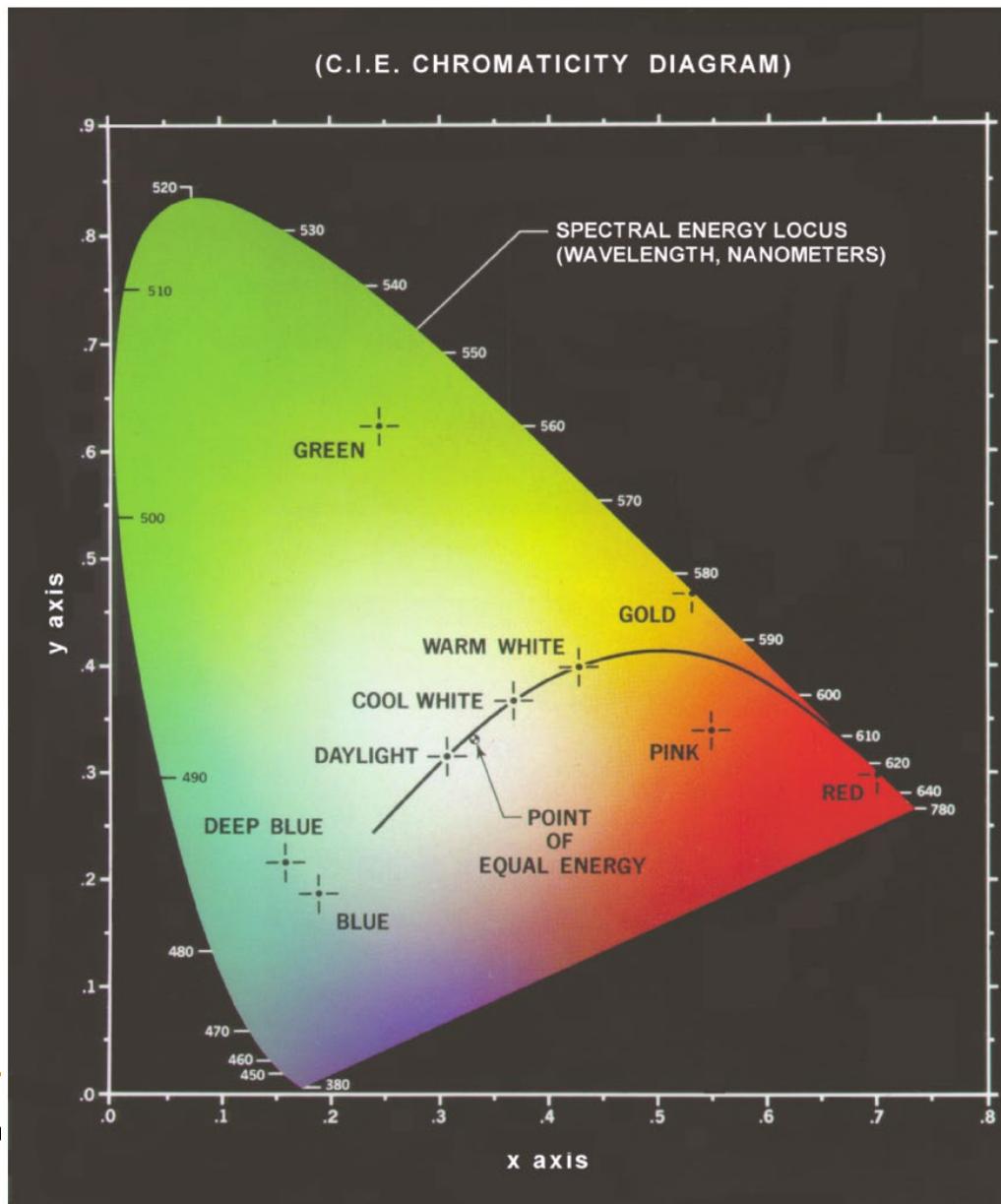
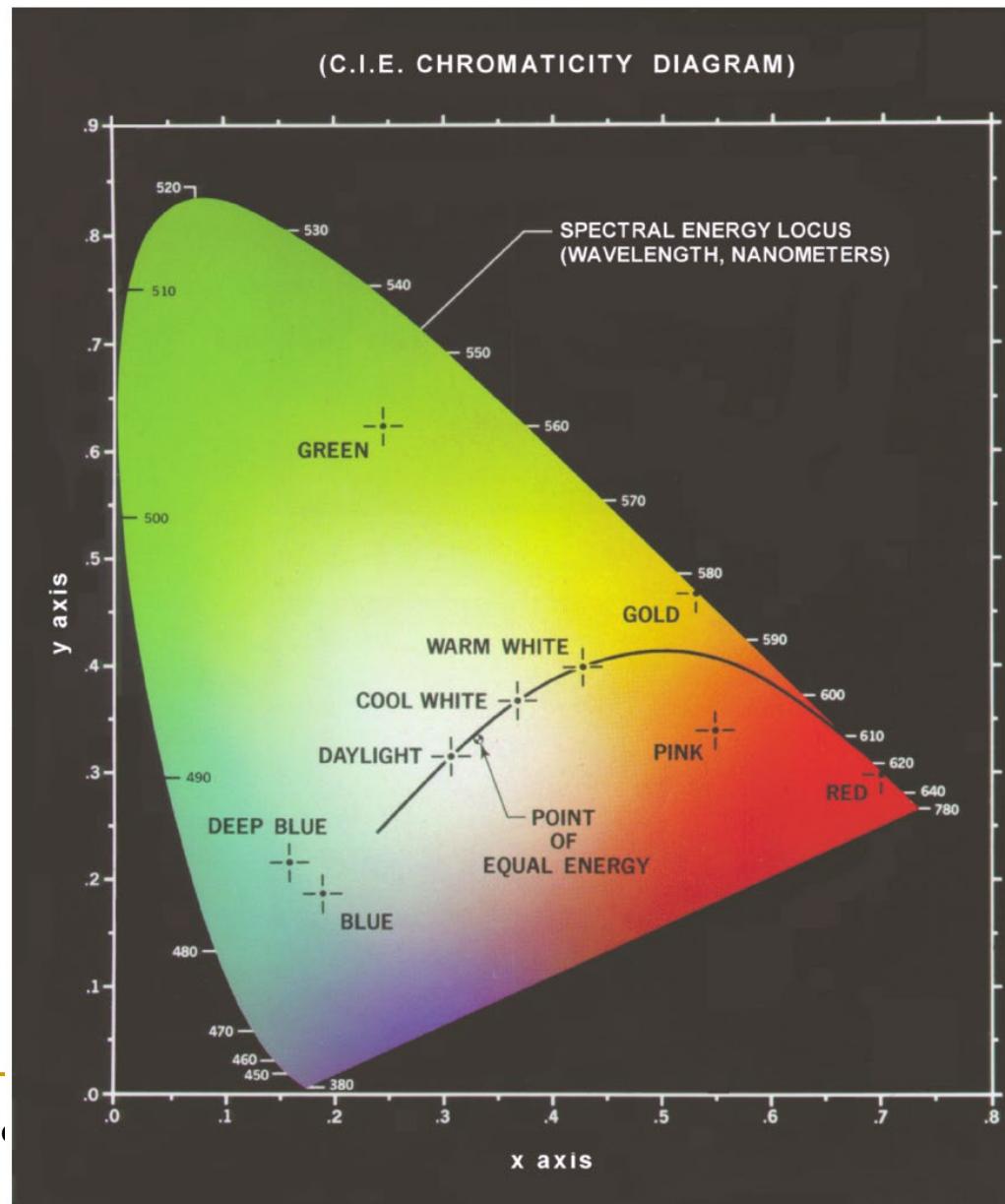




Diagramma cromatico CIE

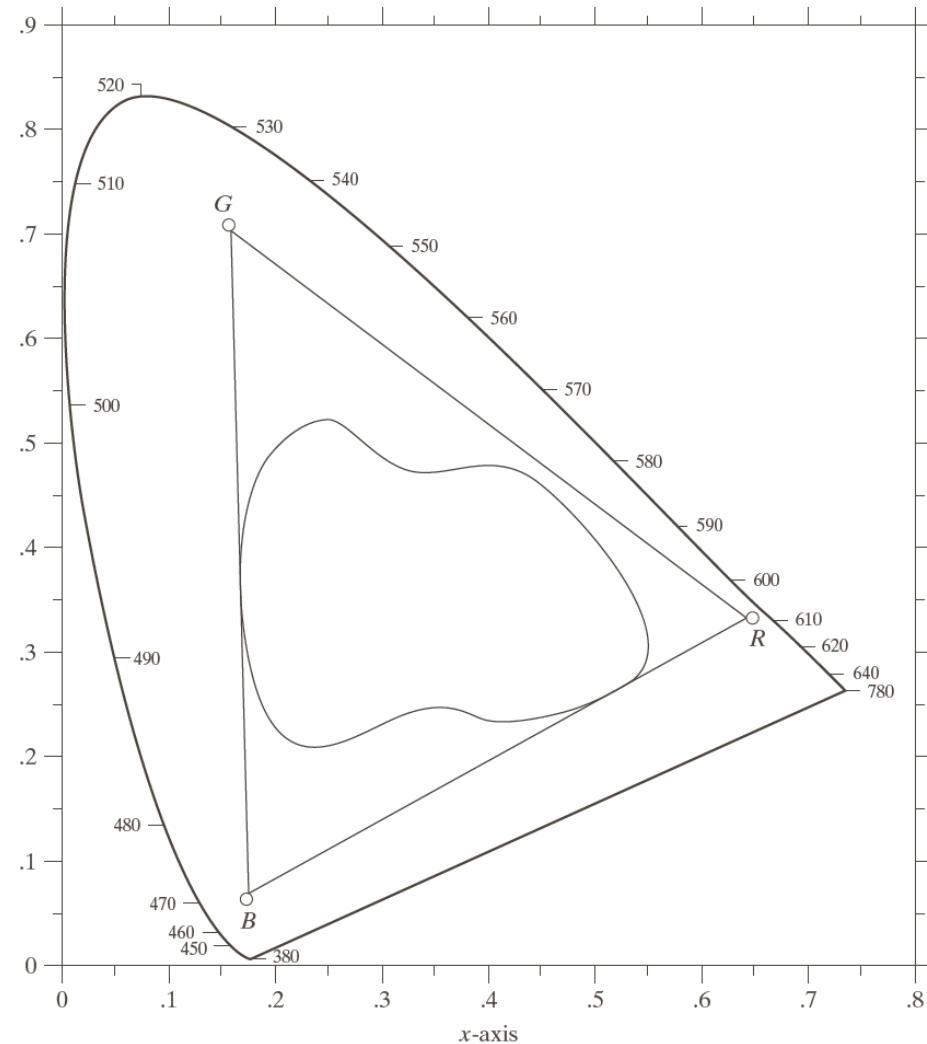
- Unendo tre colori con un triangolo, tutti i colori lungo il bordo e nel triangolo sono quelli ottenibili mischiando quei tre colori.

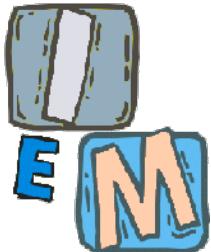




Color gamut

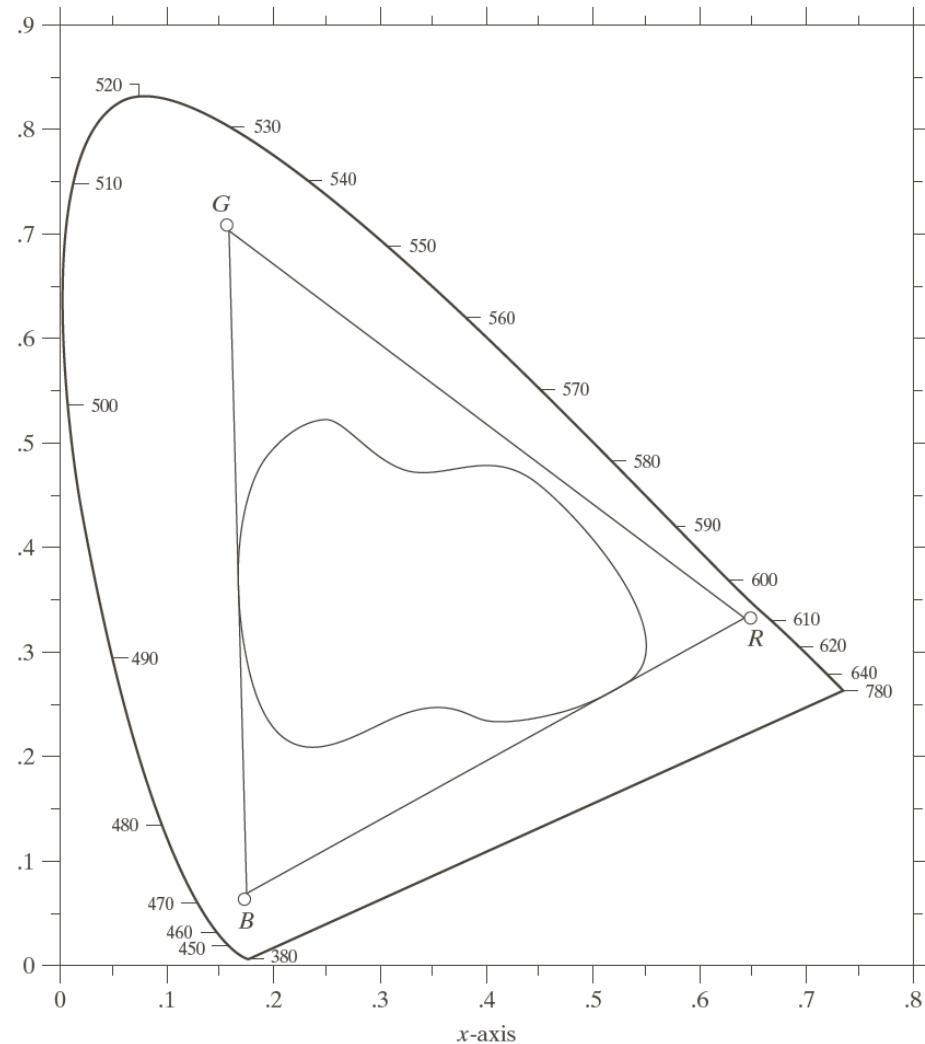
- Unendo R G e B si ottiene un triangolo che contiene tutti i colori che si possono produrre.
- Da notare che il triangolo non copre tutta l'area, quindi non tutti i colori si ottengono unendo R G e B.





Color gamut

- L'area irregolare dentro il triangolo rappresenta tutti i colori che una stampante può ottenere.
- Questi sono in numero minore rispetto a quelli dei monitor perché è differente il modo di mischiare i colori (additivo vs sottrattivo).

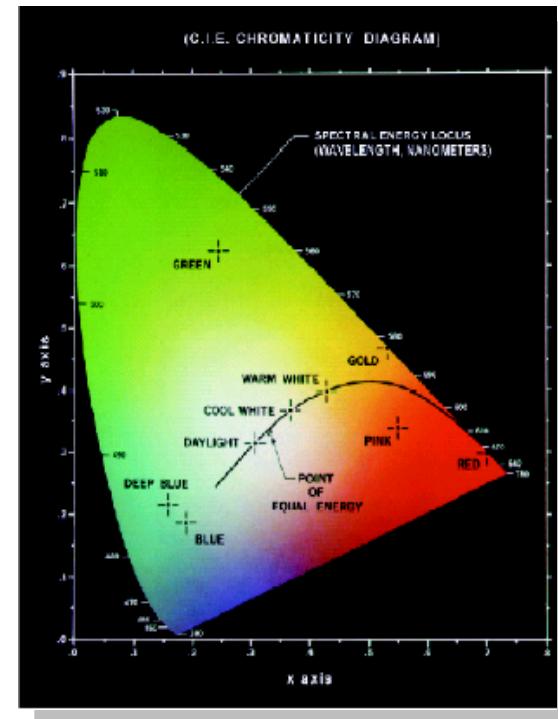


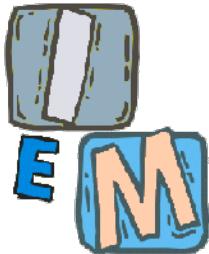


Spazio CIE xyz

Un colore può essere specificato mediante dei coefficienti tricromatici. I valori di tristimolo necessari a rappresentare il colore corrispondente ad una certa lunghezza d'onda possono essere determinati da curve, tabelle e diagrammi determinati sulla base di una estesa sperimentazione, condotta in particolare negli anni'60. Uno di essi è il diagramma CIE di cromaticità, che mostra la composizione di un colore in funzione di x e y , mentre il corrispondente valore di z è calcolato direttamente dalla $z = 1 - (x + y)$. Il diagramma di cromaticità CIE 1931, è solo una "fetta" di uno spazio più completo, lo spazio dei colori CIE 1931 al quale si assegnano le coordinate XYZ.

La sua proiezione su un piano è un diagramma di cromaticità xy. Le relazioni per passare dalle coordinate tridimensionali XYZ alle coordinate xy sono: $x = X/(X+Y+Z)$, $y = Y/(X+Y+Z)$.





Modelli del Colore

- Scopo di un modello del colore (o *spazio dei colori* o *sistema dei colori*) è di consentirne la specificazione dei colori con modalità standardizzate, che fanno normalmente riferimento ad un sistema di coordinate 3-D (dato che tre sono comunque le caratteristiche che definiscono un colore), o meglio ad un suo sotto-spazio, nel quale ogni colore è rappresentato da un punto.
- I modelli del colore più utilizzati in image processing sono orientati o all'hardware di acquisizione (RGB) e restituzione (RGB, CMY) delle immagini o alla loro trasmissione (YUV, YIQ), compressione (YCbCr), elaborazione (od analisi) mediante trattamento del colore (RGB, HSI, HSV, LUV, ...).
- Alla poca chiarezza derivante dalla abbondanza di modelli dello stesso tipo, si aggiunge l'uso ambiguo delle lettere nei nomi dei modelli (I o V significano cose diverse in modelli diversi), e soprattutto il fatto che in letteratura esistono differenti versioni delle equazioni di conversione dall'uno all'altro dei modelli indicati.



CIE L*a*b*

- Il principale difetto del sistema CIE (e di tutti i modelli del colore da esso derivati mediante trasformazioni lineari o non lineari di coordinate) è che esso non è dotato di uniformità percettiva.
- In altre parole, dati due colori C_1 e C_2 , consideriamone le distanze ΔC , rispettivamente, dal colore $C_3 = C_1 + \Delta C$ e dal colore $C_4 = C_2 + \Delta C$. Supponendo che le due distanze siano quantitativamente uguali, sarebbe desiderabile che i due colori C_3 e C_4 fossero percepiti come ugualmente distanti da C_1 e C_2 . Dato che il sistema non è percettivamente uniforme, in generale le due distanze, benchè uguali, saranno percepite come differenti.
- Dopo molti anni di elaborazione, la CIE ha standardizzato nel 1976 due spazi di colore percettivamente uniformi, chiamati rispettivamente CIE $L^*u^*v^*$ e **CIE L*a*b*** (u e v non hanno alcuna relazione con le componenti video U e V)



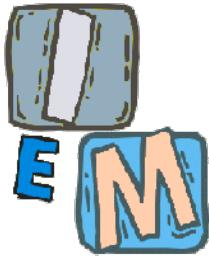
Formule

- Attraverso le seguenti formule, si può passare dallo spazio colore CIE XYZ allo spazio colore CIELAB, e viceversa

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 \quad a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

- Dove X/X_n , Y/Y_n , e Z/Z_n , sono maggiori di 0.01 e X_n , Y_n e Z_n definiscono il punto bianco. Lo spazio colore CIELAB in confronto al CIE XYZ rispetta maggiormente la risposta non lineare dell'occhio umano alle radiazioni elettromagnetiche.
- La metrica CIELAB si ottiene dalla seguente formula:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$



ΔE^* _{a,b} CIELAB

La metrica ΔE^* _{a,b} CIELAB lavora sullo spazio colore CIELAB. Differentemente da altri spazi colore, lo spazio colore CIELAB, è ***percettivamente uniforme***. I parametri che lo determinano sono: L*, a*, b*.

L* rappresenta la **luminanza** mentre a* e b* rappresentano la **crominanza**.

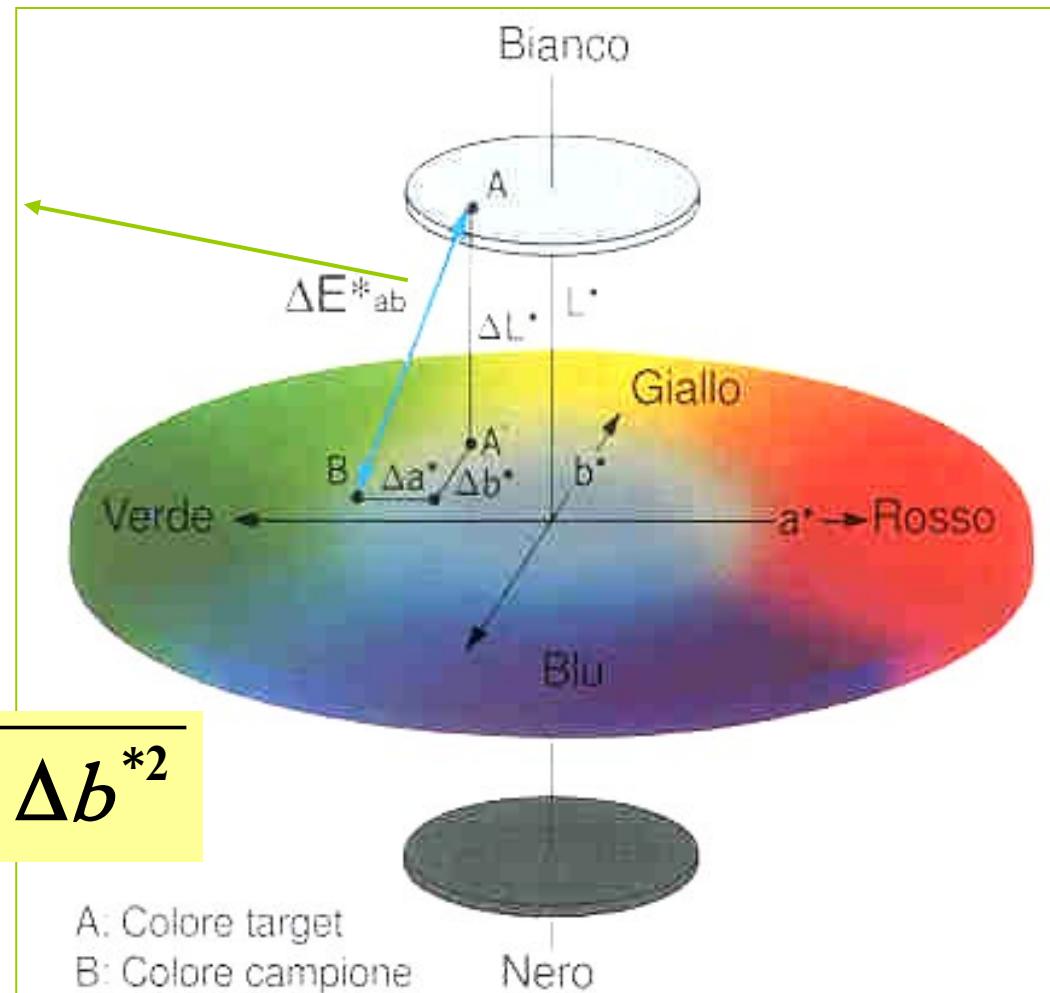
L*, a* e b* sono le trasformazioni dei tre valori di tristimolo X, Y e Z dello spazio colore CIE XYZ.

Differenze di colore

Nello spazio CIELAB le differenze di colore sono definite come distanza tra due punti dello spazio L*a*b*

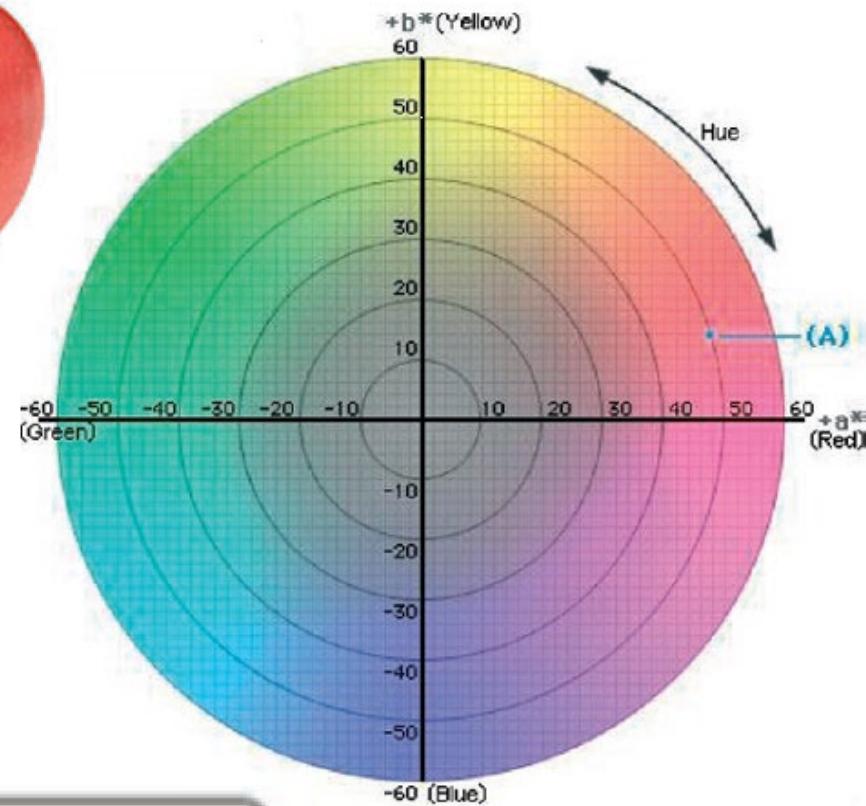
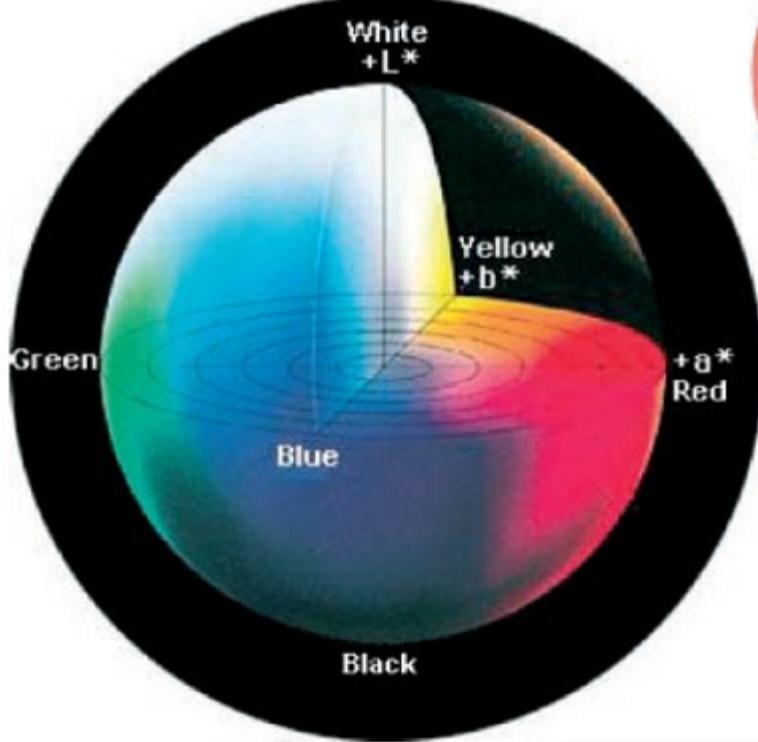


$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$



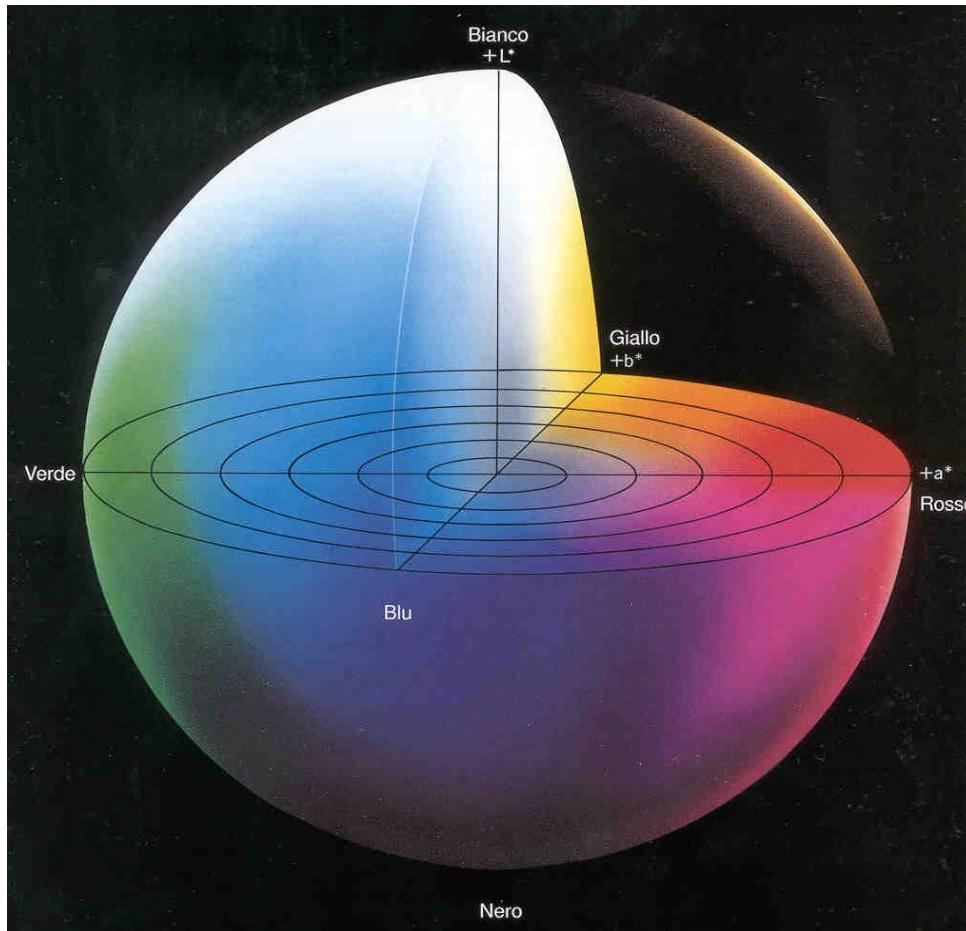
- Uguali differenze corrispondono a uguali differenze di percezione.
- Questo è un pregio di questo sistema.
- Delta E=1 accettato nell'industria dei cosmetici
- Delta E=0,01 accettato nella Ferrari
- Tra zero e 1 per il packaging o negli indumenti Benetton

L*a*b* color space



001	L 43.31
+47.63	b +14.12

Spazio CIELAB L*a*b* (1976)



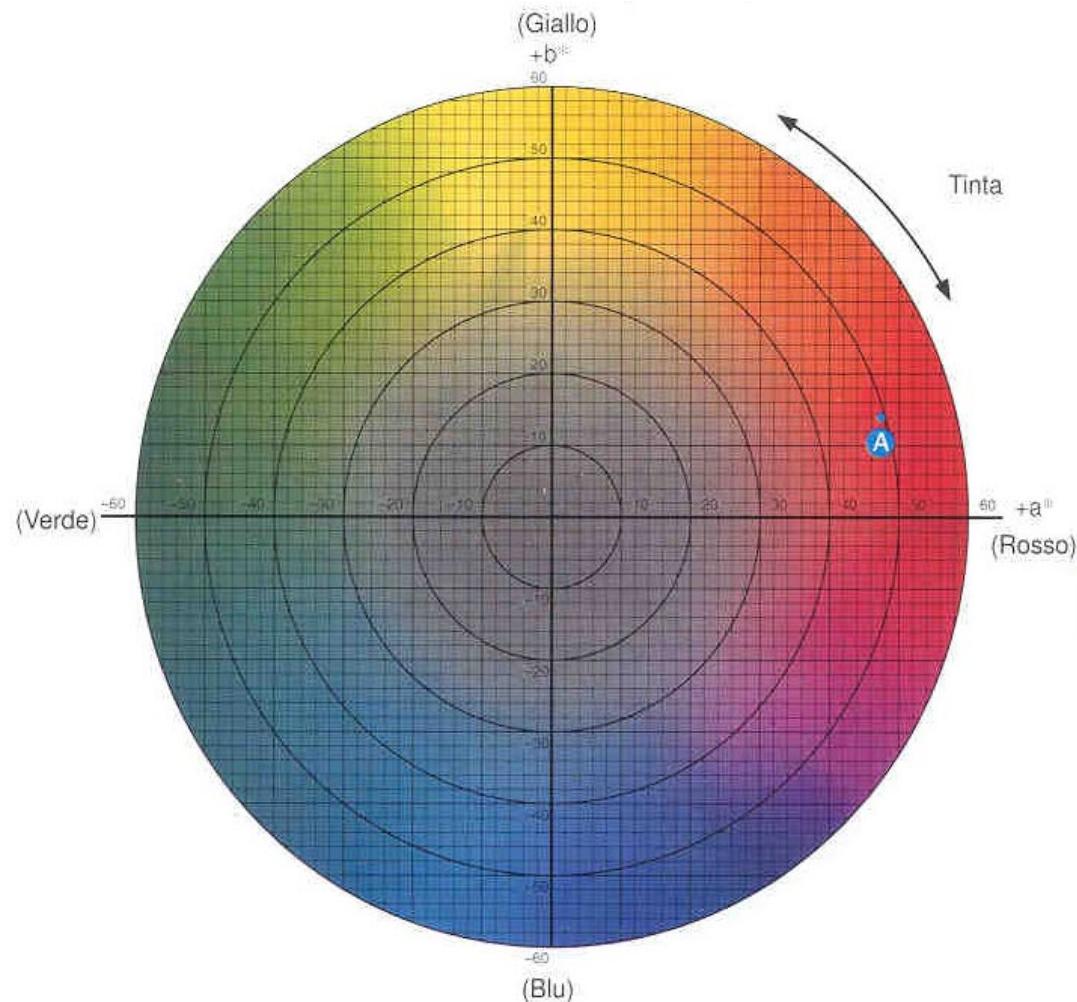
L*=luminosità

L del nero è = 0

L del bianco è = 100

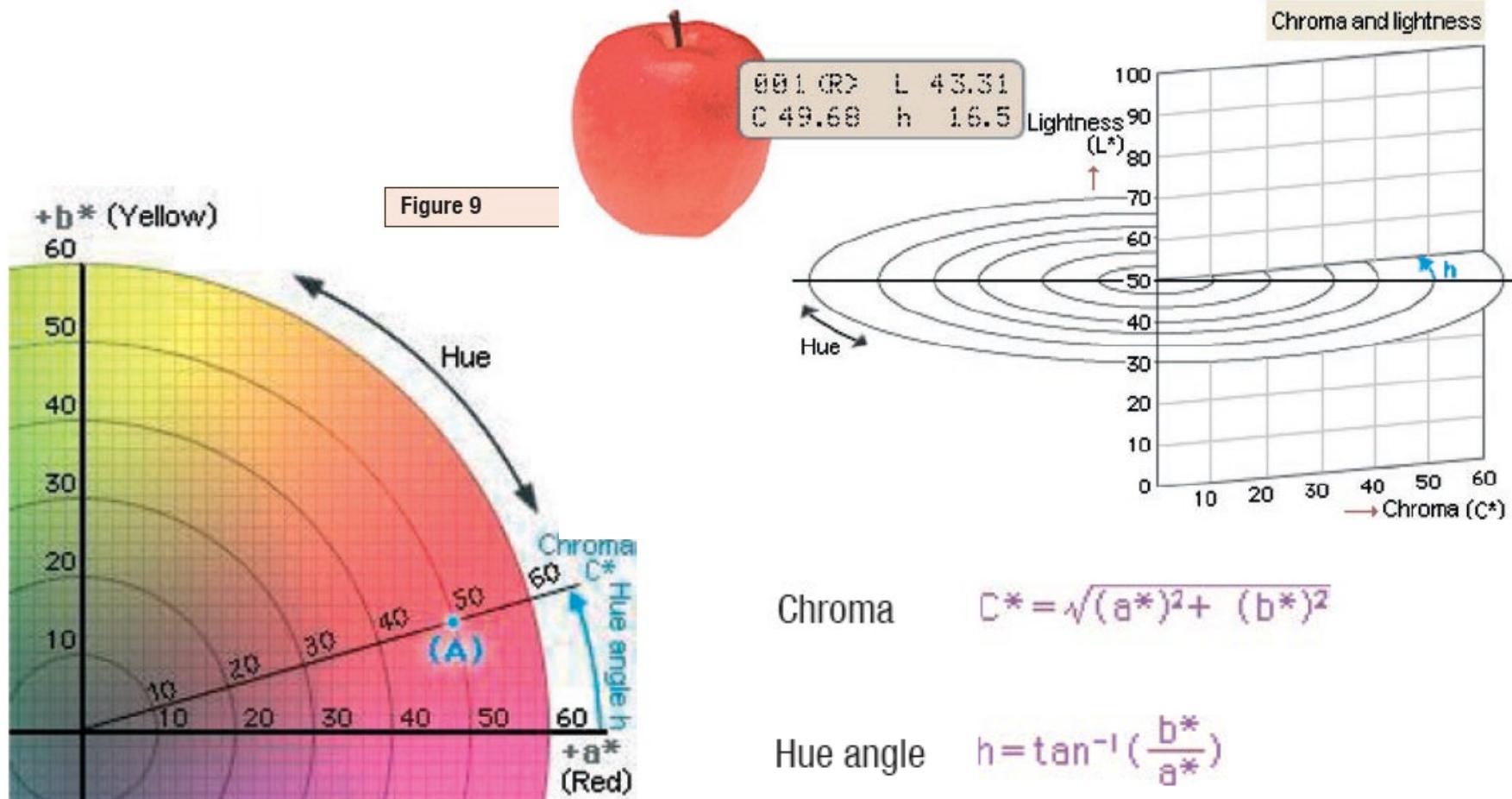
a* e b* = coordinate di cromaticità

Spazio CIELAB L*a*b* (1976)

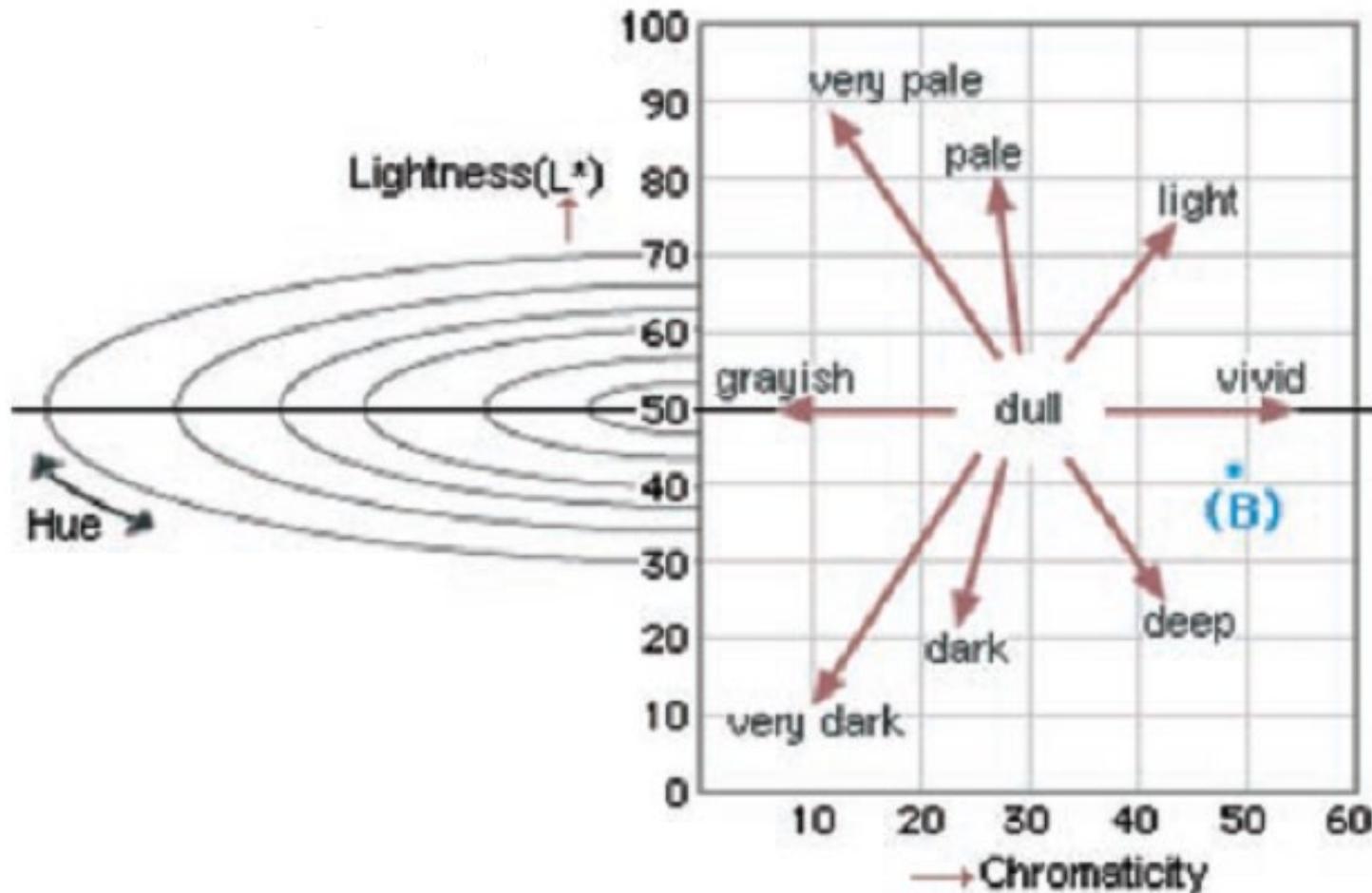


**Piano cromatico
a $L^*=50$**

L*C*h color space



L*C*h color space



Il bianco e il nero

Quali sono le coordinate del nero ?

Il nero matematico è rappresentato dal tristimolo X=0,Y=0,Z=0.

Nessun corpo reale possiede questa specificazione.

Il nero "fisico", cioè quello di un corpo di cui si misura il fattore di riflessione spettrale e si calcola il tristimolo è diverso e dipende dal corpo:

- Il fattore di riflessione spettrale di un corpo nero è dell'ordine di un qualche per cento (3-5%)
- Il nero più nero è del velluto nero
- La tavoletta nera standard dell'NPL ha un fattore di riflessione 0.15% - 4.00% nell'intervallo 320nm - 780nm (geometria 8/d). La corrispondente specificazione colorimetrica per osservatore CIE 31 ed illuminante D65 è:

$$(x,y,Y\%)=(0.2940, 0.3258, 0.47) \text{ e } (L^*,a^*,b^*)=(4.2,-0.9,-0.5)$$

e questi dati cambiano se si cambia geometria...

Il bianco e il nero

Analogamente per il bianco si pone la stessa domanda, quale bianco?

Bianco equienergetico, per il quale la distribuzione spettrale di potenza è 1 ed a cui corrisponde ($X=1, Y=1, Z=1$), ($x=1/3, y=1/3, Y=1$).

Diversamente il bianco è quello associato all'illuminante scelto, la cui specificazione colorimetrica, per gli illuminanti standard CIE, è data (vedi Oleari, 2008).

Per quanto riguarda i corpi reali si considera il fattore di riflessione:

- la tavoletta ideale lambertiana ha un fattore di riflessione uguale per tutte le lunghezze d'onda, vale 1 o 100%, e la sua specificazione colorimetrica è uguale a quella dell'illuminante considerato.
- la tavoletta standard bianca NPL ha il fattore di riflessione che varia tra 78.71%@400nm e 86.11%@700nm nella geometria 8/d e la sua specificazione per l'osservatore CIE 31 e l'illuminante D65 vale

$$(x,y,Y\%)=(0.3145, 0.3318, 85.56) \text{ e } (L^*, a^*, b^*)=(94.1, -0.4, +1.3)$$

Il bianco e il nero

L'osservatore e l'illuminante devono essere scelti, perché diversamente non c'è misurazione del colore

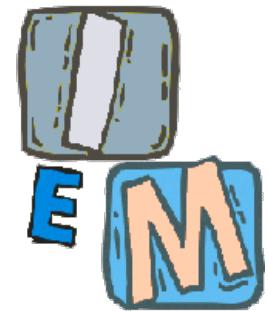
Quale osservatore scegliere?

- Per oggetti da vedersi in modo analitico, cioè quasi tutti gli oggetti che rientrano tra i beni culturali, l'osservatore è il CIE 1931.
- Per oggetti di grandi superfici, quali oggetti architettonici e forse anche affreschi destinati ad essere visti da lontano, l'osservatore è il CIE 64.

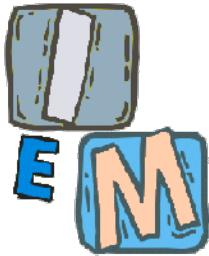
L'illuminante classico per tutti gli usi è il D65.

L'atlante di Munsell è definito per l'osservatore CIE 64 e l'illuminante D65.
Le sue proprietà dal punto di vista percettivo non valgono più se si opera in condizioni differenti

Le comparazioni visive vanno fatte in situazione visiva controllata



Gli spazi di colore

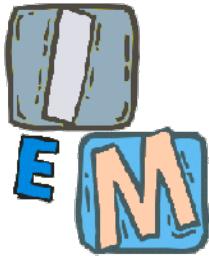


In realtà:

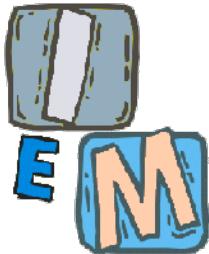
Raramente vediamo in natura colori puri. Ma piuttosto vediamo miscele di radiazione luminosa in ogni lunghezza d'onda.

Il nostro cervello non è uno “spettrometro”:

- spettri differenti producono sensazioni cromatiche eguali;
- manteniamo una percezione costante del colore di una superficie anche se cambia la luce che la illumina.

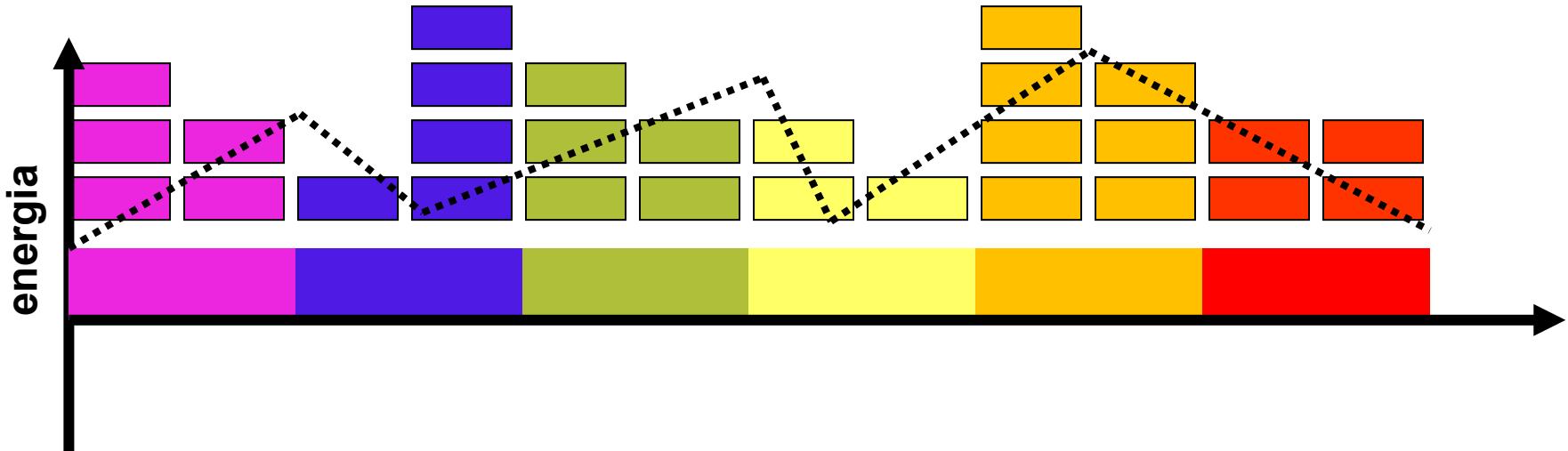


- **Ogni lunghezza d'onda trasporta differenti quantità di energia.**
- **La energia totale della radiazione è la somma di tutti i contributi di energia dalle diverse lunghezze d'onda.**
- **Lo “spettro” di un illuminante è il diagramma dei contributi di energia che esso apporta per ciascuna differente lunghezza d'onda.**



Spettro

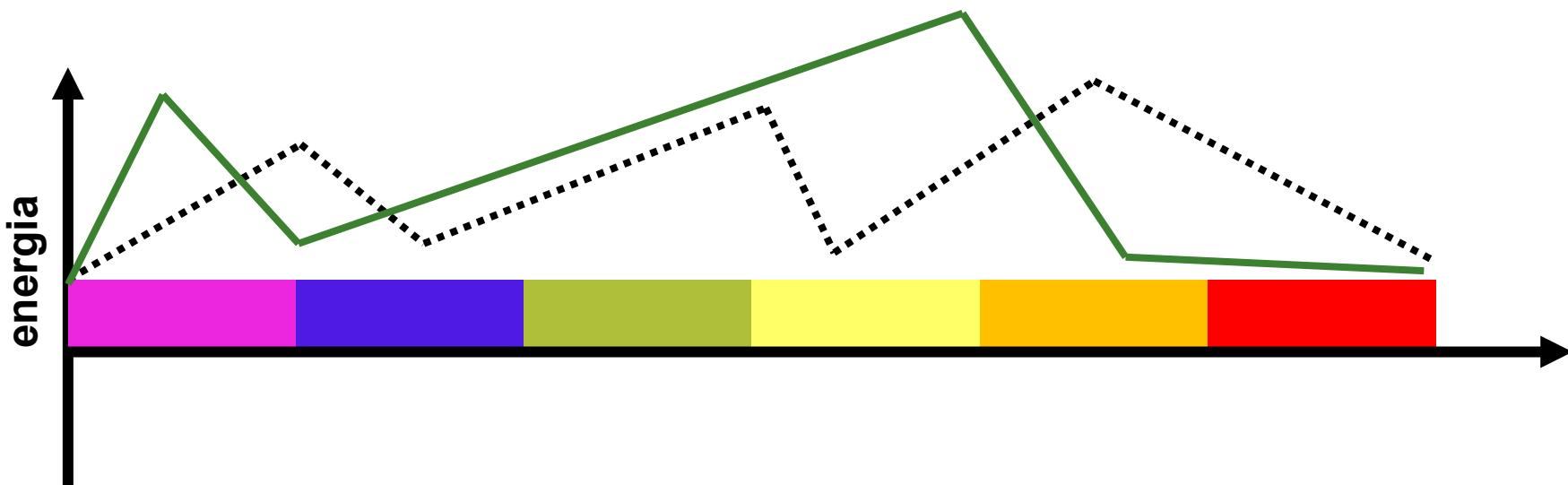
- Il disegno mostra uno spettro “discretizzato” con una convenzione grafica del tipo visto in una applicazione di “equalizzazione” nello stereo.





Metameri

Spettri diversi possono produrre colori eguali: coppie di spettri con questa reciproca proprietà si chiamano **metameri**.



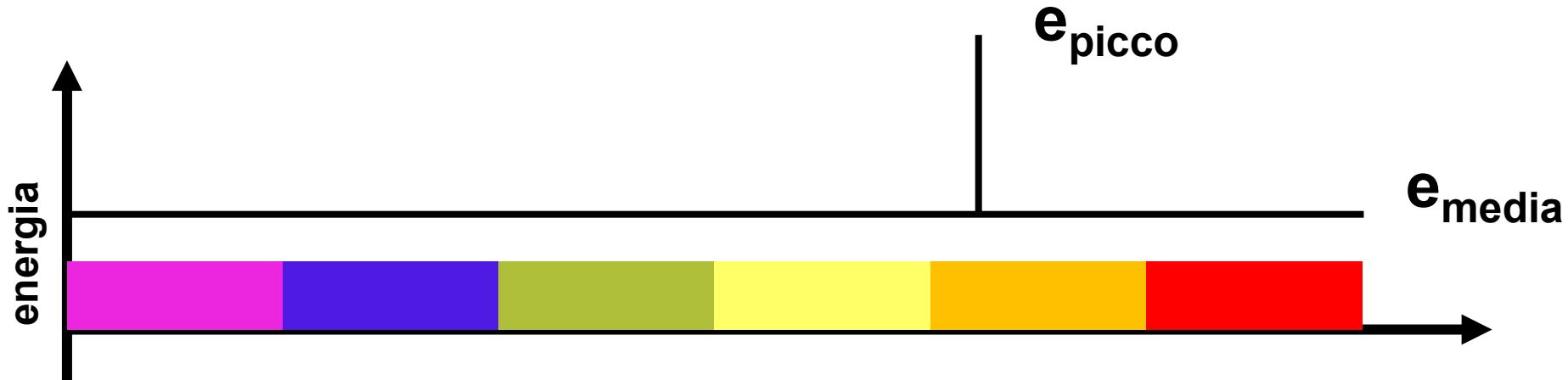
Lo spettro tratteggiato e quello continuo producono (nel cervello) il medesimo colore!

Tra i vari metameri di un dato spettro se ne può sempre individuare uno assai importante che è alla base del modello dei colori detto “del pittore”.



Modello del pittore: basi fisiche

Ogni spettro ha un metamero della seguente forma:

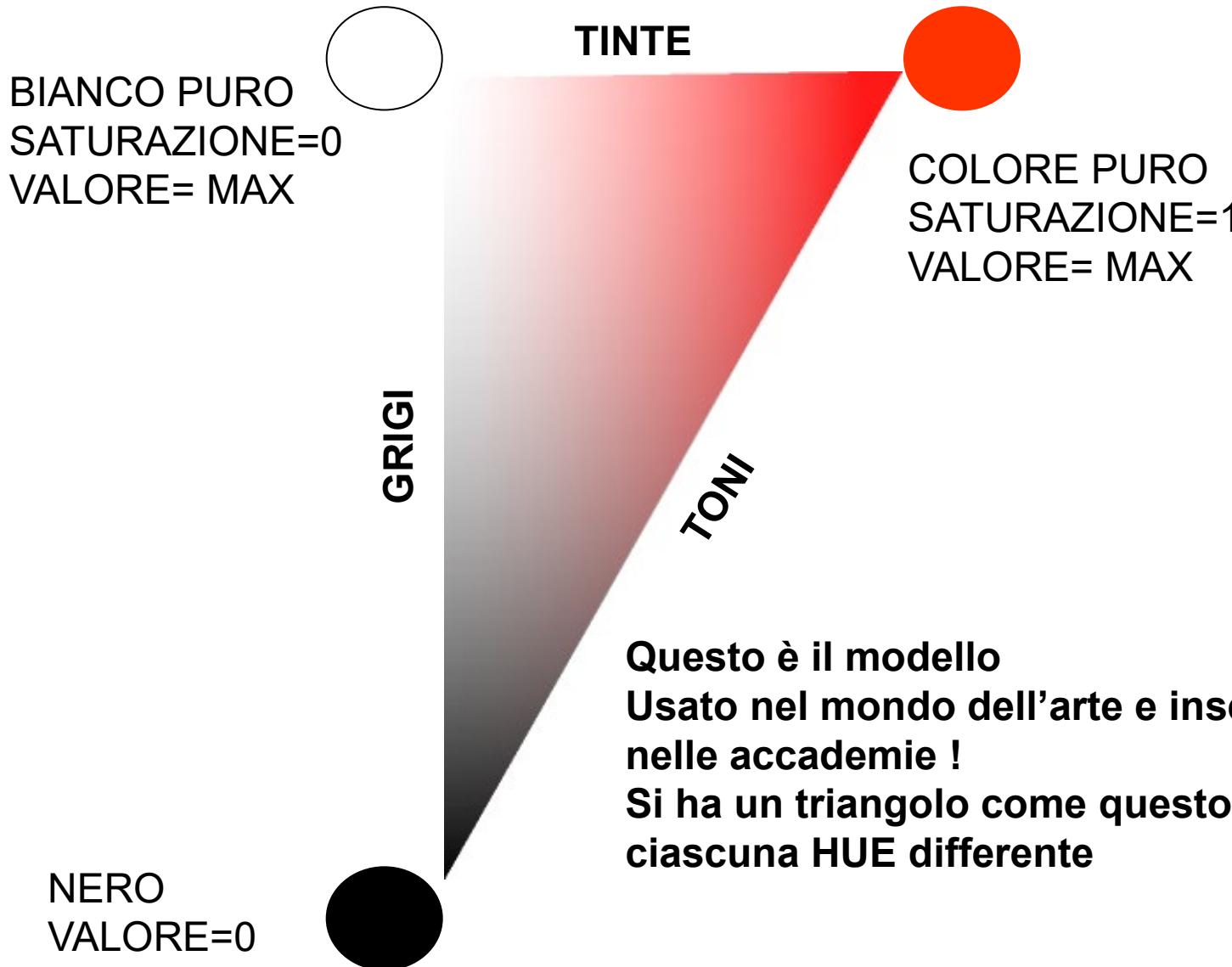


La lunghezza d'onda in cui si ha il picco è responsabile del "colore percepito" (detto anche in inglese **HUE**).

Il rapporto $(e_{picco}-e_{media})/(e_{picco}+e_{media})$ è la **SATURAZIONE**, cioè quanto il colore è puro. Meno luce bianca equivale ad un maggiore valore del rapporto.

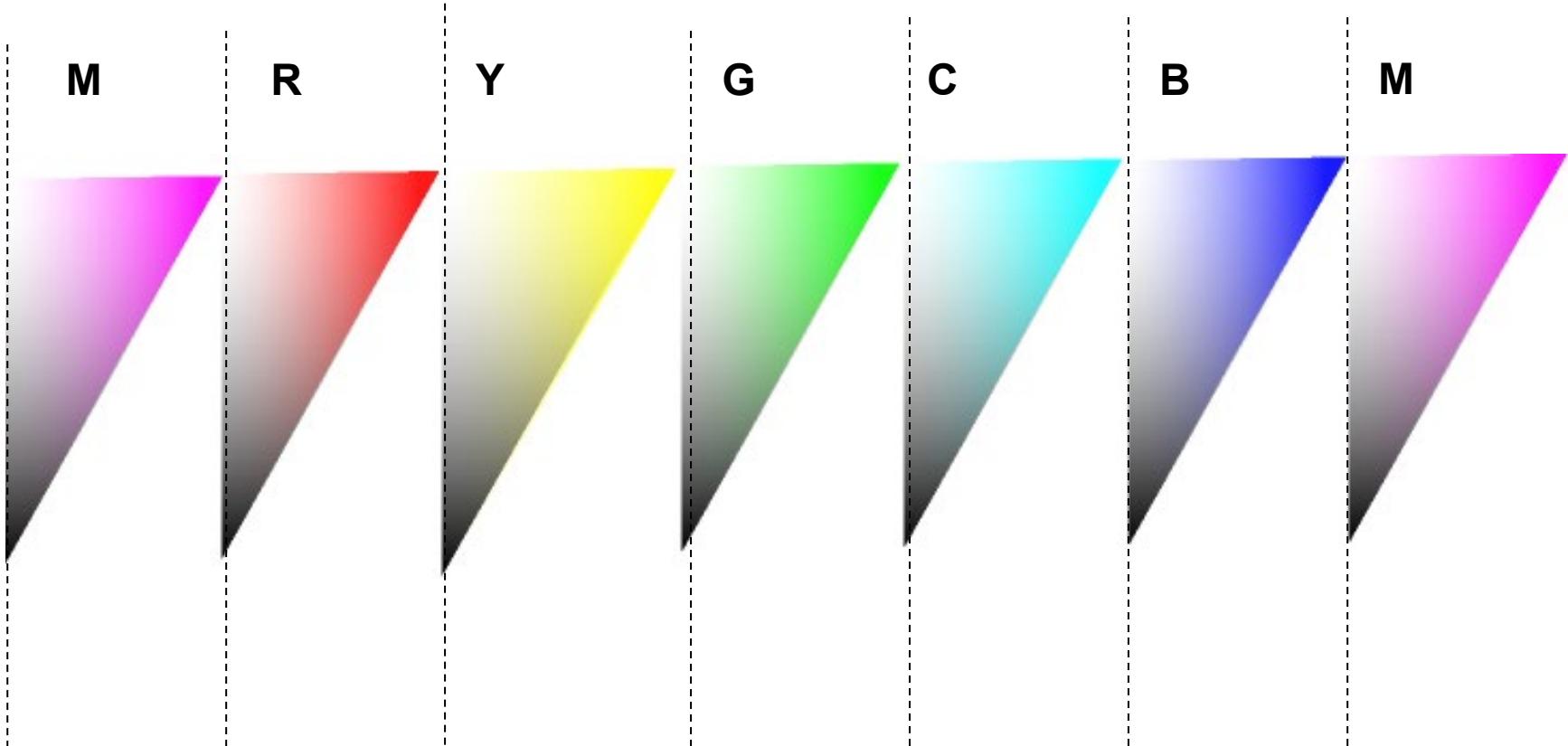
e_{media} è proporzionale al contenuto energetico della radiazione: essa può essere considerata una misura della "luminosità" di una radiazione (detto anche **VALORE**). Esso da un contributo "bianco" al colore percepito.

Modello del pittore





Mettere assieme i triangoli...

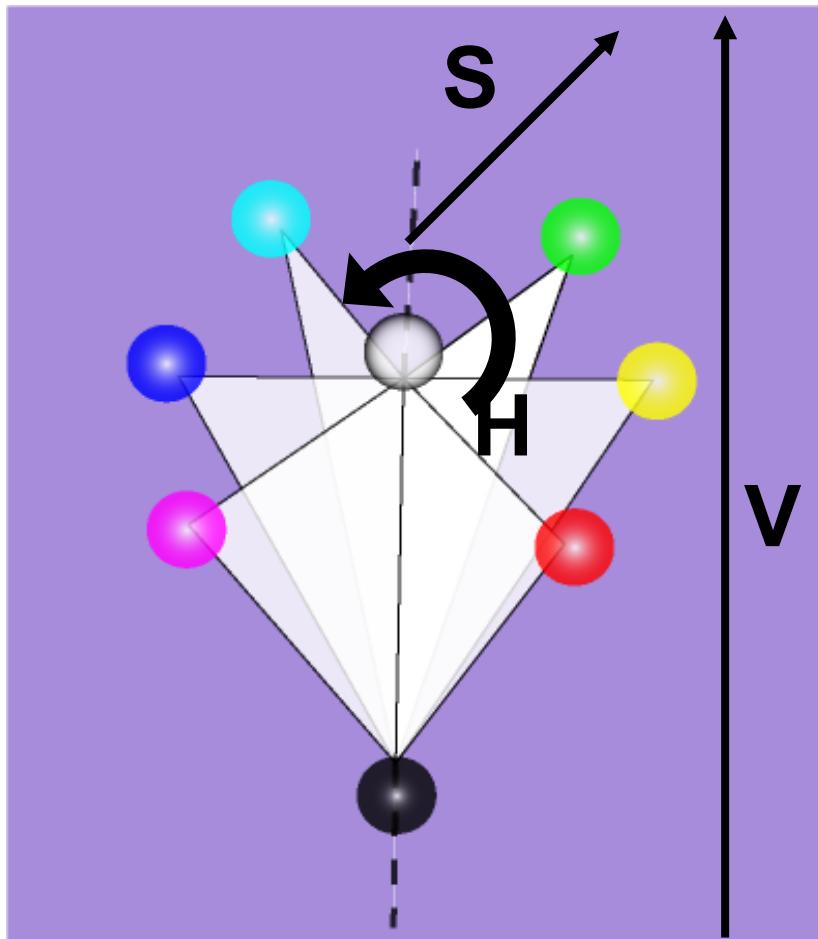


Tutte le linee verticali tratteggiate sono la rappresentazione della medesima “linea dei grigi”.

IDEA! Attacchiamo tutti i triangoli in una “girandola” facendo coincidere le linee dei grigi.



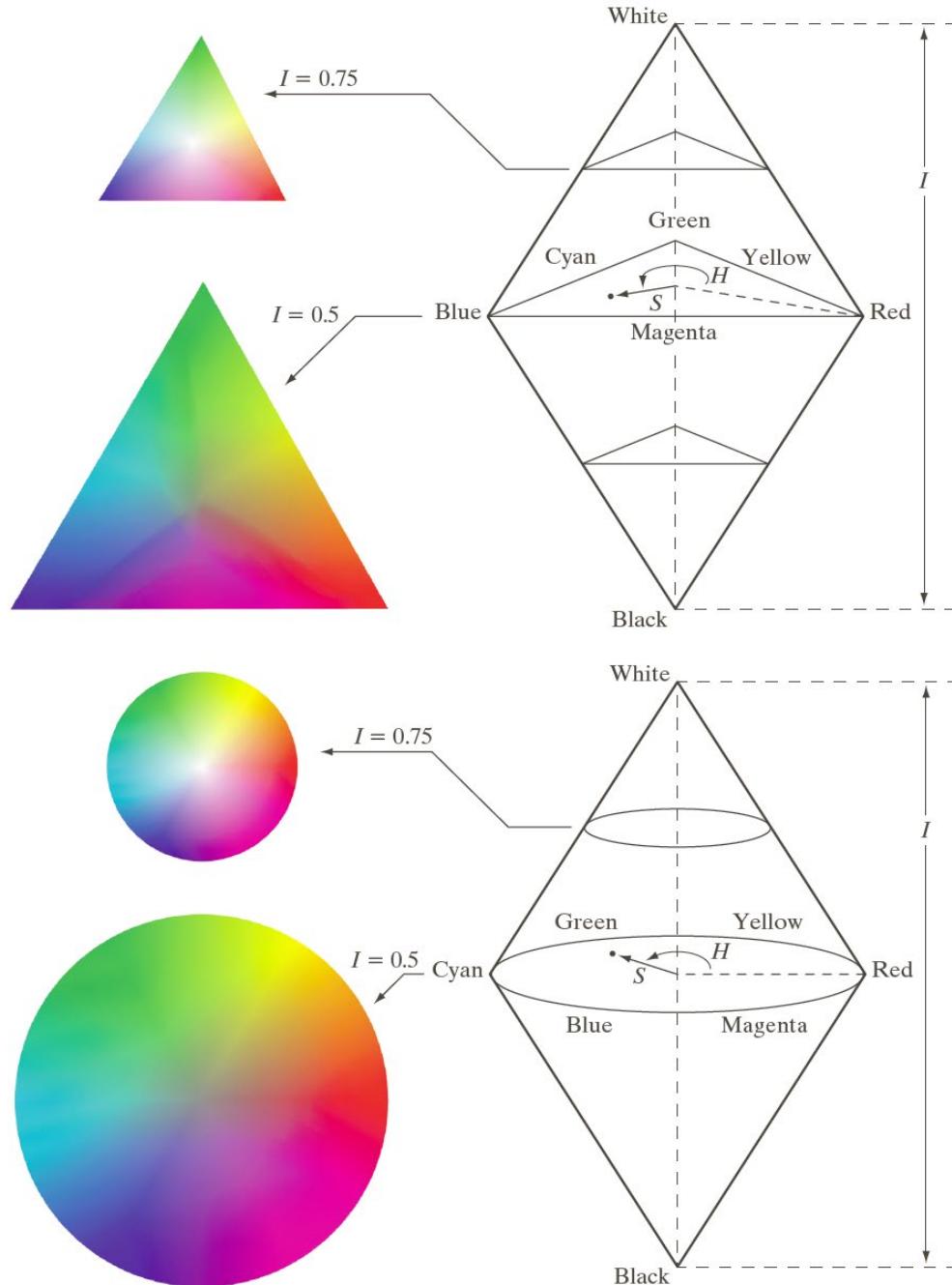
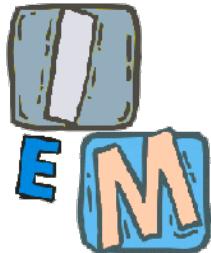
Spazio HSV (oppure HSI)



H = hue (colore);
copre tutti i colori ordinati in sequenza

S = saturazione;
da un minimo (centro) pari al bianco puro
ad un massimo (periferia) colore puro.

V = valore o luminosità;
da un minimo (nessuna energia emessa)
ad un massimo.



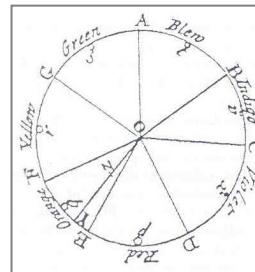
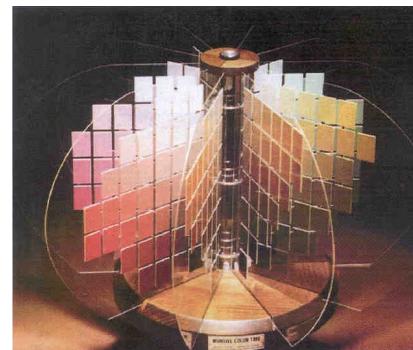


Rappresentazione del colore

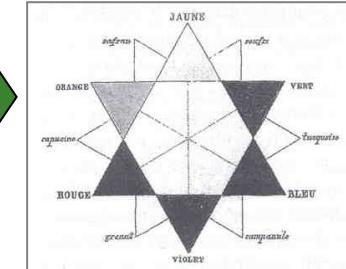
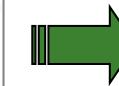
- ❖ **Ruota dei colori** organizza lo spazio colorato in uno schema simmetrico.

- ❖ **Munsell** collocamento dei colori in uno spazio tridimensionale.

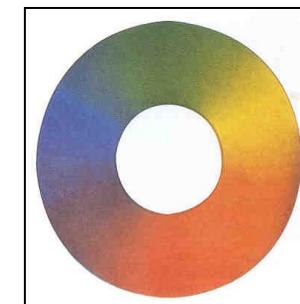
MUNSELL



NEWTON

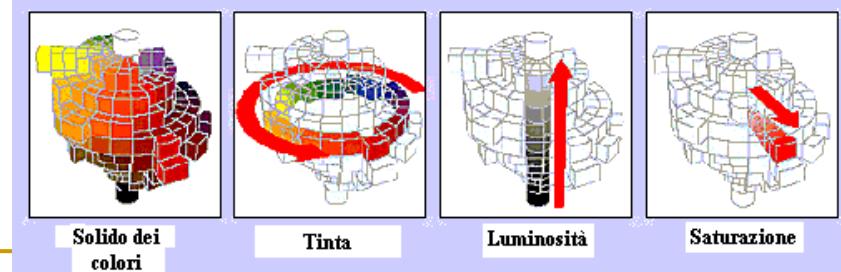
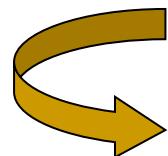


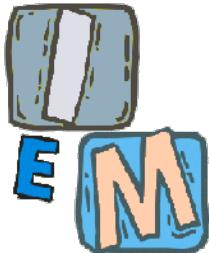
BLANC



CHEVREUL

- ❖ **Nascita di colorimetria e sistemi CIE** per una misura fisica del colore.





Il solido dei colori

Figura 4

Solido tridimensionale
(tinta, luminosità, saturazione)

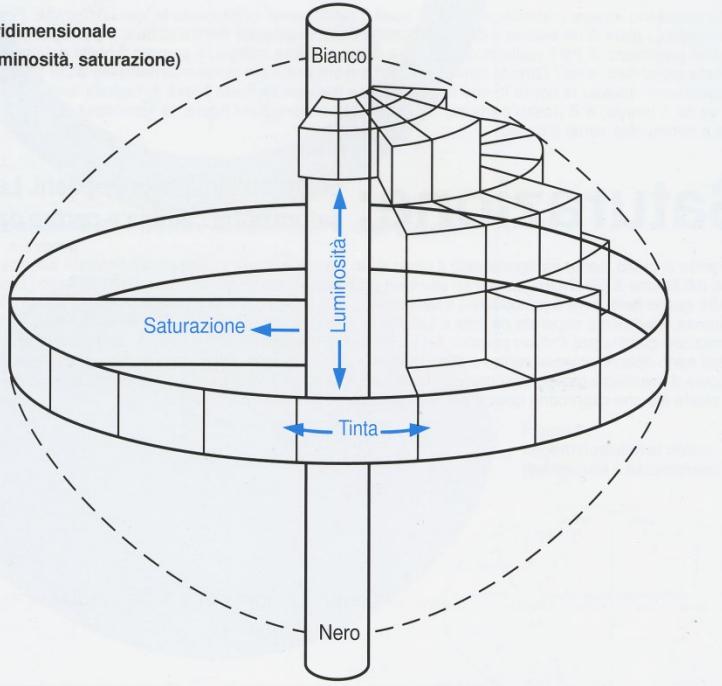
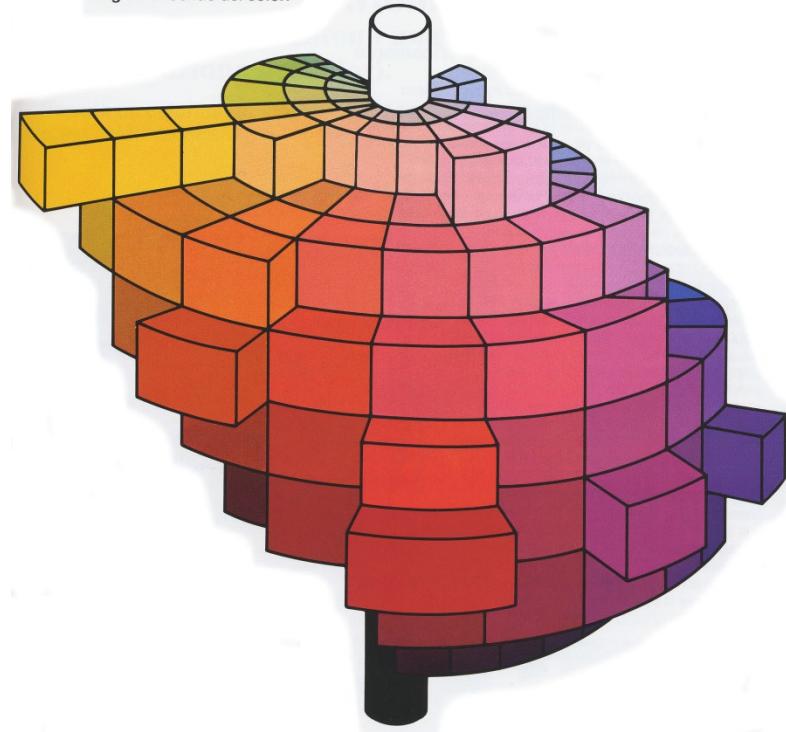


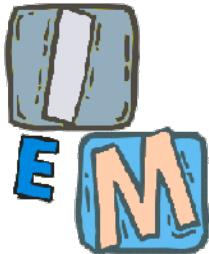
Figura 5: Solido dei colori



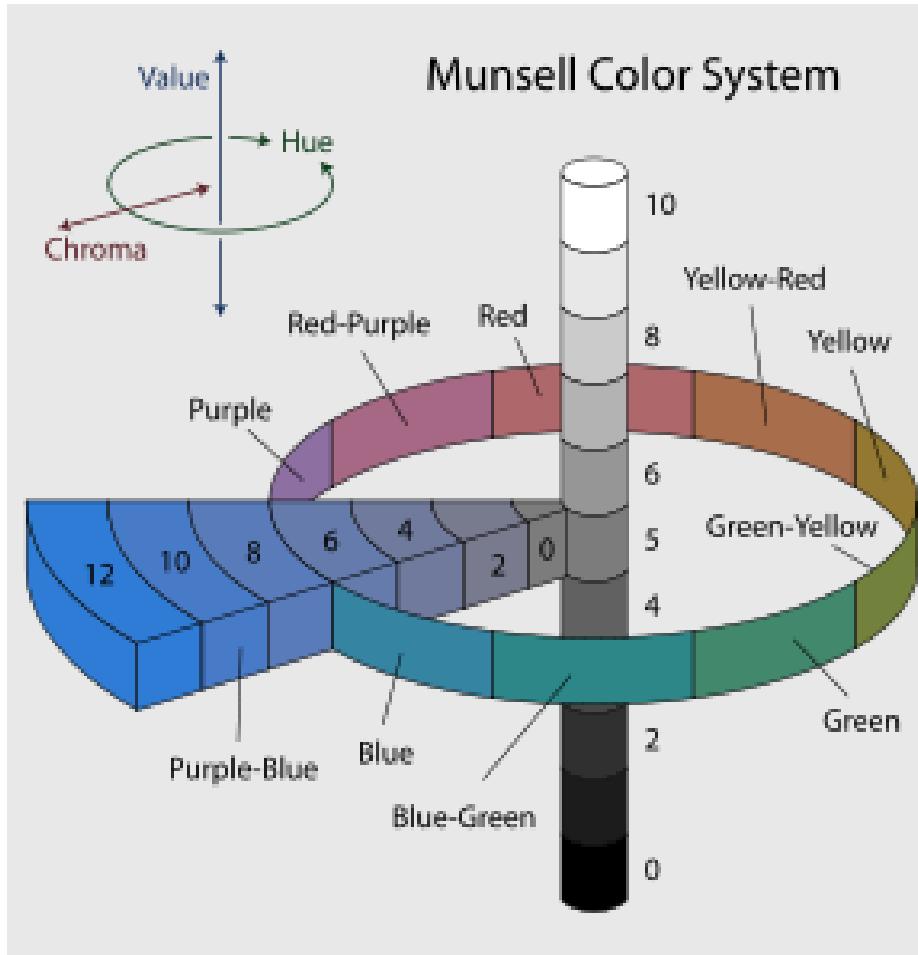
Tinta = identifica il rosso, il blu, il giallo,... e forma la ruota dei colori

Luminosità = colori chiari e colori scuri e cambia verticalmente

Saturazione = colori brillanti e colori opachi; cambia a partire dal centro

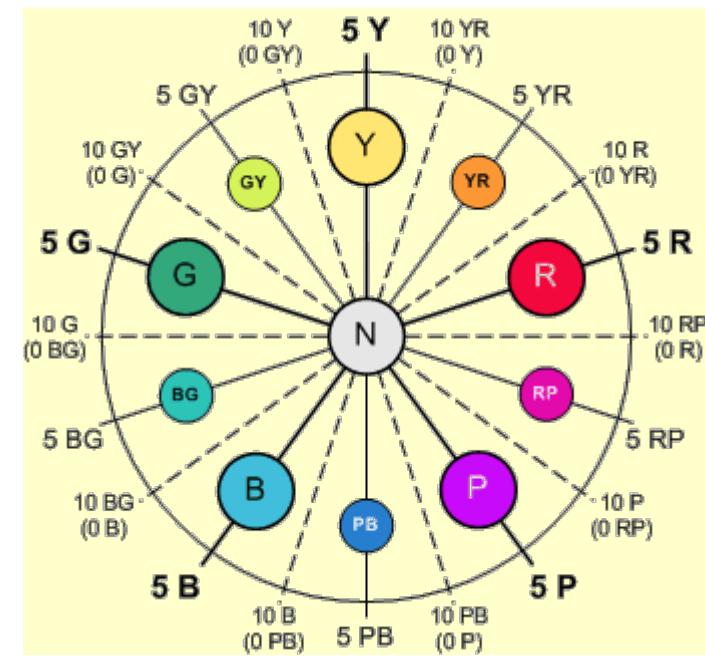


Munsell System



(H,C,V)

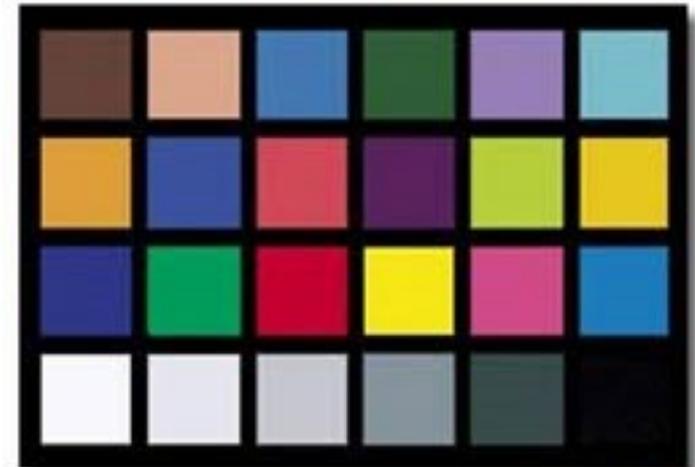
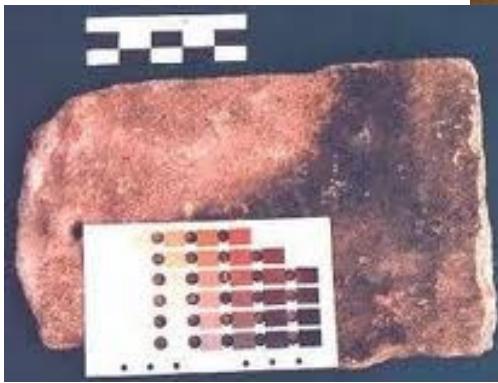
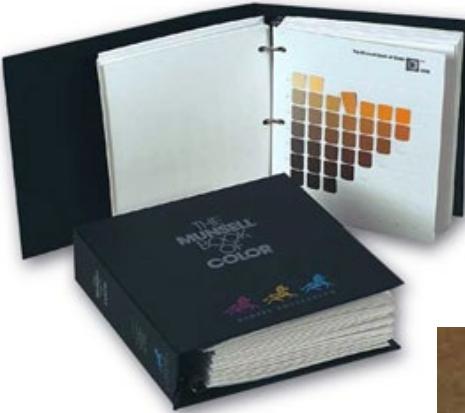
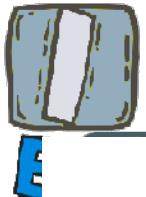
H = Hue
C = Chroma
V = Value





Discussione del modello del pittore

- **PRO:**
 - Intuitivo;
 - Percettivamente significativo: i parametri HSV hanno una perfetta interpretazione nelle nostre percezioni.
- **CONTRO:**
 - Modello non lineare;
 - Perché una piramide esagonale?
 - Quanti sono i “colori base”?





Color Checker Chart

Dark Skin
R=115
G= 82
B= 68

Light Skin
R=194
G=150
B=130

Blue Sky
R= 98
G=122
B=157

Foliage
R= 87
G=108
B= 67

Blue Flower
R=133
G=128
B=177

Bluish Green
R=103
G=189
B=170

Orange
R=214
G=126
B= 44

Purple Red
R= 80
G= 91
B=166

Moderate Red
R=193
G= 90
B= 99

Purple
R= 94
G= 60
B=108

Yellow Green
R=157
G=188
B= 64

Orange Yellow
R=224
G=163
B= 46

Blue
R= 56
G= 61
B=150

Green
R= 70
G=148
B= 73

Red
R=175
G= 54
B= 60

Yellow
R=231
G=199
B= 31

Magenta
R=187
G= 86
B=149

Cyan
R= 8
G=133
B=161

White
R=243
G=243
B=242

Neutral 8
R=200
G=200
B=200

Neutral 65
R=160
G=160
B=160

Neutral 5
R=122
G=122
B=121

Neutral 35
R= 85
G= 85
B= 85

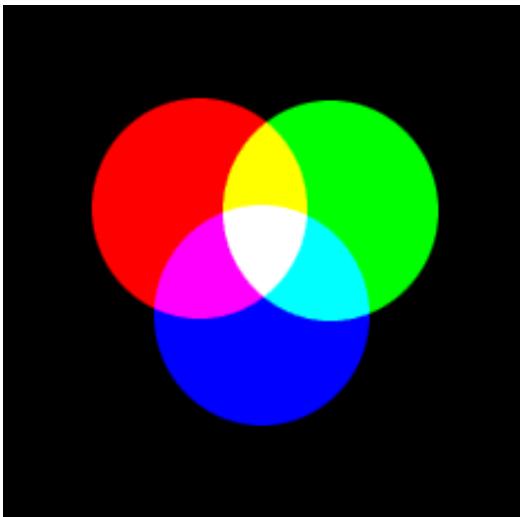
Black
R= 52
G= 52
B= 52

X-Rite



Index	Description	Munsell Notation	CIE xyY'	Manufacturer's sRGB color values ^[6]
Row 1: Natural colors				
1	Dark skin	3 YR 3.7/3.2	0.400 0.350 10.1	#735244
2	Light skin	2.2 YR 6.47/4.1	0.377 0.345 35.8	#c29682
3	Blue sky	4.3 PB 4.95/5.5	0.247 0.251 19.3	#627a9d
4	Foliage	6.7 GY 4.2/4.1	0.337 0.422 13.3	#576c43
5	Blue flower	9.7 PB 5.47/6.7	0.265 0.240 24.3	#8580b1
6	Bluish green	2.5 BG 7/6	0.261 0.343 43.1	#67bdAA
Row 2: Miscellaneous colors				
7	Orange	5 YR 6/11	0.506 0.407 30.1	#d67e2c
8	Purplish blue	7.5 PB 4/10.7	0.211 0.175 12.0	#505ba6
9	Moderate red	2.5 R 5/10	0.453 0.306 19.8	#c15a63
10	Purple	5 P 3/7	0.285 0.202 6.6	#5e3c6c
11	Yellow green	5 GY 7.1/9.1	0.380 0.489 44.3	#9dbc40
12	Orange Yellow	10 YR 7/10.5	0.473 0.438 43.1	#e0a32e
Row 3: Primary and secondary colors				
13	Blue	7.5 PB 2.9/12.7	0.187 0.129 6.1	#383d96
14	Green	0.25 G 5.4/9.6	0.305 0.478 23.4	#469449
15	Red	5 R 4/12	0.539 0.313 12.0	#af363c
16	Yellow	5 Y 8/11.1	0.448 0.470 59.1	#e7c71f
17	Magenta	2.5 RP 5/12	0.364 0.233 19.8	#bb5695
18	Cyan	5 B 5/8	0.196 0.252 19.8	#0885a1
Row 4: Grayscale colors				
19	White	N 9.5/	0.310 0.316 90.0	#f3f3f2
20	Neutral 8	N 8/	0.310 0.316 59.1	#c8c8c8
21	Neutral 6.5	N 6.5/	0.310 0.316 36.2	#a0a0a0
22	Neutral 5	N 5/	0.310 0.316 19.8	#7a7a79
23	Neutral 3.5	N 3.5/	0.310 0.316 9.0	#555555
24	Black	N 2/	0.310 0.316 3.1	#343434

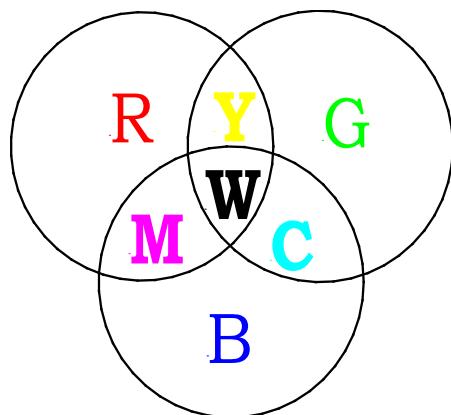
Sintesi Additiva



RGB

Composizione additiva dei colori partendo dai tre colori primari RGB.

Dalla loro sovrapposizione si ottiene il *bianco* (*W*), dalla sovrapposizione di due luci si ottengono **giallo** (*Y*), **magenta** (*M*) e **ciano** (*C*).



Su questo principio si basa il funzionamento di monitor e schermi televisivi.

I colori complementari

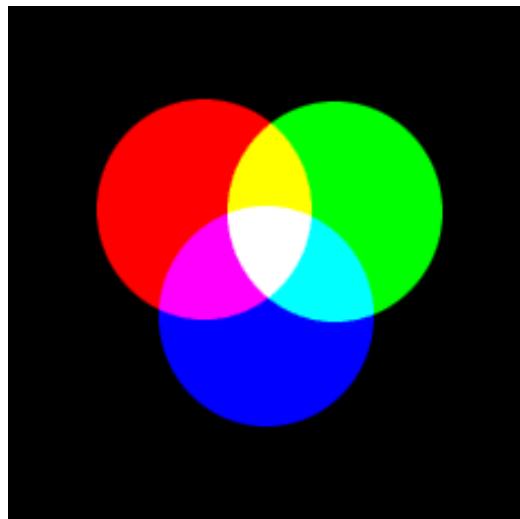
Colore Complementare = quando la somma di un dato colore ad un altro dà il Bianco (W)

$$R + G + B = W$$

$$R + G = W - B = Y$$

$$R + B = W - G = M$$

$$B + G = W - R = C$$



Il **Giallo** è complementare del **Blu**
Il **Magenta** è complementare del **Verde**
Il **Ciano** è complementare del **Rosso**

Il colore può essere ottenuto anche come mescolanza di sostanze colorate (pigmenti, coloranti, ecc.) il cui comportamento può essere simulato considerando dei *filtri colorati*.

Sintesi sottrattiva

Filtro Ottico Colorato = mezzo a facce piane e parallele che attraversato dalla luce bianca ne assorbe selettivamente una porzione.

Il filtro assume il colore prodotto dalla radiazione complementare di quella che viene assorbita come accade alle **sostanze colorate**.

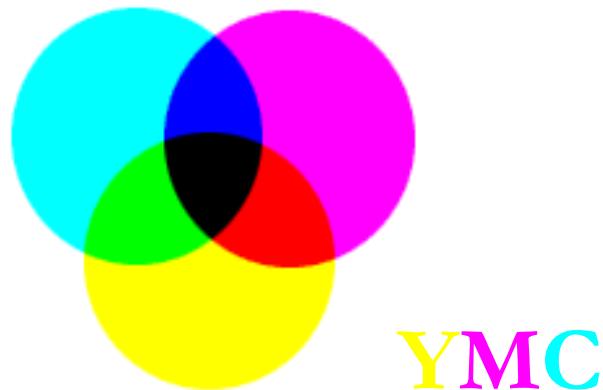
Sovrapponendo tre filtri di colore **giallo (Y)**, **magenta (M)** e **ciano (C)** su un visore luminoso bianco si ottengono i colori per

Sintesi Sottrattiva

Sovrapponendo tutti e tre i filtri viene assorbita tutta la radiazione visibile per cui si ottiene il **Nero (K)**.

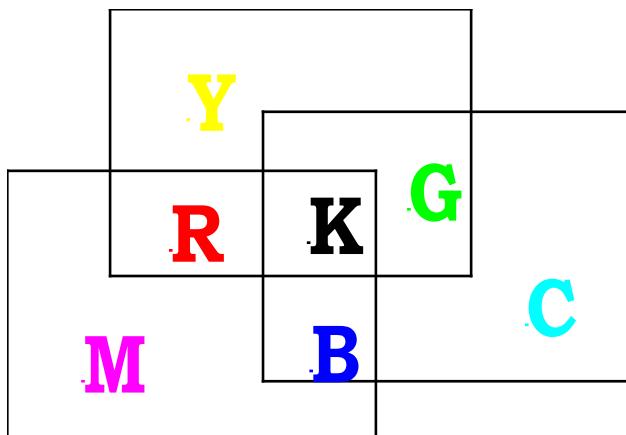
Sovrapponendo due filtri si ottiene il colore corrispondente alla componente luminosa che non viene assorbita da nessuno dei due.

Sintesi sottrattiva



Composizione sottrattiva dei colori partendo dai tre colori primari **YMC** ottenuti ponendo i tre filtri sul cammino di un fascio di luce bianca.

Dalla loro sovrapposizione si ottiene il *nero* (K), dalla sovrapposizione di due filtri si ottengono **rosso (R)**, **verde (G)** e **blu (B)**.



Sintesi Sottrattiva = aggiunge un filtro viene “sottratta” una componente che modifica il colore della luce.

Immagini in sintesi sottrattiva

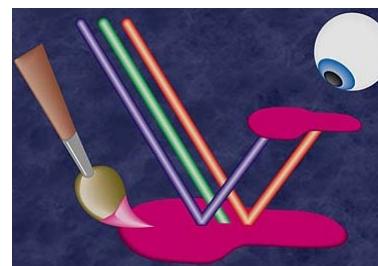
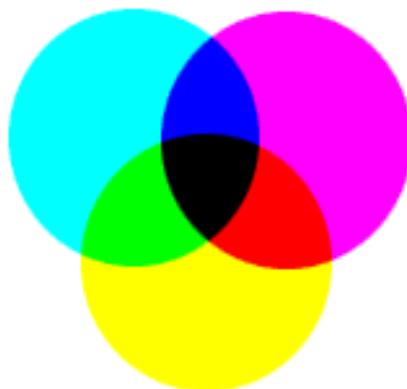
Nella sintesi sottrattiva si ottengono le seguenti combinazioni cromatiche (+ = sovrapposizione di filtri) :

$$\mathbf{Y} + \mathbf{M} = \mathbf{R}$$

$$\mathbf{Y} + \mathbf{C} = \mathbf{G}$$

$$\mathbf{M} + \mathbf{C} = \mathbf{B}$$

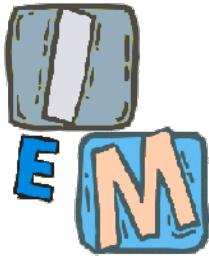
$$\mathbf{Y} + \mathbf{M} + \mathbf{C} = \mathbf{K}$$



I pigmenti colorati si basano sulla sintesi sottrattiva.

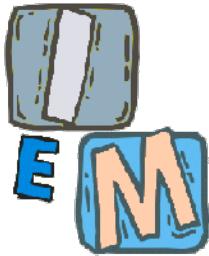


Su questo principio si basa la riproduzione delle immagini colorate nella fotografia a colori e nella stampa con inchiostri.



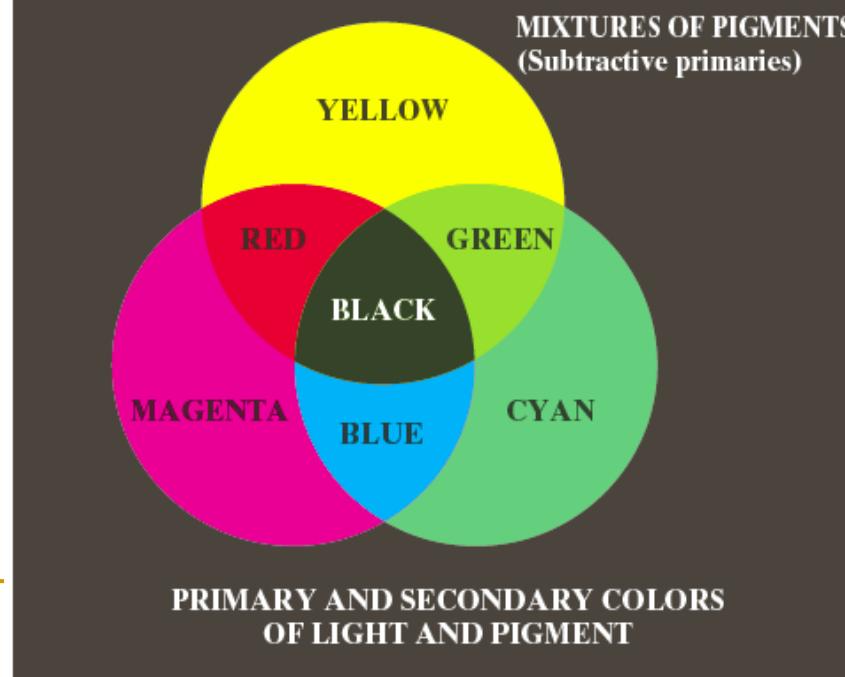
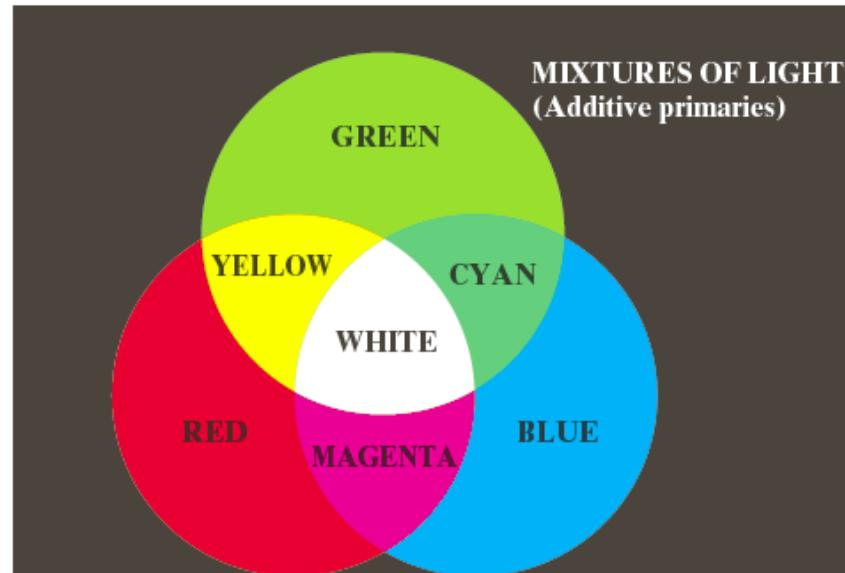
Modello sottrattivo

- I colori sottrattivi sono usati nei sistemi passivi, nei quali la luce viene assorbita selettivamente alle diverse lunghezze d'onda, riflettendone solo alcune che comporranno i colori desiderati.
- I colori sottrattivi sono utilizzati principalmente nell'industria della stampa. Tre colori (e a volte un quarto) vengono impressi in una superficie riflettente come la carta. Gli inchiostri, tipicamente ciano (un blu-verde), magenta, e giallo (CMY), assorbono selettivamente una certa gamma di lunghezze d'onda della luce. L'occhio percepisce la luce riflessa, che non viene assorbita; da qui il termine "sottrattivi".



Modello sottrattivo

- Quando non c'è inchiostro nella carta la luce riflessa è bianca; quando sono presenti tutti e tre i colori, la luce viene (in linea di principio) assorbita e la carta appare nera.
- In pratica, l'assorbimento completo è difficile da ottenere quindi si utilizza un quarto inchiostro, il nero (CMYK, dove K sta per black).

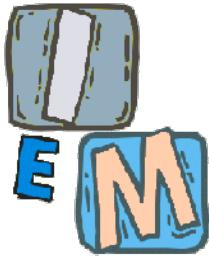




Colori primari e secondari

Nel modello **RGB** con sintesi additiva:

- I colori Rosso R, Verde G e Blue B sono detti colori primari.
- Combinandoli tra di loro NON si ottengono tutti i colori visibili.
- Combinandoli a due a due si ottengono i colori secondari: Magenta M, Giallo Y e Ciano C.



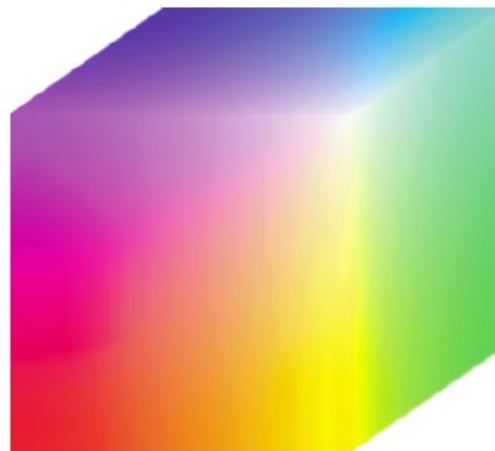
Colori primari

- L'uso del termine primario è stato **ampiamente frainteso** nel senso che i tre colori primari standard, mescolati in varie proporzioni di intensità, venivano considerati capaci di produrre tutti i colori visibili. Come si vedrà a breve, questa interpretazione non è corretta a meno che si permetta anche alla lunghezza d'onda di variare, ma in questo caso non si avrebbero tre colori primari standard fissi.



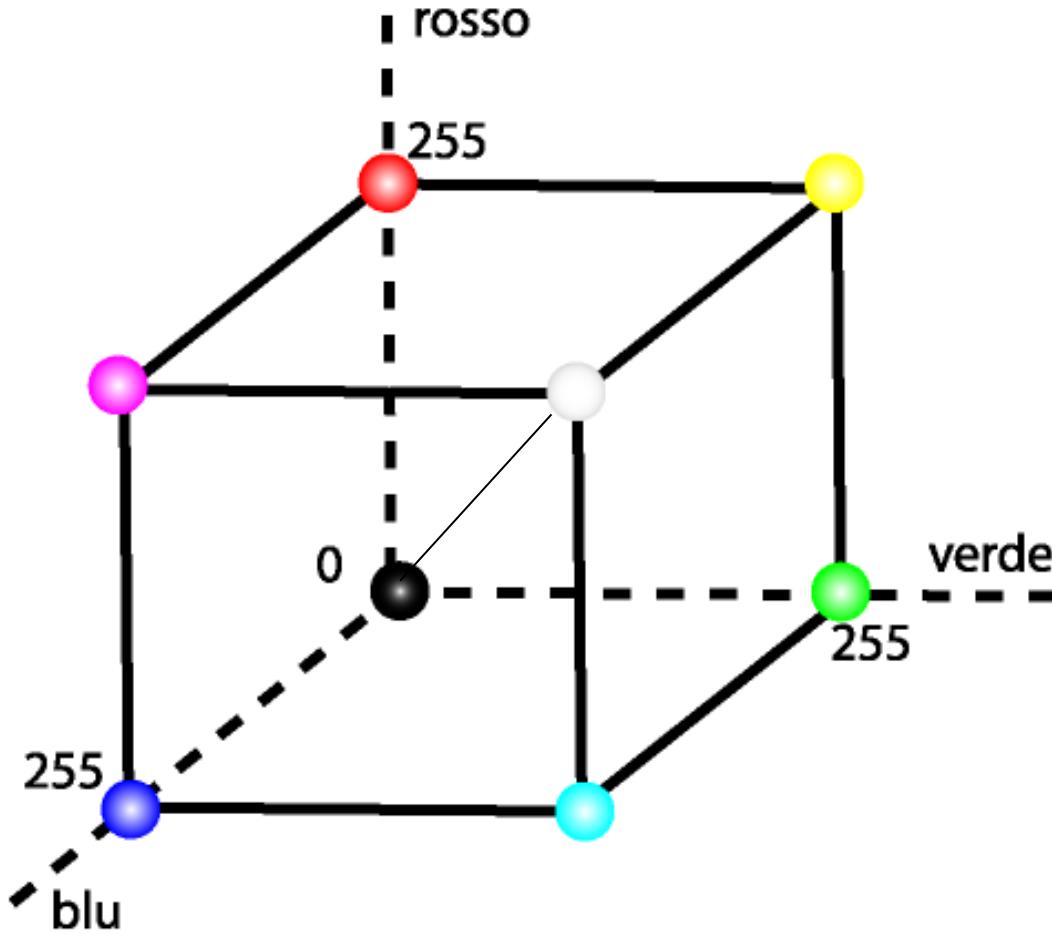
RGB

- Nel modello RGB ciascun colore è ottenuto mischiando i tre colori fondamentali.
- Se ogni componente di colore è intesa come una coordinata cartesiana, allora il modello RGB può essere graficamente descritto da un cubo.





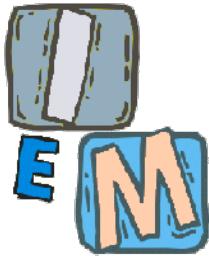
Descrizione geometrica



I contributi del RED, GREEN e BLUE sono assunti indipendenti l'uno dall'altro (e quindi rappresentanti da direzioni perpendicolari tra loro).

**Ogni colore è un punto
contenuto dentro il cubo.**

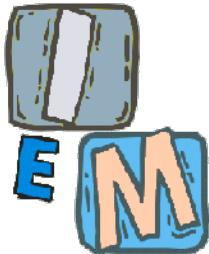
La retta che congiunge nero e bianco è la retta dei grigi.



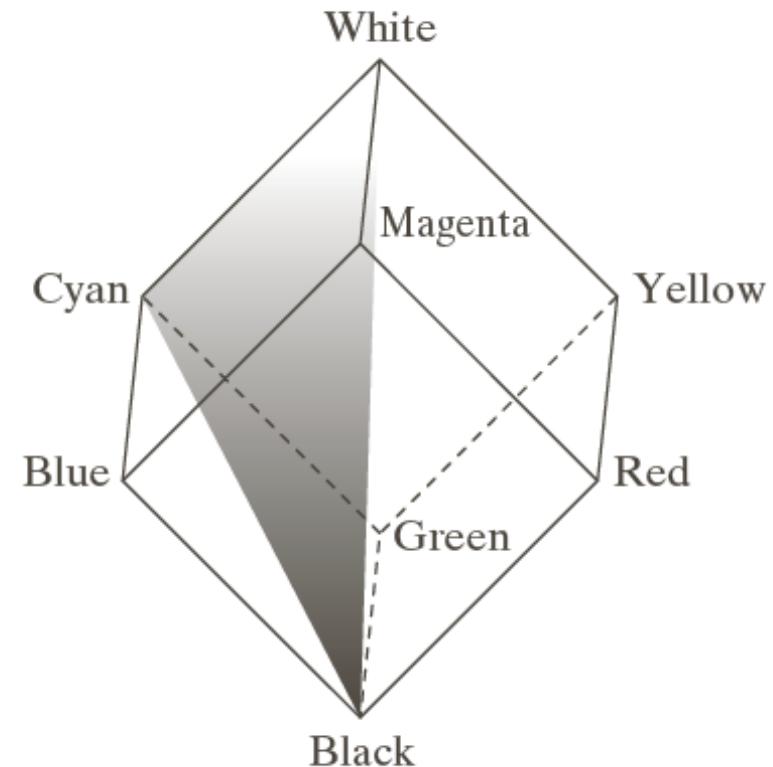
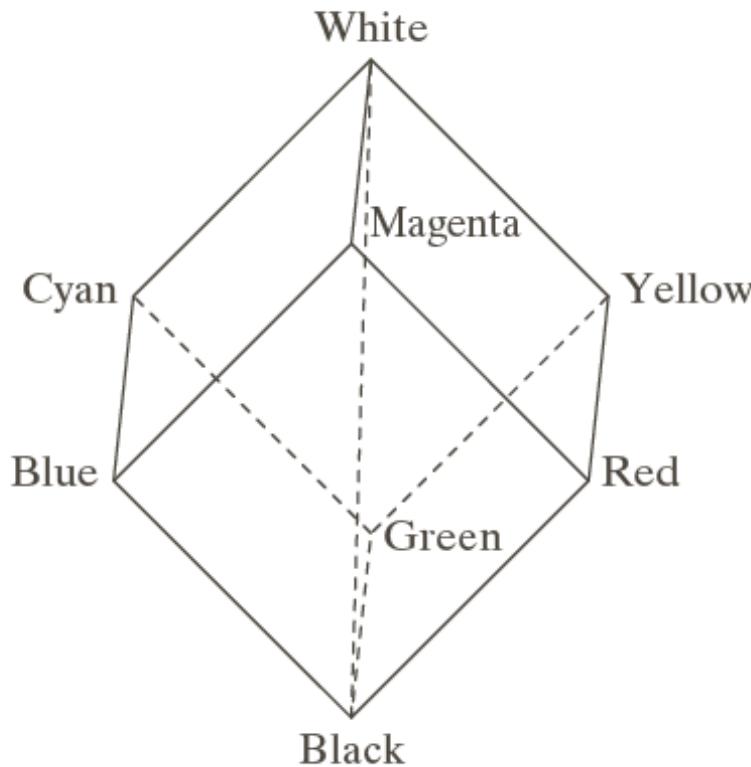
Discussione

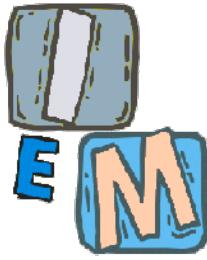
- **PRO:**
semplice da usare e implementare in software e hardware.
De facto è uno STANDARD.
- **CONTRO:**
percettivamente poco comodo: difficile capire guardando un colore in natura in quale proporzione vi contribuiscono l'R, il G e il B.

CUBO RGB e piramide HSV si trasformano l'un l'altro mediante semplici algoritmi (non lineari).



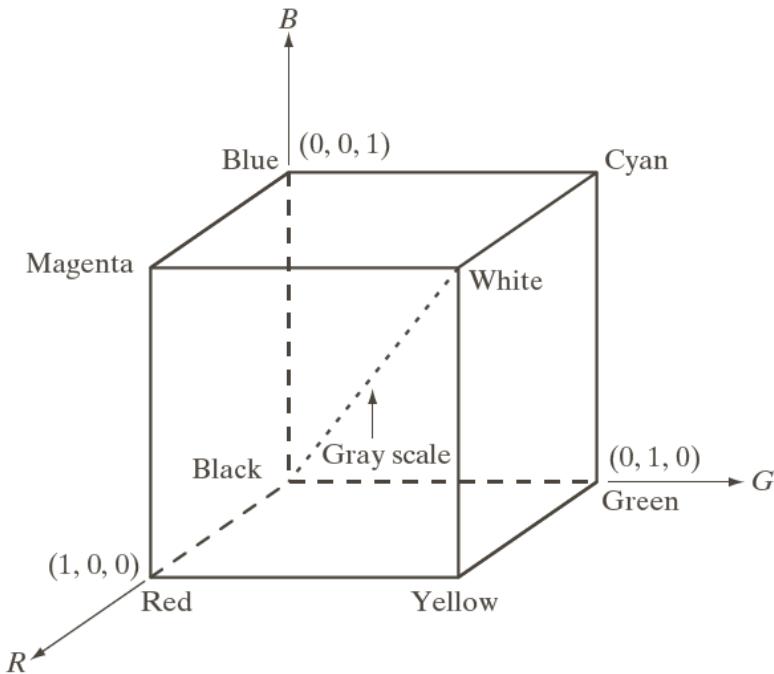
Relazione tra RGB e HSV





CMY

- Il modello complementare a RGB è CMY, Ciano, Magenta e Giallo.





Full color



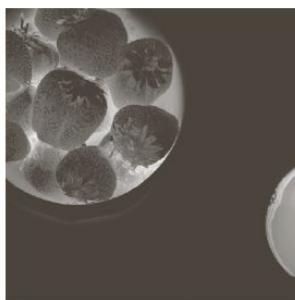
Cyan



Magenta



Yellow



Black



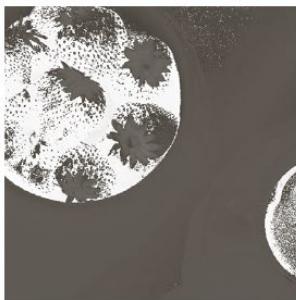
Red



Green



Blue



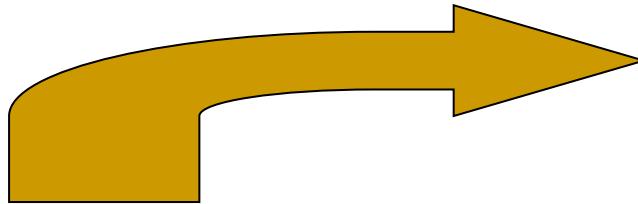
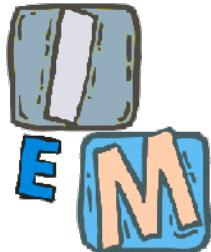
Hue



Saturation



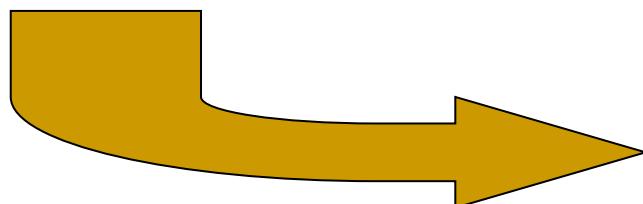
Intensity



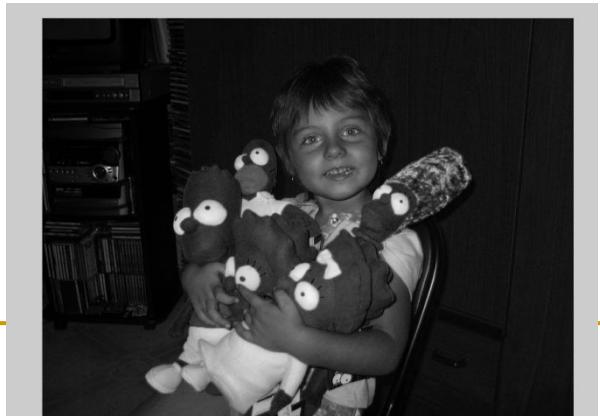
R



G



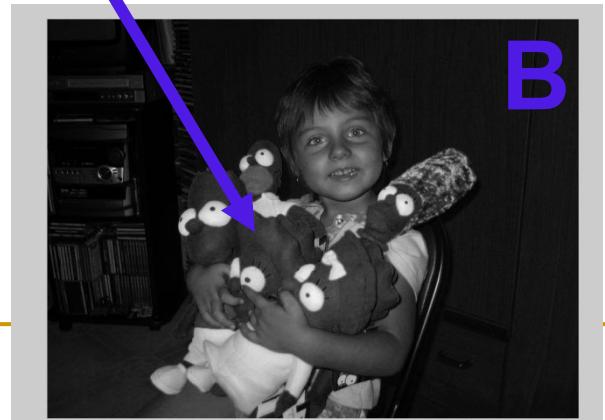
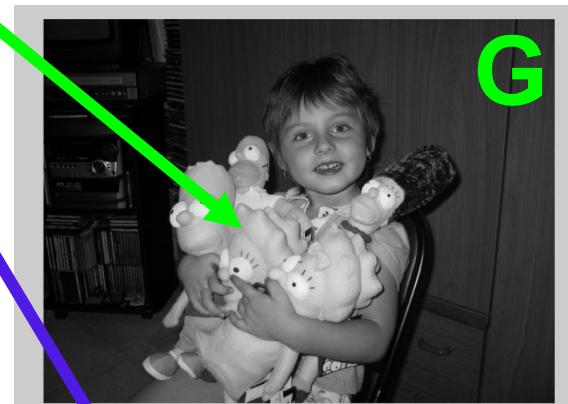
B



Interazione & Multimedia

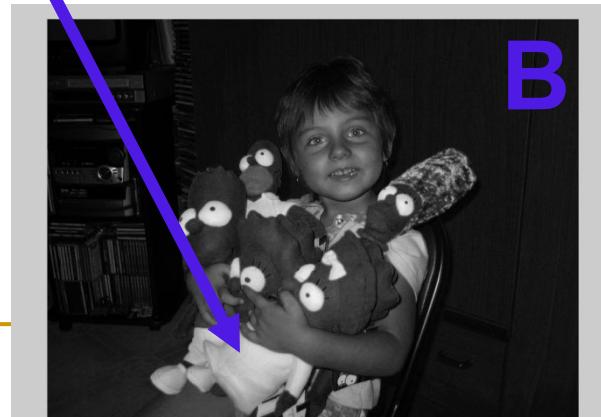
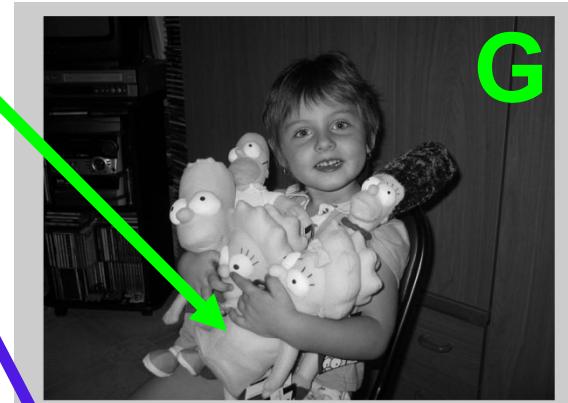


Colore giallo (255,255,0)



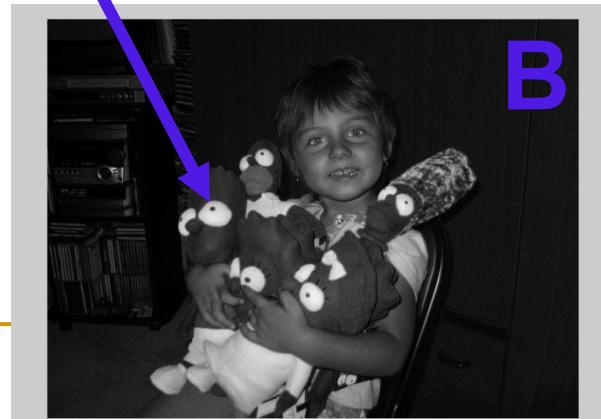
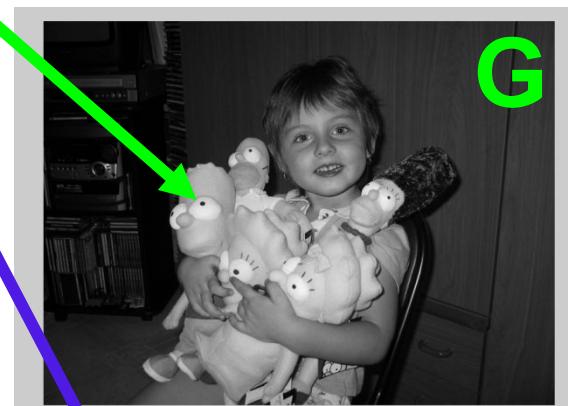


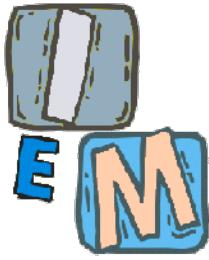
Colore ciano (0, 255, 255)





Colore bianco (255,255,255)





Riepilogando

- Le rappresentazioni dei colori nello spazio RGB (o CMY il duale) non sempre sono le più convenienti.
- Sono disponibili altre rappresentazioni che usano componenti che sono specificatamente relazionate al criterio usato per descrivere la luminanza, la tinta e la saturazione (HSV).
- La tinta descrive che colore è presente (rosso, verde, giallo, ecc.) e può essere correlato alla lunghezza d'onda dominante della sorgente di luce.
- La saturazione, invece, esprime quanto è vivo il colore (molto forte, pastello, vicino al bianco) e può essere correlato alla purezza o alla distribuzione dello spettro della sorgente.
- La luminanza è la grandezza che tende a valutare la sensazione luminosa ricevuta dall'occhio, è legata quindi all'intensità della luce (quanto il colore è bianco, grigio o nero) e può essere correlata alla luminosità della sorgente.

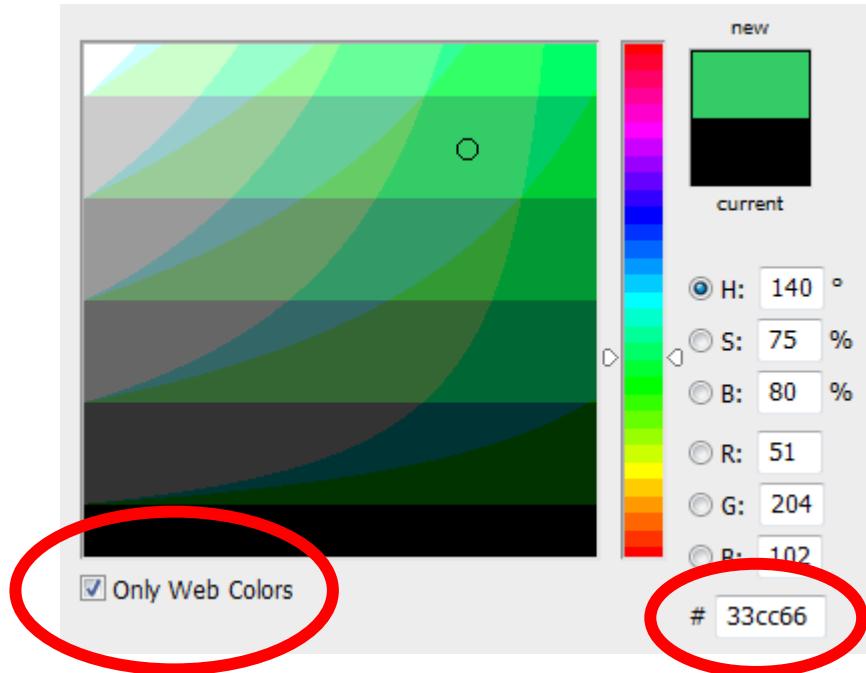
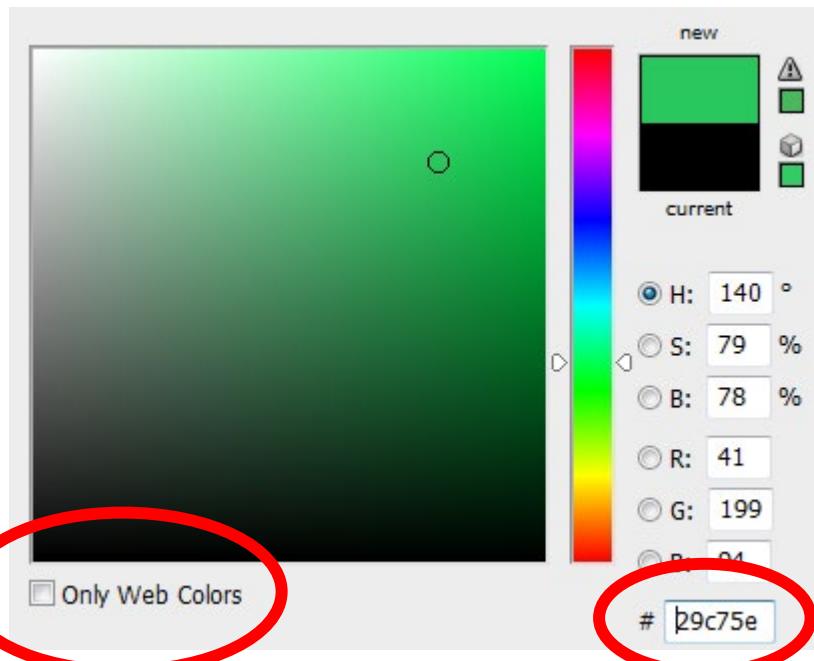


Colori sicuri per il web

- Si sa che 40 dei 256 colori usati tipicamente per il web, vengono processati in modo diverso da vari tipi di sistemi operativi, mentre 216 colori sono comuni alla maggior parte dei sistemi. Questi 216 colori sono diventati gli standard di fatto dei colori sicuri, specialmente nelle applicazioni Internet. Essi vengono utilizzati quando si vuole che i colori visti dalla maggior parte delle persone siano gli stessi.
- Ognuno dei 216 colori sicuri è formato come sempre da tre valori RGB, ma ogni valore può essere solo i numeri in esadecimale 00, 33, 66, 99, CC, FF.
- Quindi sono colori sicuri tutti quelli che in esadecimale sono scritti usando terne con questi 6 possibili lavori: ad esempio #33CCFF è sicuro mentre non lo è il colore #12A3FE.



Colori sicuri per il web





Rappresentazioni luminanza-crominanza

- Gli spazi colore, nei quali una componente è la luminosità e le altre due componenti sono legate alla crominanza, vengono chiamate rappresentazioni luminanza-crominanza.
- La luminanza fornisce una versione a scala di grigi dell'immagine mentre la crominanza fornisce le informazioni "extra" che trasformano l'immagine in scala di grigi in un'immagine a colori.
- Le rappresentazioni luminanza-crominanza sono particolarmente importanti nella compressione delle immagini.
- L'occhio umano è più sensibile alla luminanza che ai colori. Posso dunque "spendere" molti bit per registrare la luminanza e risparmiarne un po' sulle crominanze.



Lo spazio YUV

- Lo spazio YUV viene spesso utilizzato per la codifica di immagini o video analogici, tenendo separate la luminanza dalla crominanza. ATTENZIONE! Con YUV ci si riferisce NON ad uno specifico spazio, ma ad una famiglia di spazi con le caratteristiche sopracitate. Come esempio riportiamo lo spazio YUV definito nello standard ITU-R BT.601-4.
- Tra le possibili controparti digitali degli spazi YUV troviamo gli spazi YC_bC_r .



Da RGB a YUV

- La *luminanza* può essere ottenuta mediante una combinazione lineare delle intensità luminose dei canali rosso, verde e blu di RGB. Un'approssimazione abbastanza fedele della luminanza Y si ottiene attraverso la somma pesata:

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

- Il termine *crominanza* è definito come la differenza tra il colore e un bianco di riferimento alla stessa luminanza opportunamente pesato:

$$U = 0.564(B - Y) \rightarrow U = -0.169R - 0.331G + 0.5B$$

$$V = 0.713(R - Y) \rightarrow V = +0.5R - 0.419G - 0.081B$$

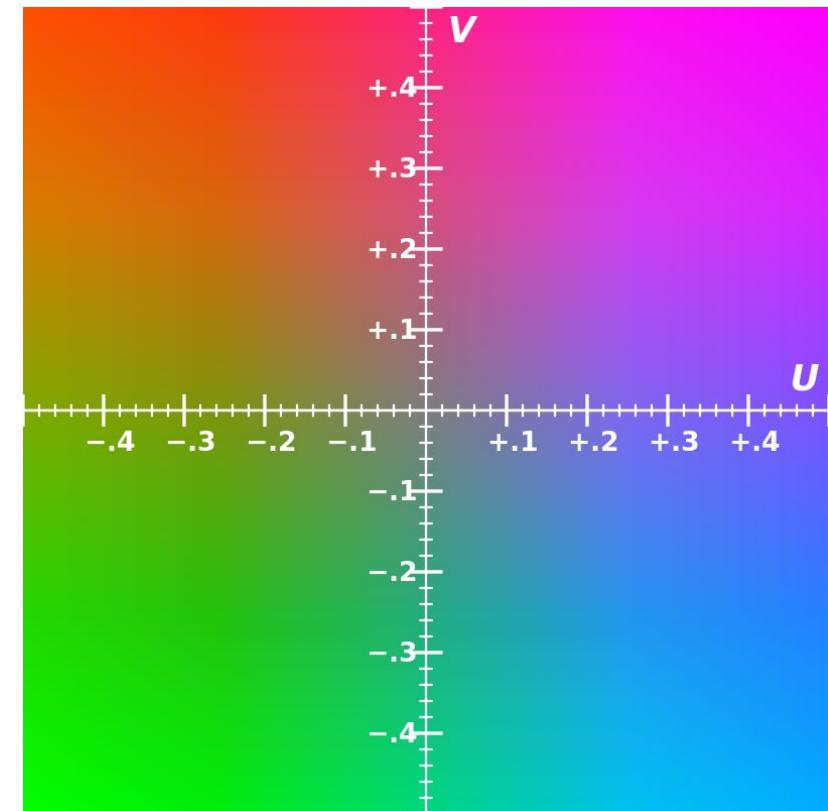


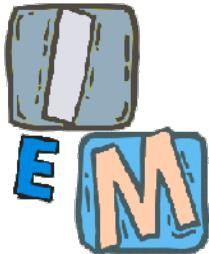
Da RGB a YUV

Nel caso in cui R, G e B siano compresi tra **0 e 1**, si ottengono valori di Y compresi tra 0 e 1 e valori di U e V compresi tra -0.5 e 0.5.

Nella figura sono rappresentati i colori al variare di U e V con Y fissato a 0.5 (luminanza media).

Quando R=G=B, U e V valgono 0 e si ottengono solo grigi (nessuna crominanza)





La luminanza



Immagine RGB

$$Y = a \text{ } R + b \text{ } G + c \text{ } B$$

$$a = .3$$

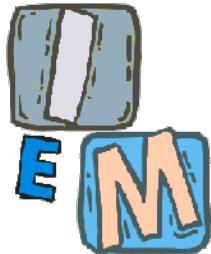
$$b = .6$$

$$c = .1$$



Canale LUMINANZA

I tre canali RGB non danno eguale contributo alla luminanza.
Il valore di “luminanza” è mantenuto massimamente nel canale G.



Lo spazio YUV





Da YUV a YC_bC_r

- Gli spazi YC_bC_r si possono ottenere facilmente normalizzando ed eventualmente quantizzando i canali di YUV.
- Nel caso in cui R, G e B siano interi compresi tra **0 e 255**, si possono ottenere C_b e C_r shiftando U e V. La Y è la stessa di YUV. In questo modo tutti e 3 i canali Y, C_b e C_r saranno compresi tra 0 e 255.

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

$$C_b = U + 128$$

$$C_r = V + 128$$

- **Lo spazio YC_bC_r è largamente utilizzato nella compressione. Noi lo ritroveremo nel formato JPEG.**

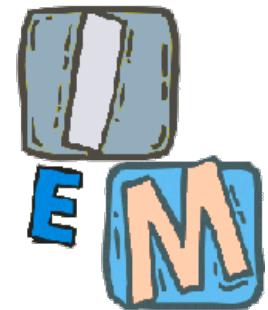


Lo spazio YC_bC_r

YC_bC_r :

Y rappresenta la *luminanza*
mentre C_b e C_r rappresentano la
crominanza del blu e del rosso.





Colori e memoria



Colori e memoria

Schema assunto in RAM per mostrare i colori:

8 bit Red + 8 bit Green + 8 bit Blue = 24 bit

(circa 16 milioni di colori o true color)

Questo costoso schema NON E' lo schema con il quale i colori vengono conservati in memoria di massa e compressi nelle tecniche JPEG, GIF o altro!



Più colori che pixel!

Una immagine “grande” è di
 $2400 \times 1800 = 4.520.000$ pixel.

Una immagine “media” è di
 $1600 \times 1200 = 1.920.000$ pixel.

Una immagine “piccola” è di
 $800 \times 600 = 480.000$ pixel.

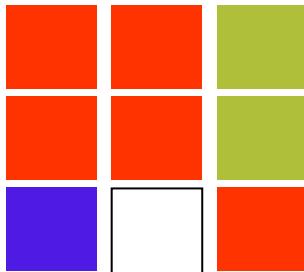
**In ogni caso ho più colori
che pixel!**

**Inoltre le immagini “naturali”
hanno una proprietà di
coerenza interna per cui
raramente si ha un colore
differente per ogni differente
pixel.**

**Questo porta ad adottare la modalità a
COLORI INDICIZZATI (indexed color) o a
PALETTE o a LOOK-UP-TABLE (LUT).**



Palette: l'idea



Dovrei
ricordare:

255, 0, 0	255, 0, 0	0, 255, 0
255, 0, 0	255, 0, 0	0, 255, 0
0, 0, 255	255, 255, 255	255, 0, 0

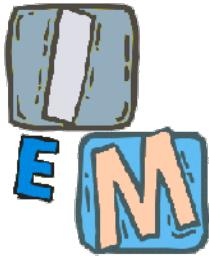
Totale (9 pixel x 3 byte)= 27 byte = 216 bit

00	00	01
00	00	01
11	10	00

Ricordo queste “etichette” e
questa tabella

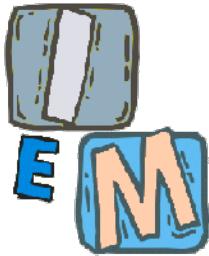
00 = (255, 0, 0)
01 = (0, 255, 0)
10 = (255, 255, 255)
11 = (0, 0, 255)

Totale
18 bit (9 pixel x 2
bit) per l'immagine
+ 12 byte per la
palette
= 114 bit



La palette

La tabella che lega “etichette” con le corrispondenti componenti RGB si chiama:
“tavolozza”,
“palette”, -
“tabella di indicizzazione dei colori”, “tabella di sbirciata”,
“look up table”,
“LUT”.



Indicizzazione di una immagine true color

I software commerciali e alcuni formati di compressione (GIF) adottano una paletta di **256 colori**.

Se si usa una paletta **custom (adattata all'immagine)**:

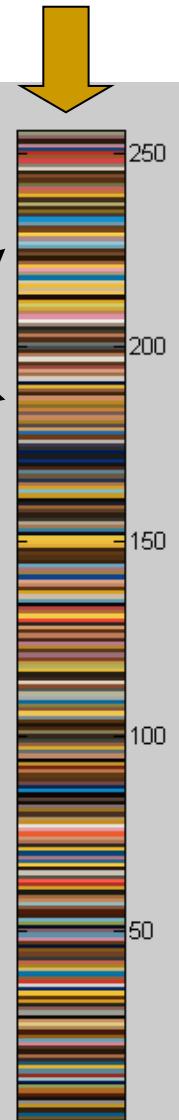
- **se nell'immagine true color (16 milioni di colori) ci sono meno di 256 colori**, alcuni di essi vengono replicati.
- **se nell'immagine true color ci sono più di 256 colori**, essi vengono “ridotti” scegliendo 256 rappresentanti che garantiscano una buona qualità visiva (esistono numerosi algoritmi, anche proprietari per tale scopo).

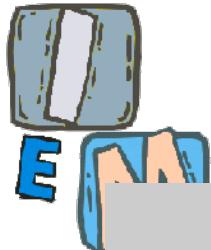
Esistono anche palette “**standard**”: MAC, WINDOWS, WEB_SAFE, OTTIMIZZATE eccetera.

Se si usa una paletta standard di 256 colori, alcuni di questi potrebbero non essere utilizzati nell'indicizzare un'immagine true color (anche se questa presenta più di 256 colori).

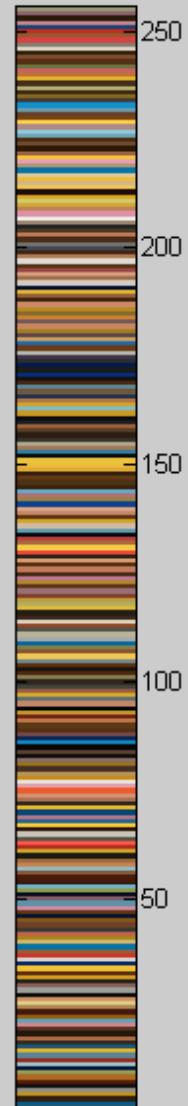
Matrice degli indici

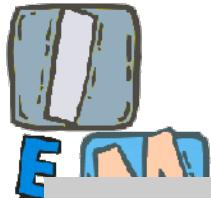
Palette





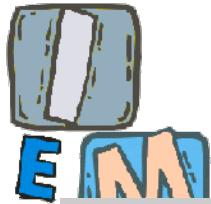
Palette 256 colori



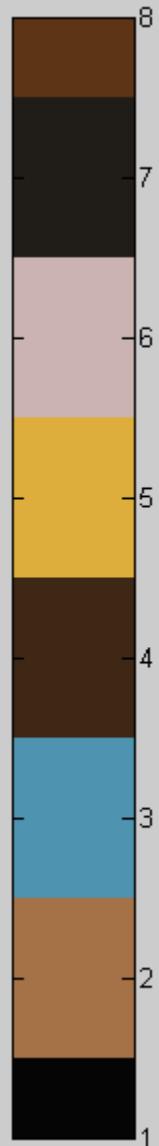


Palette 16 colori



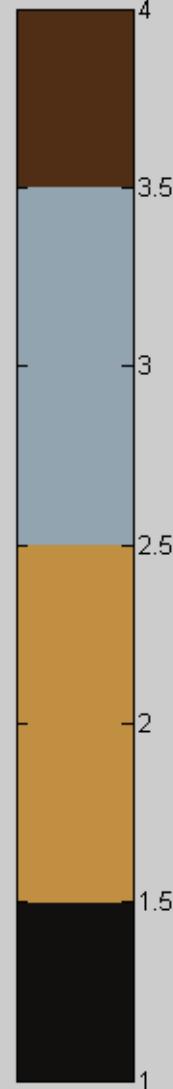


Palette 8 colori



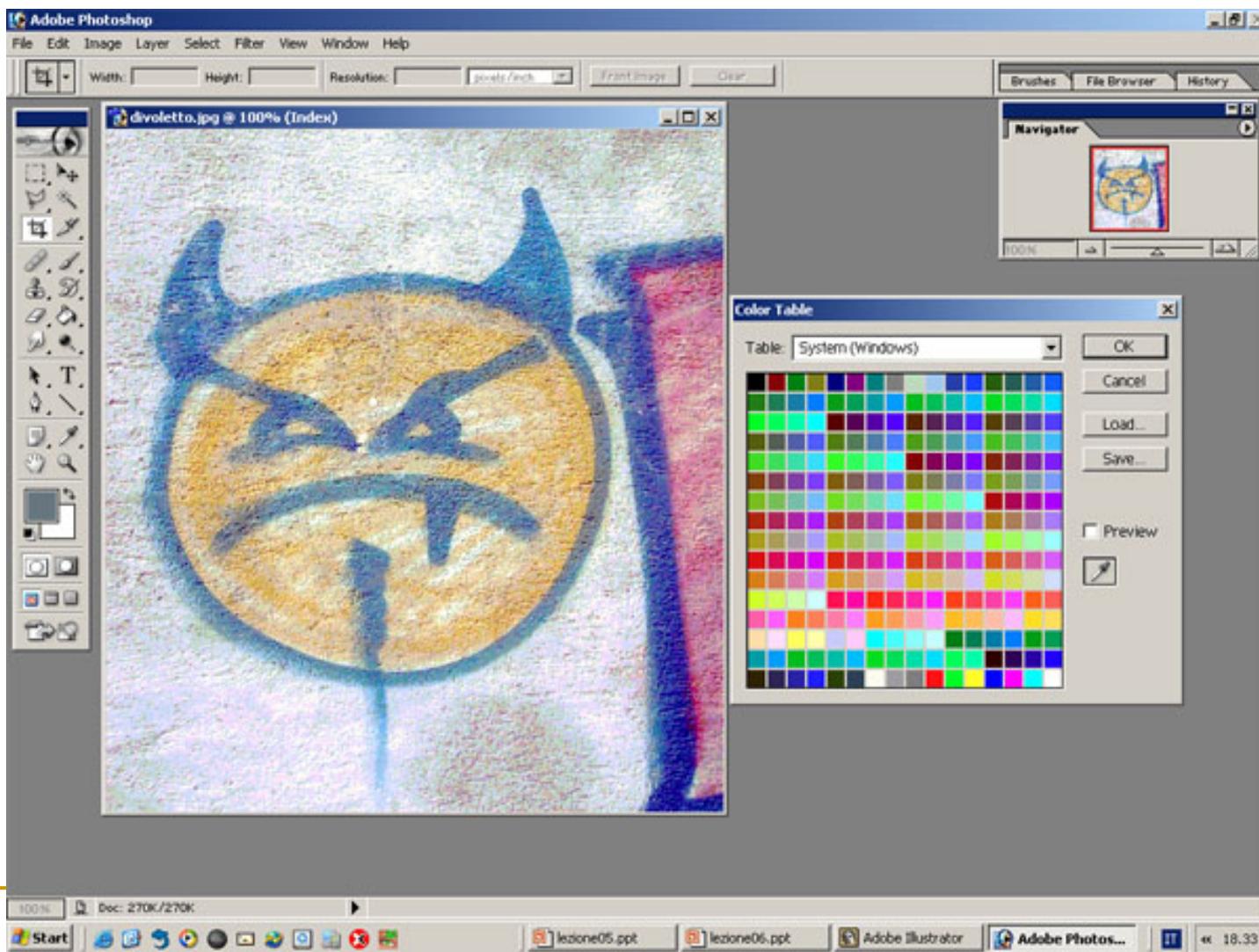


Palette 4 colori





Palette: una schermata di Photoshop





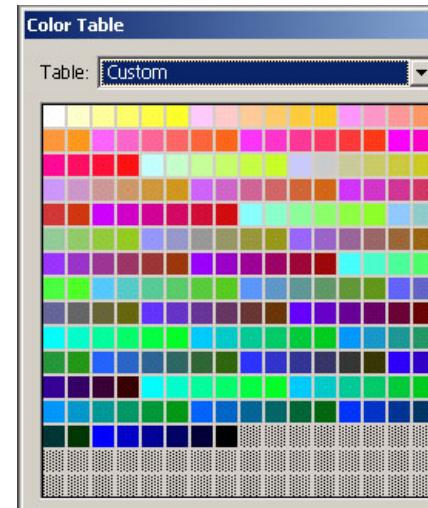
Confronti tra palette



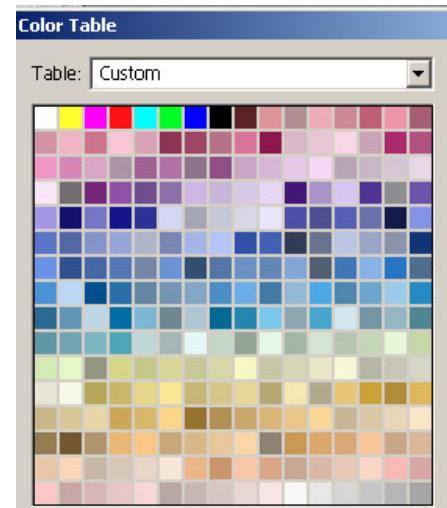
Palette di sistema di Windows



Palette di sistema di Macintosh



Palette Web Safe (216 colori)

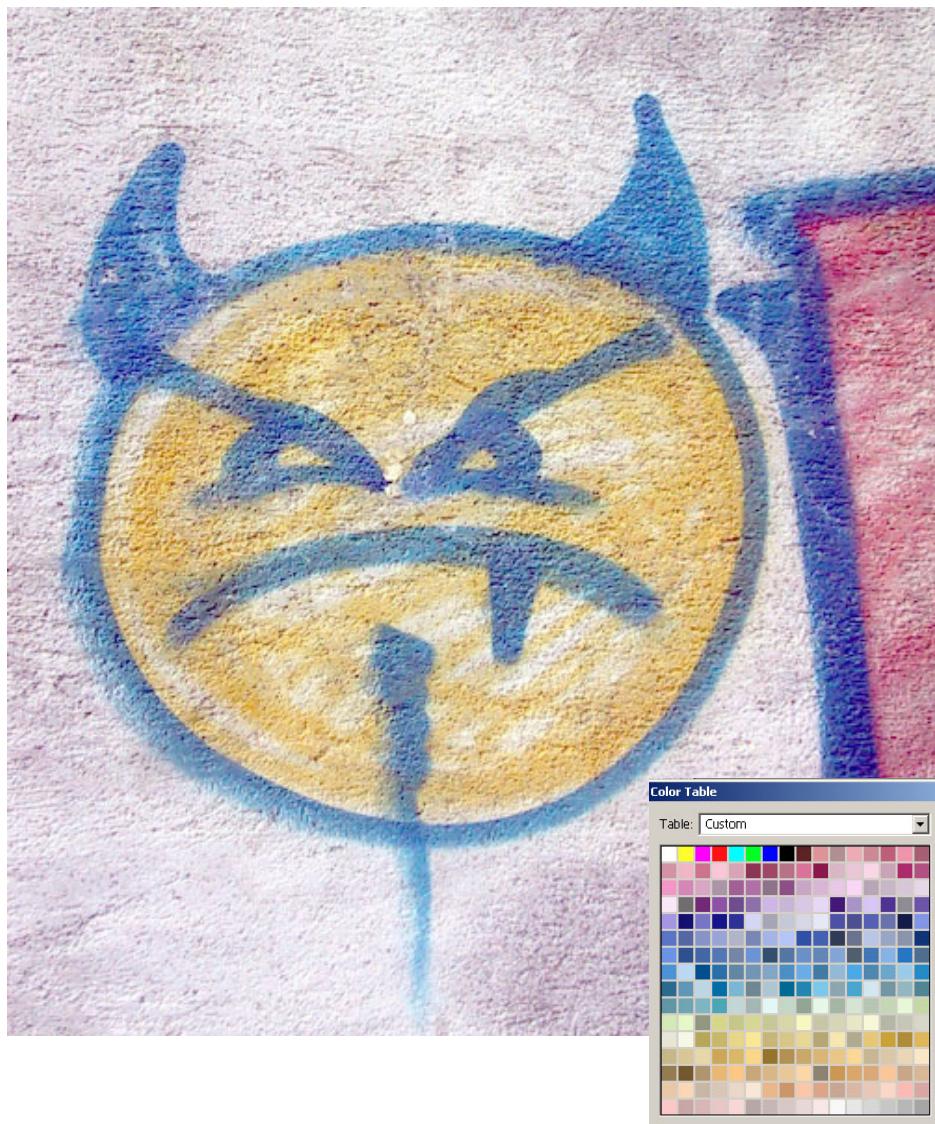


Palette ottimizzata per l'immagine (Photoshop)

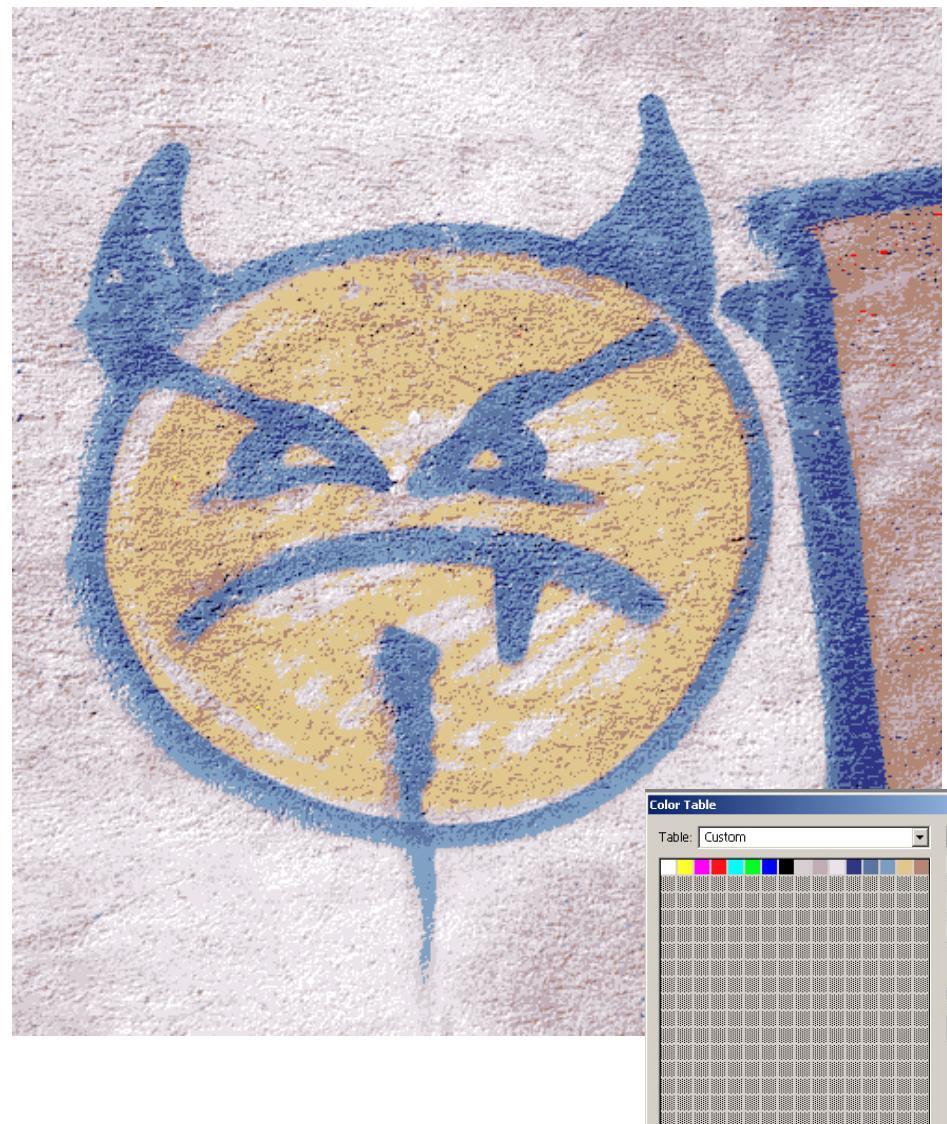
Le differenze percettive tra le varie palette ci sono ma non sono evidenziabili via proiettore e quindi sono qui trascurate



Palette a 256 colori, ottimizzata per l'immagine (Photoshop)

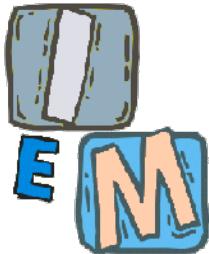


Palette a 16 colori, ottimizzata per l'immagine (Photoshop)

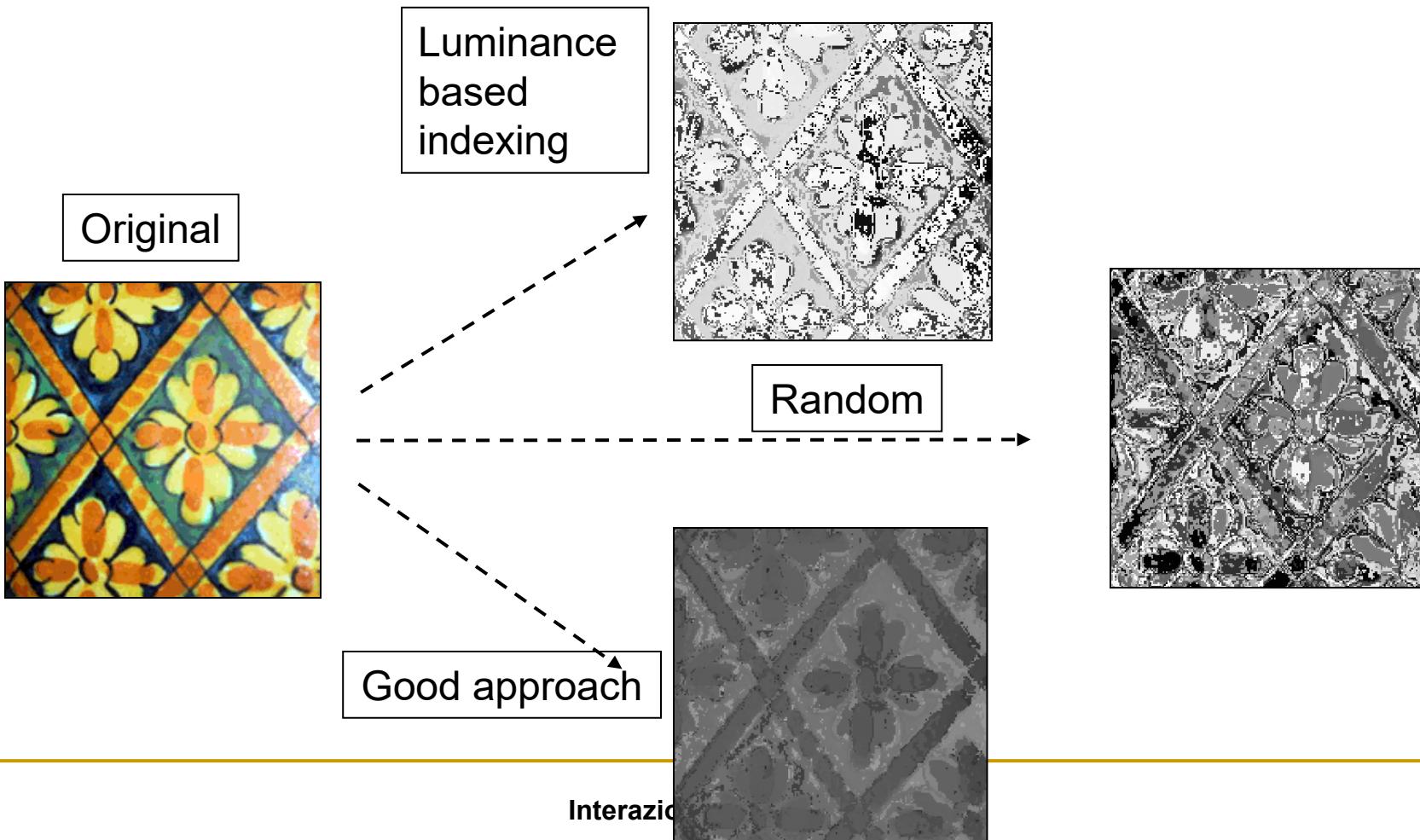




Il re-indexing



Cambiare la posizione della palette e quindi anche l'indice corrispondente in modo da creare una matrice di indici che abbia l'entropia minima.





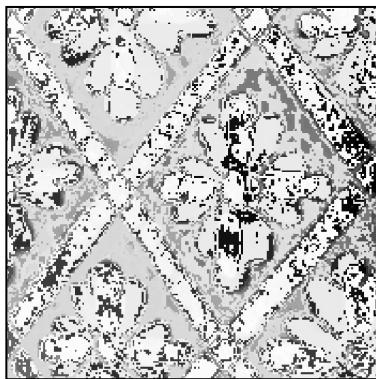
Cambiare la posizione della palette e quindi anche l'indice corrispondente in modo da creare una matrice di indici che abbia l'entropia minima.

- L'idea generale è che se ai colori **di pixel adiacenti** associo **indici numericamente vicini**, la differenza tra tali indici diventa più piccola.
- Questo permette di diminuire l'entropia dell'immagine, garantendo un miglior rapporto di compressione quando si utilizzano formati che usano la codifica differenziale (che vedremo più avanti nel corso)
- Purtroppo, trovare la disposizione ottimale (quella ad entropia minima) è un problema NP-hard. Per una palette con **M** colori, bisogna cercare tra **M!** possibili ordinamenti.
- Pertanto, gli algoritmi di reindexing si basano sulla ricerca di soluzioni che si avvicinano a quella ottima.

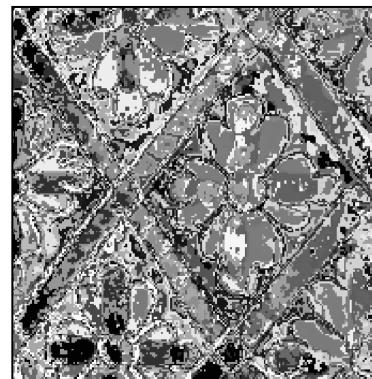


Minimizzare l'entropia

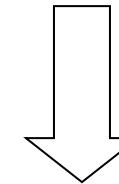
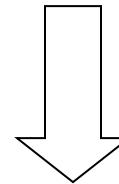
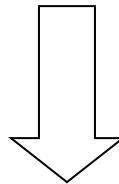
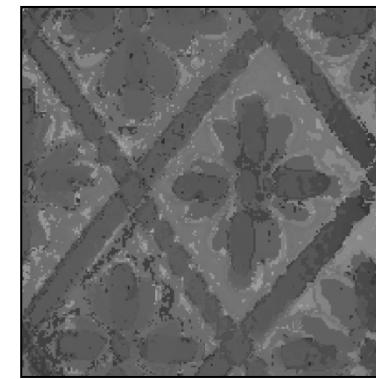
Luminance



Random



Good



5.25

5.85

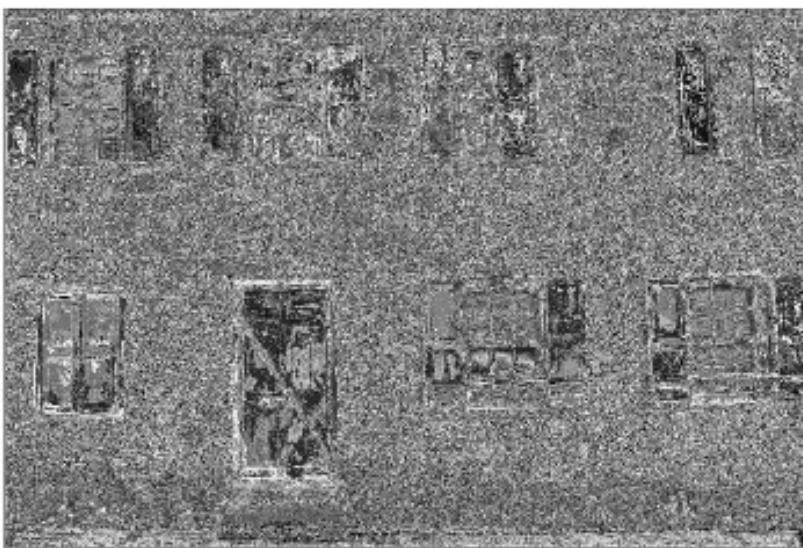
4.65



(a)



(b) Entropy=5,762



(c) Entropy=6,860



(d) Entropy=5,010