LA MISURA DEL COLORE

Prof. Giovanni Buccolieri

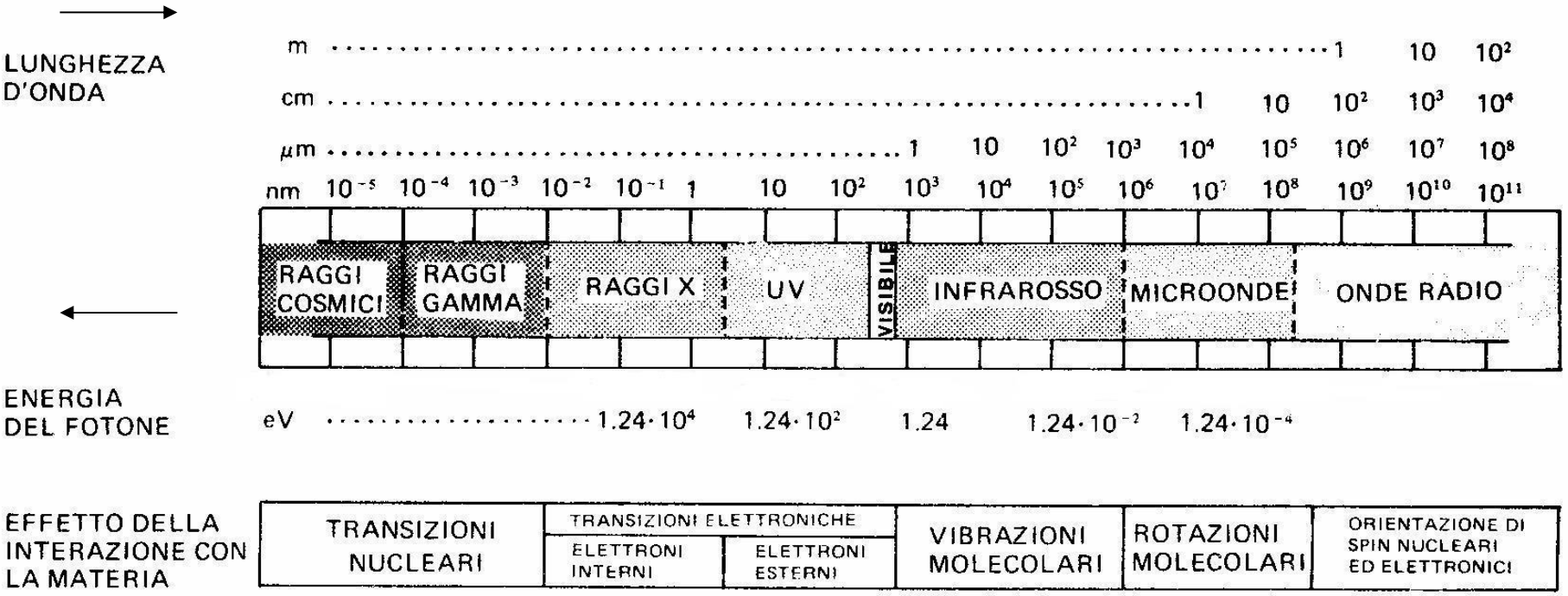
Università del Salento

e-mail: giovanni.buccolieri@unisalento.it

LA MISURA DEL COLORE

1 La percezione del colore
2 Il modello RGB
3 Come si misura il colore. Il modello di Munsell
4 Le equazioni del colore
    4.1 L'oggetto analitico
    4.2 Le sorgenti
    4.3 Gli osservatori
5 Determinazione dei valori tristimolo
6 Altre scale di misura del colore
7 La spettroscopia in riflettanza
    7.1 Strumentazione per misure di riflettanza
    7.2 La strumentazione utilizzata
8 Applicazioni

Convenzionale suddivisione dello spettro elettromagnetico



λ: lunghezza d'onda (m), f: frequenza (Hz=s^{-1})

h: costante di Planck (6.63 10^{-34} Js), energia E=hf, $\lambda f=c$ (nel vuoto c=3 10^8m/s)

Visibile: 400 nm< λ <700 nm (1nm=10^{-9}m)

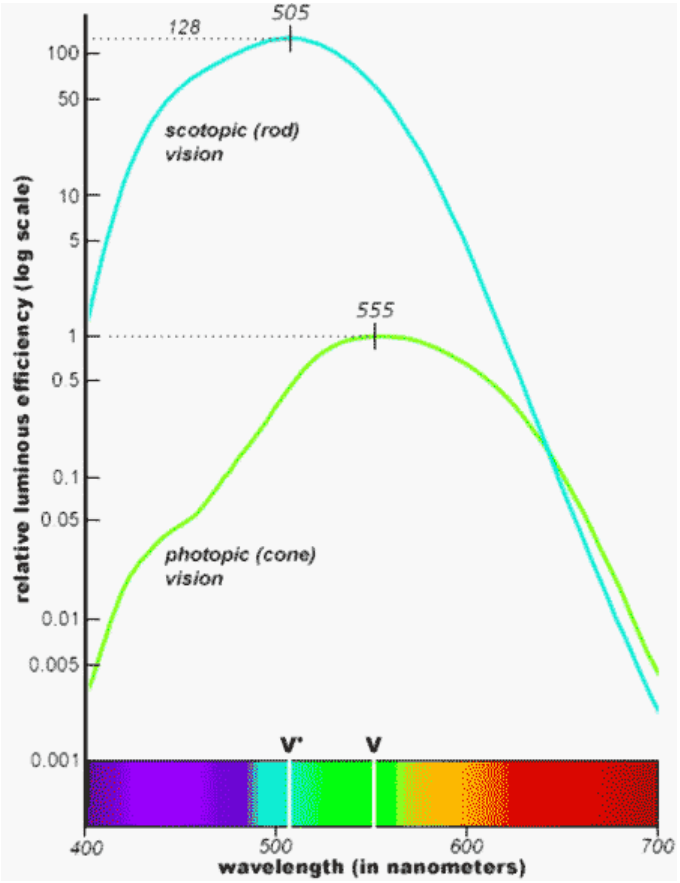
1 La percezione del colore

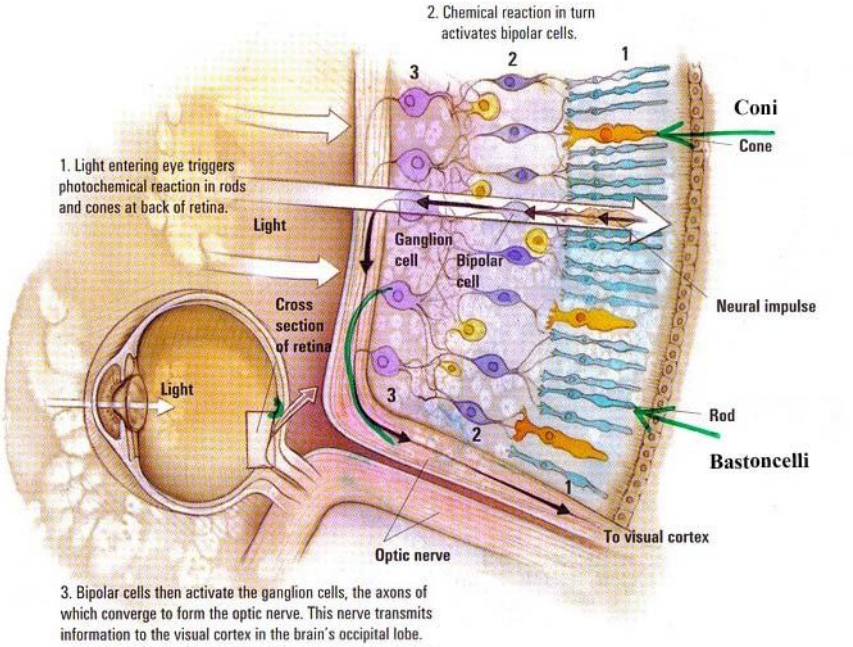
La percezione del colore è un fenomeno soggettivo.

Nonostante ciò è provato che la maggior parte delle persone ha una sensibilità cromatica simile: è su questo che si basa la teoria sulla misurazione del colore. Le cause che generano la percezione del colore sono però legate a proprietà della luce (visibile) e quindi a grandezze oggettivamente riconoscibili: la luce emessa da una sorgente interagisce con la materia e giunge ai nostri occhi modificata in seguito all'interazione.

L'occhio umano è il nostro trasduttore che trasforma la luce in impulsi elettrici: la parte sensibile è la retina. Le cellule sensibili alla luce sono definite, per la loro forma, bastoncelli e coni: i primi sono sensibili ad intensità di luce molto basse e restituiscono una immagine acromatica. I coni, di tre tipi, sono sensibili rispettivamente al rosso (R), verde (G) e blu (B): la combinazione di questi tre segnali determina la percezione cromatica.

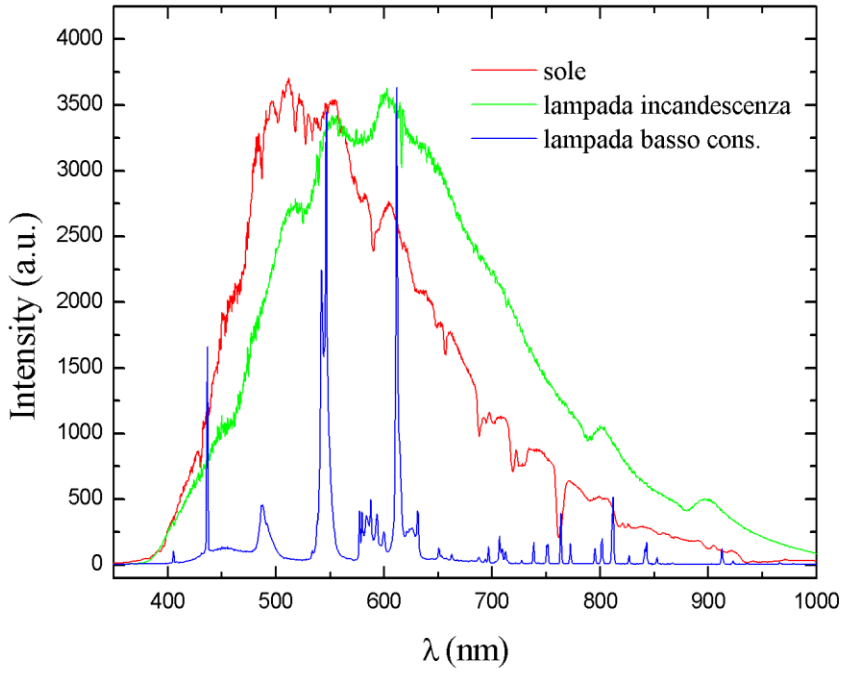
La sensibilità dei coni e dei bastoncelli è differente: i primi hanno massima sensibilità sul verde-giallo mentre i bastoncelli sul verde-azzurro. In pratica, quindi, la sensazione cromatica dipende dall'intensità della luce (percezione falsata dei colori).





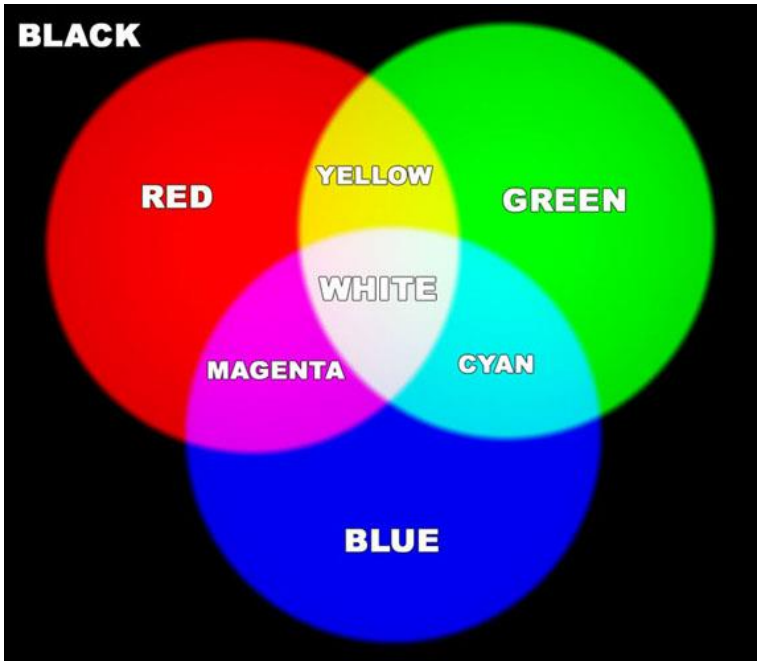
2 Il modello RGB

Ogni corpo per poter essere osservato deve essere illuminato e la sua risposta cromatica dipende dalla sorgente di illuminazione (illuminante) o meglio dallo spettro dell'illuminante. Graficando l'intensità della luce emessa da una qualsiasi sorgente in funzione dell'energia o della lunghezza d'onda si ottiene quello che si chiama spettro di emissione della sorgente.



In figura si riporta lo spettro di emissione di due sorgenti in funzione della lunghezza nonché le indicazioni dei colori che convenzionalmente si associano ai vari intervalli di lunghezze d'onda

La **luce bianca** dovrebbe avere uno spettro piatto mentre luci con intensità concentrate in bande di lunghezze d'onda ci appaiono colorate: la luce bianca si può ottenere combinando con opportune intensità luci blu (B), verde (G) e rosso (R) che sono detti pertanto ***colori primari additivi*** dato che gli altri colori possono essere ottenuti dalla loro combinazione (Modello RGB).



Dalla figura si evince come il rosso con il verde da il giallo (Y), il verde con il blu il ciano (C) e il rosso con il blu il magenta (M) (o porpora).

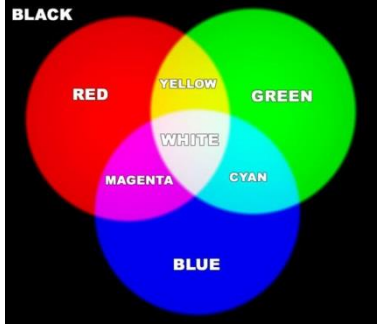
Esiste anche la ***sintesi sottrattiva***: sottrazione dallo spettro bianco di colori corrispondenti a certe lunghezza d'onda. In pratica ciò si ottiene utilizzando materiali parzialmente opachi (o parzialmente trasparenti) come ad esempio i vetri colorati (filtri ottici).

Quando della luce bianca (R, G, B) attraversa un filtro che assorbe il blu, resta il giallo (Y). Un filtro che assorbe il verde restituisce il magenta (M) e un filtro che assorbe il rosso restituisce il ciano o turchese (C). La sovrapposizione dei tre filtri citati (filtri fondamentali) produce il nero ossia assenza di luce (Modello CMYK).

Sintesi sottrattiva

Nella mescolanza e/o sovrapposizione di colori (pigmenti), la sintesi sottrattiva gioca un ruolo fondamentale.
È noto da piccoli che la sovrapposizione del pastello giallo sul blu (ciano o turchese) produce il verde: la luce bianca riflessa dal foglio bianco è filtrata dal ciano (G+B) e dal giallo (R+G) e quindi si ottiene il verde.
Quando della luce penetra all'interno di una pittura che contiene un pigmento colorato questo assorbe alcune porzioni dello spettro e riflette il resto: la luce risultante ha la composizione di quella iniziale meno la parte assorbita dal pigmento. Il colore di un pigmento è quindi un colore sottrattivo.

Allo stesso modo stendendo del colore magenta (R+B) su un foglio di carta bianca ed illuminandolo con luce bianca il verde sarà assorbito dal pigmento magenta mentre blu e rosso saranno riflessi.

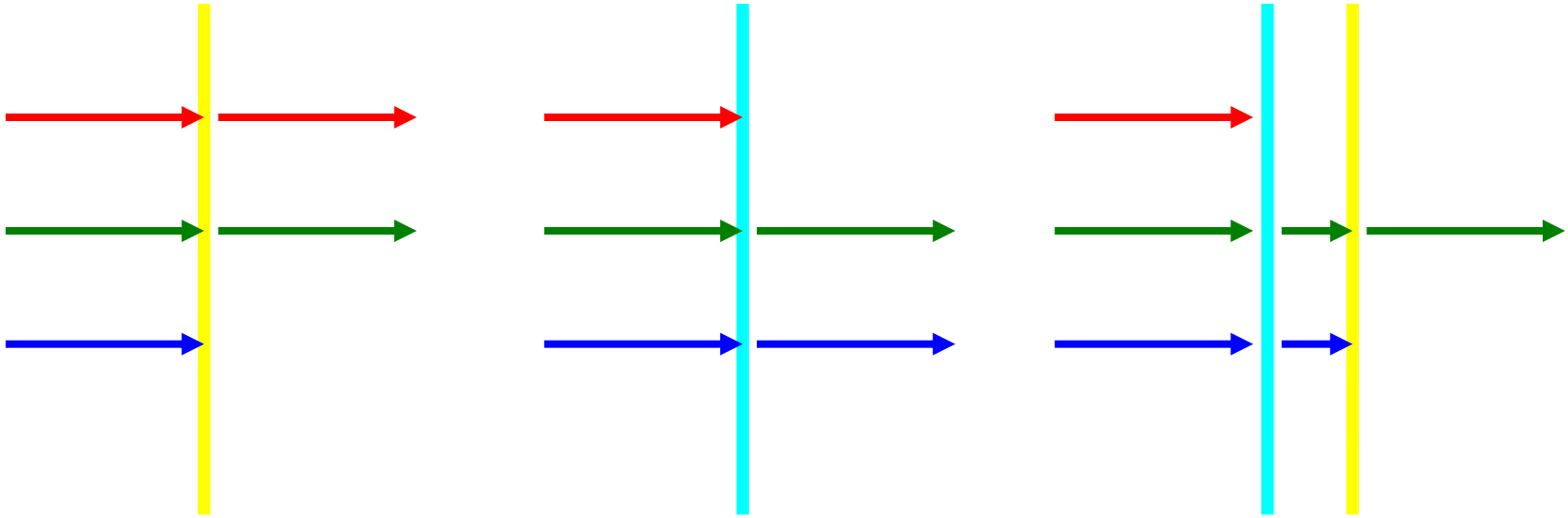


Pigmento giallo

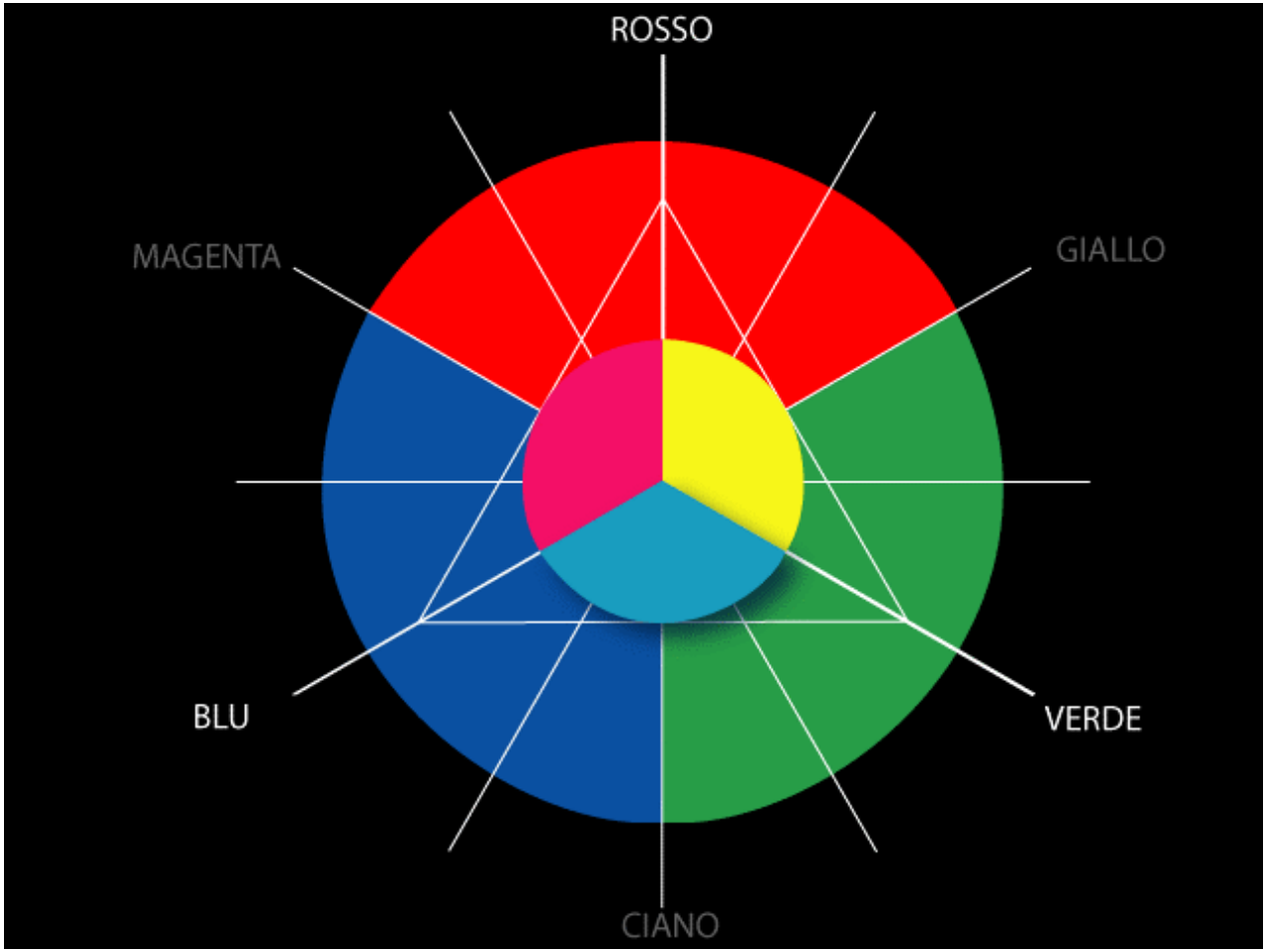
Pigmento turchese

Pigmento giallo su pigmento turchese

Luce bianca (**RGB**)



Come regola pratica si può affermare che *ogni colore primario assorbe il secondario opposto e trasmette gli altri due*: per esempio il blu assorbe giallo e trasmette ciano e magenta.



3 Come misurare il colore. Il modello di Munsell

In generale misurare una grandezza significa identificare la natura della grandezza, stabilire quindi una unità di misura e infine confrontare questa con la grandezza in esame. Abbiamo detto che il colore è una sensazione soggettiva e quindi il modo più ovvio di misurarlo è quello del confronto.
Sul principio del confronto diretto si basano i sistemi colorimetrici: il campione in esame si accosta ad un "catalogo di colori" e si determina quello che si avvicina di più. La richiesta è che il "catalogo di colori" sia riproducibile in tutto il mondo. Un passo importante è quello di capire quali sono i parametri che differenziano due "colori vicini" del "catalogo". I criteri di distinzione sono fondamentalmente tre:

·Criterio del ***chiaro-scuro***: capire quale tra due campioni ci appare più luminoso. Questo ovviamente dipende dalle condizioni di osservazione e di illuminazione del campione;
·Criterio dell'***intensità*** *o* ***saturazione***: quale ci appare più vivido e quale più sbiadito;
·Criterio della ***tonalità***: capire se due colori sono nettamente diversi (verde e marrone) oppure tra due colori uguali chi dei due tende a un terzo colore.

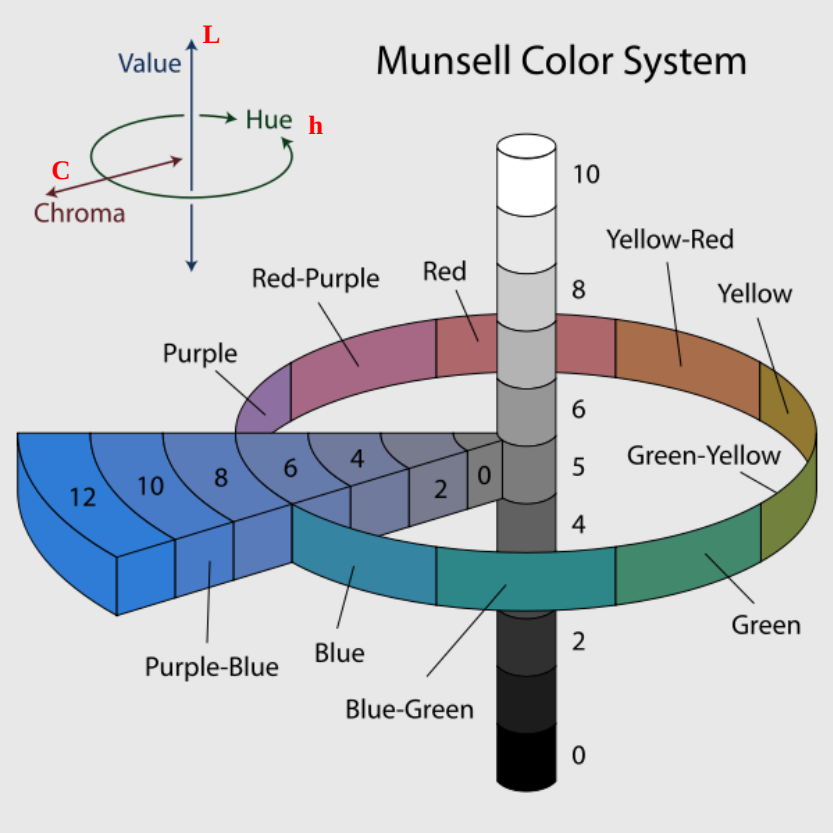
Nel 1905 fu introdotto il primo catalogo dei colori da **Munsell** che differenzia i colori in base a tre attributi detti ***tonalità***, ***luminosità*** e ***saturazione***:

·La **tonalità** o **tinta h** (**hue**) definisce il colore (verde, rosso, ecc.). La tinta dipende fisicamente dalla lunghezza d'onda dominante. Le lunghezze d'onda dello spettro visibile si estendono da 400 a 750 nm ($1nm=10^{-9}m$);

·La **luminosità** o **brillanza L** (**value, luminance, lightness o brightness**) corrisponde fisicamente alla quantità di energia luminosa riflessa da un colore definibile chiaro o scuro. Un colore sarà tanto più luminoso quanto meno nero contiene; il rosso chiaro avrà più luce di uno più scuro. Il bianco ideale riflette il 100% della radiazione mentre il nero assorbe il 100% della radiazione;

·La **saturazione** o **purezza C** (**saturation o chroma**) è l'intensità di un colore e dipende fisicamente dalla distribuzione spettrale. Un colore sarà saturo quando non contiene bianco. Ci indica quanto una tinta è contaminata da altre tinte o dal grigio. I colori acromatici (scala dei grigi) hanno saturazione 0% mentre le tinte pure hanno saturazione 100%.

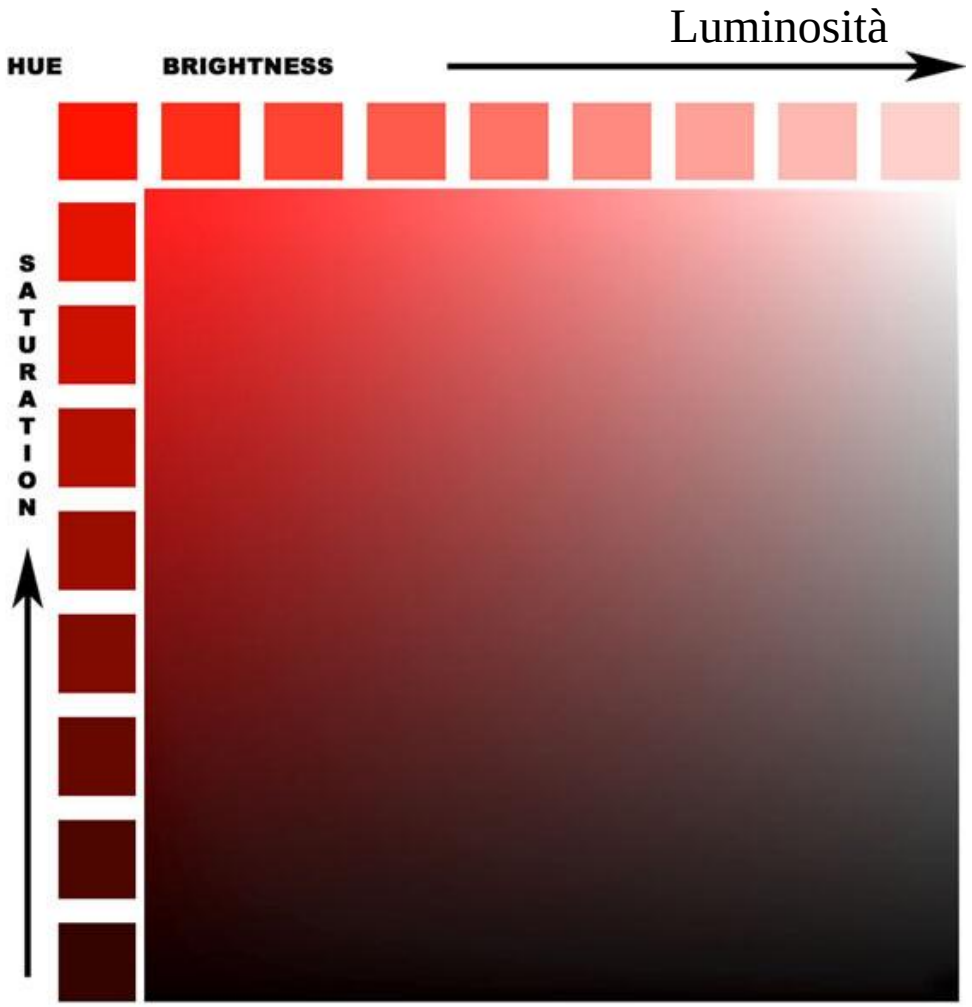
Il sistema di Munsell è riportato graficamente in figura: l'asse centrale riporta la luminosità (**L**) passando dal nero (in basso) al bianco (in alto) attraverso dieci differenti livelli di grigio (saturazione 0). Perpendicolarmente all'asse, per ogni livello di grigio, sono disposti i cinque colori principali (rosso, giallo, verde, blu e viola) relativi alle diverse tonalità (**h**). Per ogni tonalità, la saturazione del colore aumenta dal centro verso l'esterno dove si trova il colore puro (croma, **C**).



Nella versione attuale il catalogo di Munsell comprende 1100 campioni.

Quando negli anni trenta si sviluppò la spettrofotocolorimetria vennero introdotte equazioni per descrivere il colore: il modello di Munsell risultò subito di difficile fusione con tali equazioni e ciò creò una netta frattura tra il modello di Munsell e la descrizione tramite equazioni del colore.

Presa una tinta (hue) vario saturazione (chroma) e luminosità o brillanza (value o brightness)



4 Le equazioni del colore

In precedenza è stato detto che la sensibilità dell'occhio umano si può scomporre nei contributi dei tre tipi di coni: l'idea dei primi sistemi colorimetrici era appunto quella di associare ad un qualsiasi colore una terna di numeri riconducibili ai segnali prodotti dalle tre tipologie di coni. Le diverse procedure di misura del colore furono codificate nel 1931 con un accordo internazionale dalla CIE (Commission International de l'Eclairage). Furono pubblicate delle tabelle che descrivevano sia le curve caratteristiche delle emissioni luminose di opportune sorgenti che le risposte cromatiche di un osservatore medio. Dato che il colore di un oggetto dipende (i) dalla risposta soggettiva dell'occhio, (ii) dalle caratteristiche dell'oggetto e (iii) dalle caratteristiche della luce che lo illumina, è necessario misurare questi tre parametri.

4.1 L'oggetto analitico

Ad ogni lunghezza d'onda (o banda di lunghezza d'onda), ogni campione assorbe, riflette, trasmette e disperde determinate percentuali di luce rispetto a quella incidente: la larghezza di banda è normalmente dell'ordine della decina di manometri. Normalmente si valuta quindi l'assorbimento di luce in intervalli di 5, 10 o 20 nm.

4.2 Le sorgenti

Per definire una sorgente di luce bisogna misurare la sua intensità alle diverse lunghezze d'onda di emissione. Nel 1931, per convenzione, furono definite tre sorgenti dette ***illuminanti standard A***, ***B*** e ***C*** che rappresentano rispettivamente le emissioni di:

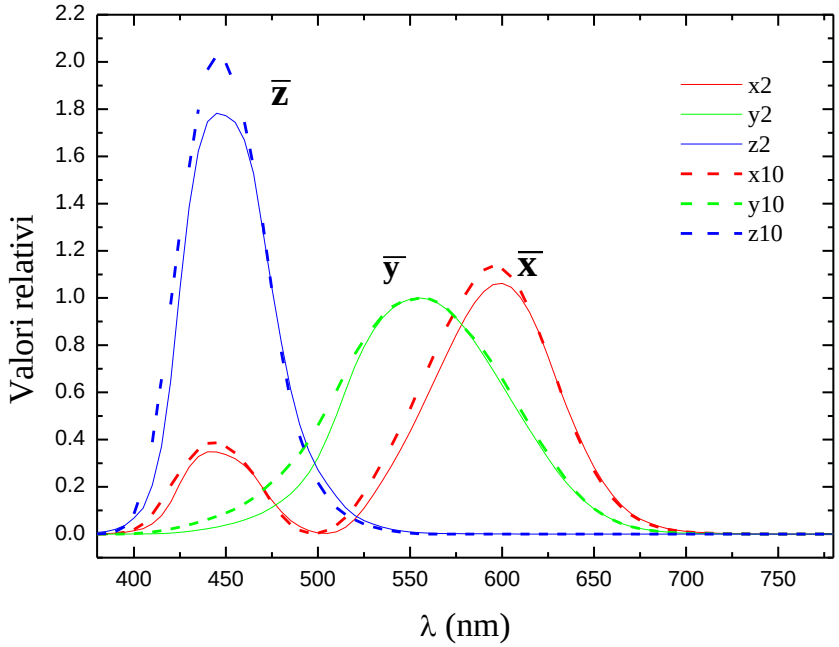
- una lampada ad incandescenza;
- sole a mezzogiorno (luce diretta);
- sole a mezzogiorno considerando la luce che entra da una finestra esposta a nord.

In seguito furono introdotti altri illuminanti.

È importante notare che attualmente non si impiegano particolari illuminanti: gli strumenti di misura sono dotati di sorgenti a composizione spettrale nota e costante e mediante dei calcoli si risale all'illuminante desiderato.

4.3 Gli osservatori

La parte sensibile al colore di qualsiasi apparecchio di misura deve avere la sensibilità dell'occhio umano medio: per fare ciò sono stati fatti in passato moltissime prove su persone non affette da disturbi visivi. In questi esperimenti si adottarono, per convenzione, una terna di curve (prodotte da sorgenti luminose) che riproducessero la sensibilità ai tre colori fondamentali dei coni di un osservatore medio (**colorimetria tristimolo**).



In figura si riportano le intensità delle tre curve dette,

$\bar{x}$, $\bar{y}$ e $\bar{z}$

e rispettivamente relative al rosso, verde e blu.

La forma delle tre curve è tale che:

- nessuna delle tre curve è ottenibile combinando tra loro le altre due;
- le tre aree sono uguali.

In termini matematici ciò significa che le tre funzioni sono una base ortonormale dello spazio da esse generato.

Inoltre l'andamento della curva (verde) è lo stesso di quello della sensibilità alla luce dei coni quindi corrisponde alla sensazione luminosa dell'occhio.

Negli esperimenti si presero in considerazioni aree luminose di ampiezza pari a 2°: dimensione apparente dell'unghia del pollice osservata tenendo il braccio disteso in avanti (osservatore a 2°). Nel 1964 la CIE introdusse l'osservatore a 10° e le rispettive curve: le differenze rispetto all'illuminante a 2° sono piccole ma significative (Figura precedente).

5 Valori tristimolo

Siamo ora in grado di tradurre in una terna di numeri la sensazione percepita da un osservatore che guarda un corpo "colorato" illuminato da una data sorgente. Supponiamo che una certa sorgente con spettro **I** illumini una campione che ha uno spetto di assorbimento **S**: il prodotto **I*S** (Fig. A) rappresenta lo spettro che il campione invia all'osservatore che scompone questa luce in base alle curve di sensibilità dei tre recettori che sono rispettivamente le curve **x*I*S**, **y*I*S** e **z*I*S** (Fig. B). L'integrazione di queste tre curve forniscono i valori dei tre stimoli luminosi.

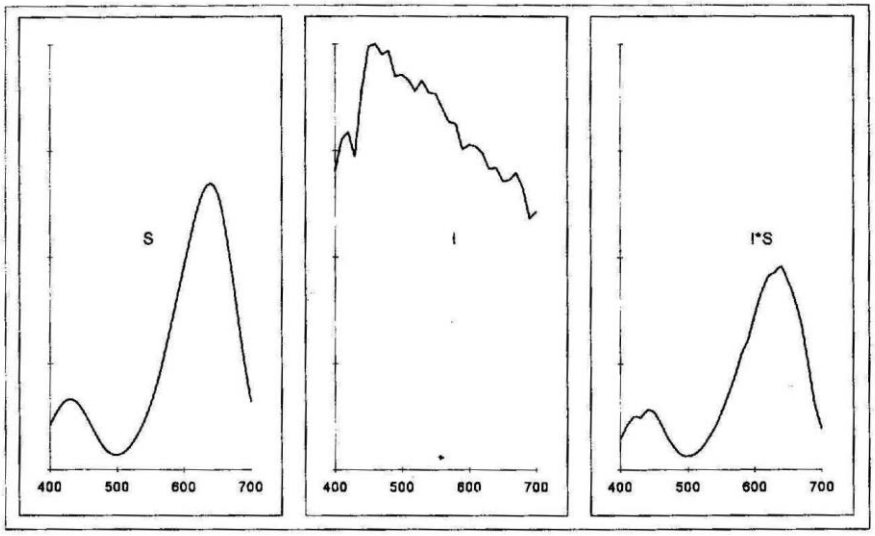


Fig. A

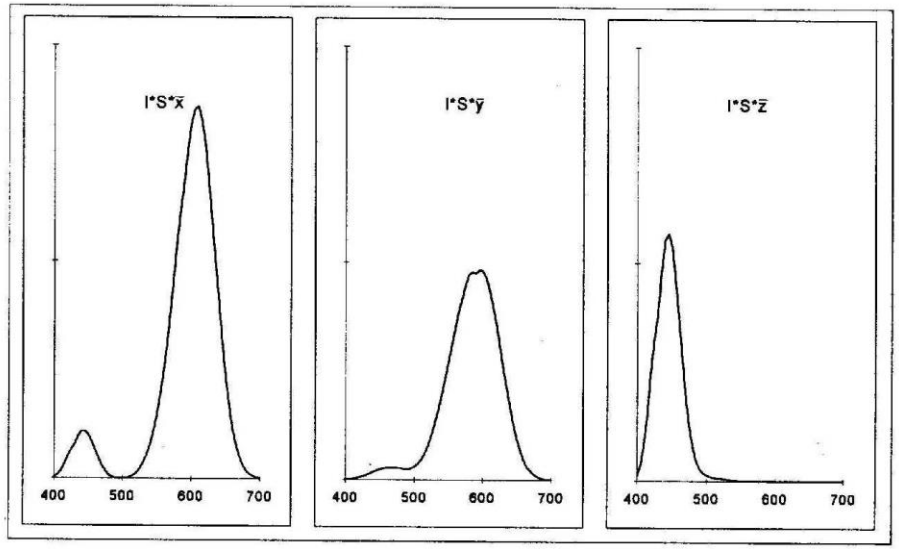
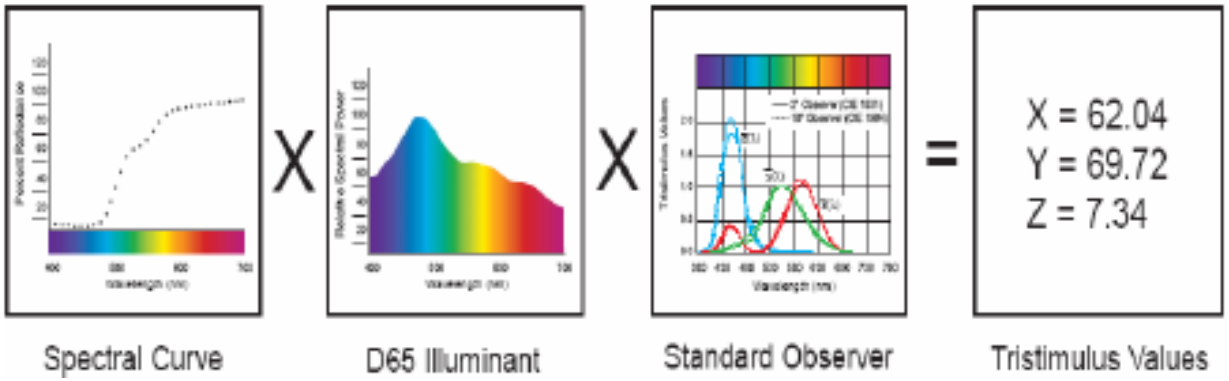


Fig. B

Calcolando gli integrali (aree) delle funzioni della figura precedente si ottengono **X**, **Y** e **Z** dette **coordinate tristimolo**:

$$X = \int_{380nm}^{780nm} S(\lambda) I(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda \,, \quad Y = \int_{380nm}^{780nm} S(\lambda) I(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \,, \quad Z = \int_{380nm}^{780nm} S(\lambda) I(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda \qquad (1)$$

dove **I(λ)** tiene conte della emissione della sorgente (illuminante) e **S(λ)** tiene conto della riflettanza del campione. La figura che segue ripete le operazioni da eseguire per arrivare ai valori tristimolo **X**, **Y** e **Z** (spazio CIE 1931 XYZ).



I risultati della tabella indicano che il colore analizzato ha una componente verde-rossa maggiore rispetto al blu (basso valore di Z). Possiamo affermare che il colore è abbastanza chiaro dato che la componente Y è elevata. Non riusciamo ad avere una idea ben precisa di quale sia la tonalità dominante del colore analizzato.

Coordinate di cromaticità

Per avere delle coordinate più facilmente correlabili alla percezione del colore, si passa dallo spazio **CIE 1931 XYZ** allo spazio **xyz** definito mediante le seguenti trasformazioni:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \qquad (2)$$

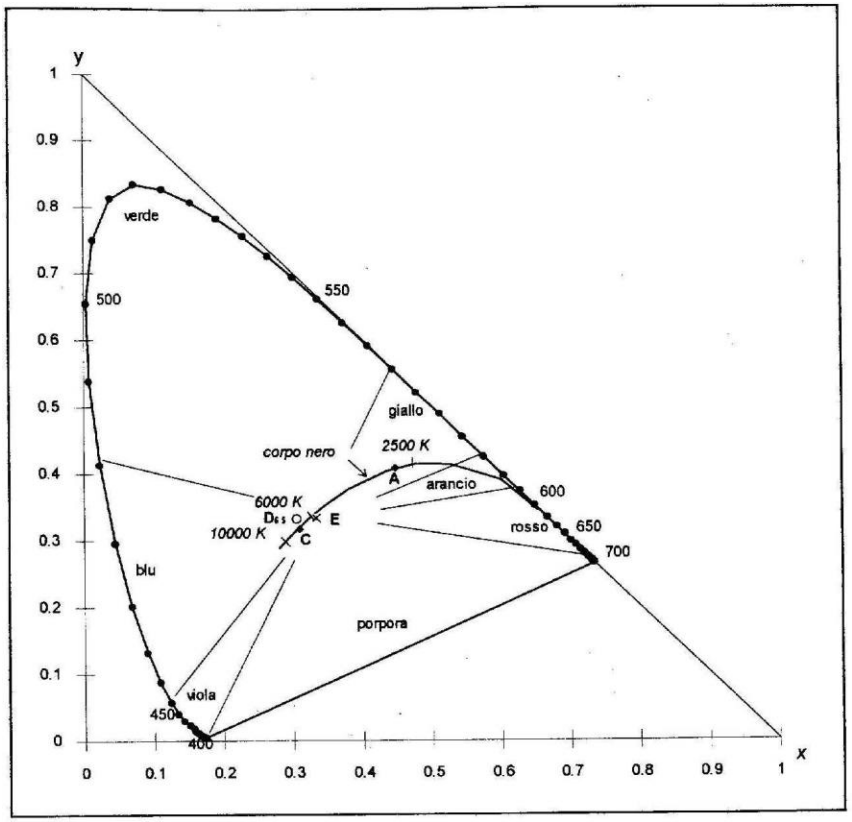
Dalle equazioni 2 si ricava:

$$x + y + z = 1 \qquad (3)$$

L'equazione 2 permette di rappresentare il colore in un qualsiasi piano **xy**, **xz** o **yz**. Convenzionalmente si considera la rappresentazione nel piano **xy** ricordando che la grandezza **Y** equivale alla luminosità: il colore può quindi essere rappresentato nel piano **xy** tenendo conto dell'asse **Y**. Lo spazio **Yxy**, rappresentato graficamente nella figura che segue (detto ***zoccolo del colore***), è stato utilizzato per anni e le sue coordinate sono dette ***coordinate di cromaticità***.

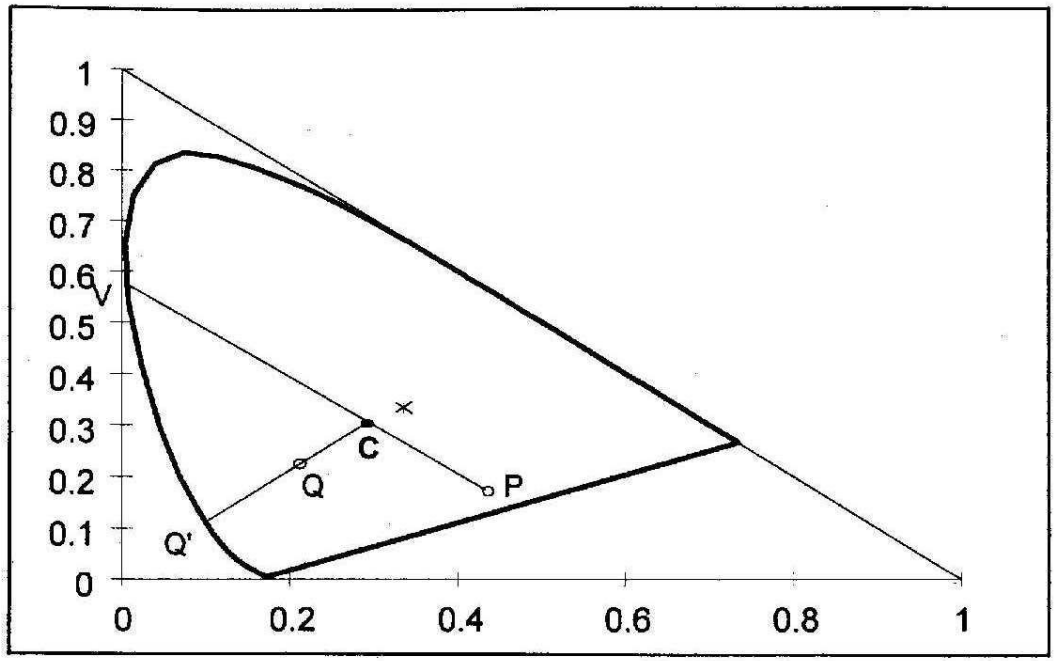
Lo zoccolo del colore

Lo zoccolo del colore rappresenta ovviamente la sezione perpendicolare all'asse **Y** di un solido. I colori così definiti sono irreali in quanto più saturi di qualunque colore esistente: di conseguenza se si riportano nel diagramma di cromaticità tutti i colori dello spettro si ottiene una curva (tutti i colori reali saranno compresi all'interno di tale curva).



Il bianco ideale ha coordinate x=1/3, y=1/3 e quindi z=1/3 e nel diagramma è indicato con **E**. La retta che collega i due estremi dello spettro (λ=400 nm e λ=700 nm) rappresenta i colori totalmente saturi: porpora o magenta (colori complementari al verde). In figura è riportata la curva di emissione di corpo nero a diverse temperature nonché i punti rappresentanti gli illuminanti A, C e D65.

In riferimento alla figura, sia **C** rappresenta la sorgente (illuminante in uso), x il bianco ideale nelle particolari condizioni sperimentali e sia **Q** la rappresentazione di un colore analizzato (ad esempio un blu). Unendo **C** con **Q** si determina il punto **Q'** d'intersezione con la curva dello spettro: **Q'** fornisce la lunghezza d'onda dominante (**tonalità**) mentre il rapporto **CQ/CQ'** fornisce la purezza (**saturazione** del colore **Q**).



Dalla figura si evince come per i punti nella zona del porpora, punto **P**, l'operazione appena descritta non può essere ripetuta: è possibile però determinare la lunghezza d'onda dominante complementare (punto **V** del grafico).

Lo spazio **Yxy** non risulta essere uno spazio omogeneo ed isotropo:
dato un punto del diagramma di cromaticità, tutti i punti percepiti come equidistanti da tale punto sono disposti lungo un'ellisse in cui il punto iniziale si trova nell'intersezione degli assi e la direzione degli stessi dipende dalla posizione del punto (spazio non isotropo).

Dalla figura precedente si osserva che lo spazio delle tonalità del colore non è omogeneo: si nota infatti una grande separazione dei punti spettrali della zona verde rispetto agli estremi dello spettro. D'altronde la risposta a "differenze di colore" da parte del nostro occhio non è omogenea: mentre nel verde il nostro occhi è molto sensibile a cambi di tonalità, nel blu e nel rosso siamo più sensibili a variazioni di saturazione.

Al fine di alterare le proporzioni fra le varie zone del diagramma di cromaticità, dilatandole o restringendole in modo da renderlo omogeneo ed isotropo, vennero condotti numerosi tentativi e furono introdotte nuove coordinate colorimetriche.

6 Altre scale di misura del colore

Uno degli spazi oggi più utilizzato è lo spazio **CIELAB 1976**, derivante dallo spazio Yxy, caratterizzato dalle coordinate **L***, **a*** e **b***.

L* rappresenta la luminosità, sempre positiva, cioè la posizione sull'asse verticale dal nero (L*=0) al bianco (L*=100).

I valori di **a*** e **b*** che definiscono la cromaticità del colore, possono assumere valori positivi e negativi e i rispettivi assi, perpendicolari tra loro, si intersecano sull'asse L* (Figura seguente).

La coordinata a*>0 rappresenta la componente rossa mentre a*<0 la verde.

La coordinata b*>0 rappresenta la componente gialla mentre b*<0 quella blu.

Non esistono limiti reali per a* e b*.

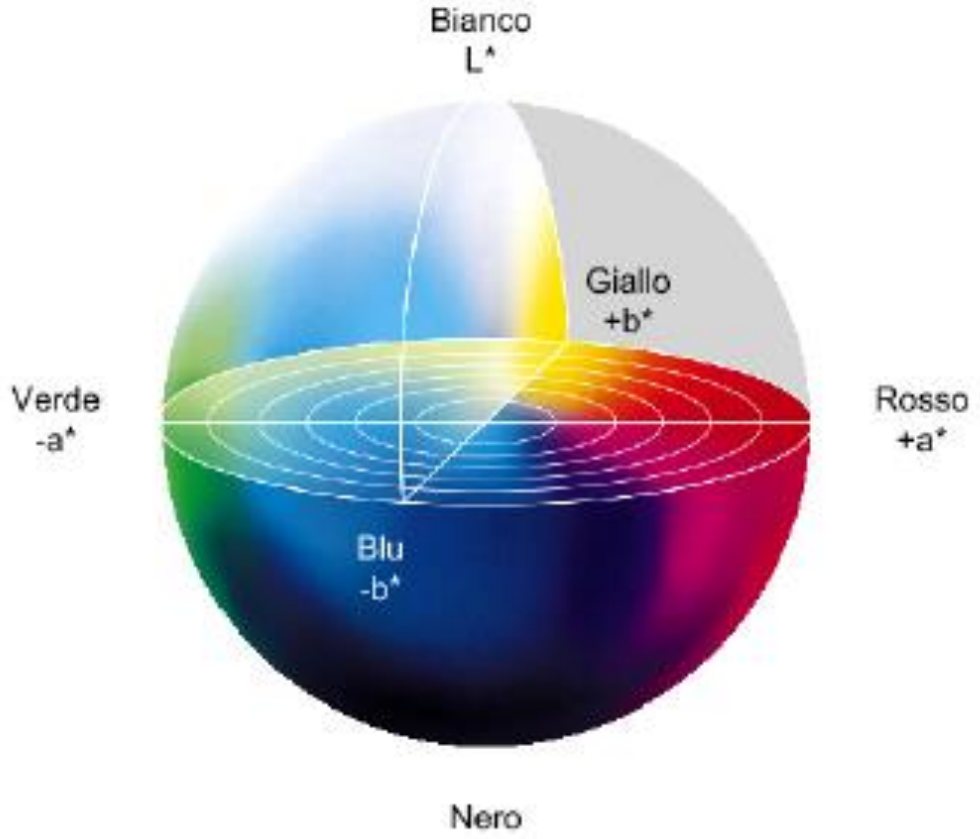
Le equazioni che definiscono le tre coordinate sono le seguenti:

$$L^* = 116\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16$$

$$a^* = 500\left(\sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}}\right) \qquad (4)$$

$$b^* = 200\left(\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}}\right)$$

in cui X, Y e Z sono i valori di tristimolo misurati sperimentalmente (riferiti ad un certo illuminante ed osservatore) mentre X_n, Y_n e Z_n sono i valori di tristimolo del bianco riferiti allo stesso illuminante ed osservatore: quindi Y_n si pone pari ad 100.



Il grosso vantaggio del sistema CIELAB è che le distanze fra due punti dello spazio corrispondono alle differenze percepite dall'occhio. Nello spazio CIELAB la distanza δE* tra due punti è definito come la "classica" distanza tra due punti nello spazio:

$$\delta E^* = \sqrt{(\delta L^*)^2 + (\delta a^*)^2 + (\delta b^*)^2} \qquad (5)$$

Indicativamente si può affermare che un δE* pari ad 1 è percepibile con difficoltà anche mettendo a confronto diretto le due superfici colorate: il confronto è relativamente semplice per δE*=2 mentre per δE*>5 la differenza è evidente anche senza confronto diretto.

7 La spettroscopia in riflettanza

La spettroscopia in riflettanza è la tecnica di indagine ottica basata sulla misura del fattore di riflettanza spettrale di una superficie in funzione delle caratteristiche fisiche della radiazione incidente. I campi di applicazione di questa tecnica sono svariati (medicina, biologia, beni culturali, agricoltura e altri).

Solo recentemente la spettroscopia in riflettanza nel visibile e vicino infrarosso ha trovato applicazioni in ambito artistico permettendo a scienziati e restauratori di ottenere informazioni fondamentali per la conoscenza, il restauro e la salvaguardia del Patrimonio Culturale.

I recenti progressi nella spettroscopia in riflettanza a fibra ottica (FORS) hanno reso possibile effettuare misure non invasive senza la necessità di prelevare campioni dell'oggetto in esame. In questo modo è possibile acquisire un gran numero di dati sperimentali su aree "puntiformi" in pieno accordo con le regole di conservazione. Inoltre, l'attuale strumentazione necessaria all'applicazione di tale tecnica risulta facilmente trasportabile, permettendo l'esecuzione di misure *in situ*: l'utilizzo di tecniche non distruttive e la possibilità di eseguire analisi in situ risultano, nel campo del restauro dei beni culturali, due richieste fondamentali.

Nel caso in cui l'opera in studio sia un dipinto, un affresco o un qualsiasi manufatto dipinto, un'analisi spettroscopica della sua superficie fornisce lo spettro di riflettanza caratteristico del materiale pittorico. In quest'ambito, la spettroscopia in riflettanza offre la possibilità di identificare i pigmenti pittorici attraverso il confronto con un database di riferimento, monitorare la presenza di prodotti di alterazione, analizzare il colore e i suoi eventuali cambiamenti nel tempo o in seguito ad interventi di restauro.

7.1 Strumentazione per misure di riflettanza

L'apparecchiatura utilizzata per eseguire misure di riflettanza consiste essenzialmente in uno spettrofotometro. Esso è costituito, generalmente, da tre elementi principali:

- la **sorgente**;
- il **monocromatore;**
- il **rivelatore**.

La sorgente emette una luce di composizione spettrale nota che viene inviata sulla superficie del campione attraverso dispositivi capaci di realizzare una certa geometria di illuminazione. Il campione rinvia il segnale luminoso, a meno della quota assorbita, sul monocromatore che lo decompone nelle varie lunghezze d'onda. Lo spettro ottenuto è raccolto da un rivelatore che emette un segnale elettrico proporzionale all'intensità della luce ad intervalli di lunghezza d'onda. Un dispositivo di calcolo fornisce la curva spettrale risultante sotto forma di punti o curva interpolante; questi dati vengono opportunamente elaborati per ottenere le terne tristimolo e da esse le terne cromatiche nello spazio colorimetrico desiderato.

La sorgente deve emettere radiazioni policromatiche contenenti tutte le lunghezze d'onda del campo richiesto. Per la regione visibile si utilizzano lampade a incandescenza (a filamento di tungsteno o lampade tungsteno-alogene); per la regione dell'infrarosso si utilizzano barre di vari materiali riscaldate elettricamente a temperatura adeguata. La tensione di alimentazione deve essere rigorosamente stabilizzata onde evitare fluttuazioni nell'intensità e nella tonalità della luce emessa. E' fondamentale, infatti, che la lampada abbia uno spettro non solo noto ma costante perché eventuali variazioni vanno ad interferire sulle misure.

Alla sorgente segue una fenditura, detta fenditura d'ingresso che, associata a lenti e/o a specchi, serve a collimare i raggi ed evitare luce diffusa nello strumento.

In spettrofotometria sono utilizzati due tipi di monocromatori: quelli basati su filtri ottici che bloccano una parte della luce, lasciando passare solo la parte desiderata e quelli basati su un elemento disperdente come il prisma o un reticolo, che separano le varie componenti della radiazione e permettono la successiva selezione della banda desiderata. I monocromatori basati su elementi disperdenti, usati negli spettrometri di qualità, fanno incidere il fascio policromatico su un prisma o su un reticolo in grado di deviare le radiazioni in funzione della lunghezza d'onda. Il prisma è in grado di disperdere le radiazioni grazie al fenomeno della rifrazione, mentre i reticoli si basano sui fenomeni della diffrazione e dell'interferenza.

I rivelatori sono dispositivi capaci di produrre un segnale elettrico proporzionale all'intensità delle radiazioni che lo investono. Tale segnale viene opportunamente amplificato e trasmesso ad un sistema computerizzato di elaborazione e presentazione dei dati. Normalmente un computer interfacciato con lo strumento permette sia l'acquisizione e l'elaborazione e la memorizzazione dei risultati che il confronto degli spettri ottenuti con basi di dati su supporto digitale.

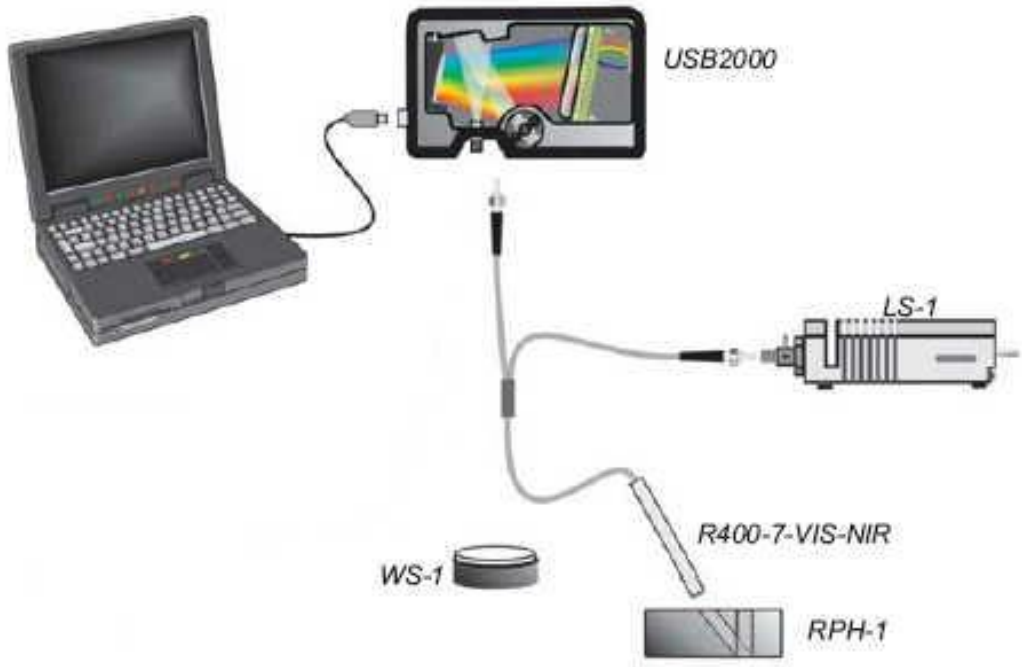
7.2 La strumentazione utilizzata

Di seguito sarà brevemente illustrato lo spettrofotometro USB-2000 della Ocean Optics. Esso è in grado di fornire sia le curve di riflettanza che le coordinate colorimetriche nei diversi spazi.

Il sistema di campionamento ottico dello spettrofotometro Ocean Optics USB-2000 è costituito dai seguenti elementi fondamentali:

- lo spettrometro USB2000;
- la sorgente di luce LS-1;
- la sonda in fibra ottica con relativa base di appoggio e il diffusore standard WS-1.

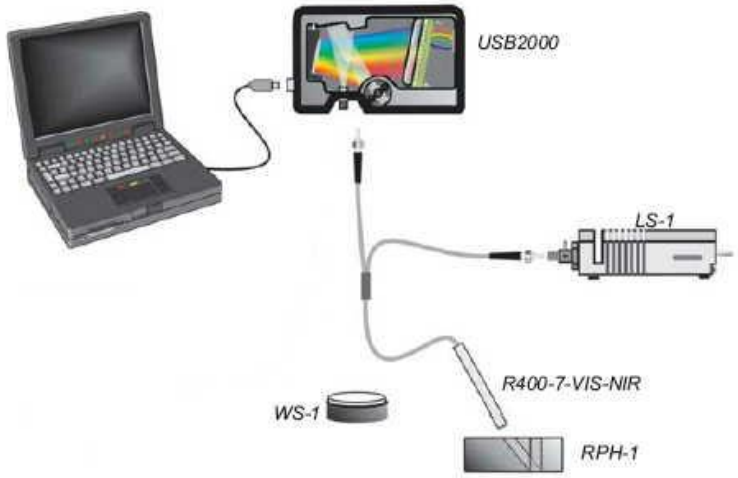
Le acquisizioni sono state eseguite mediante apposito software OOIBase32 installato su un notebook e fornito dalla Ocean Optics.



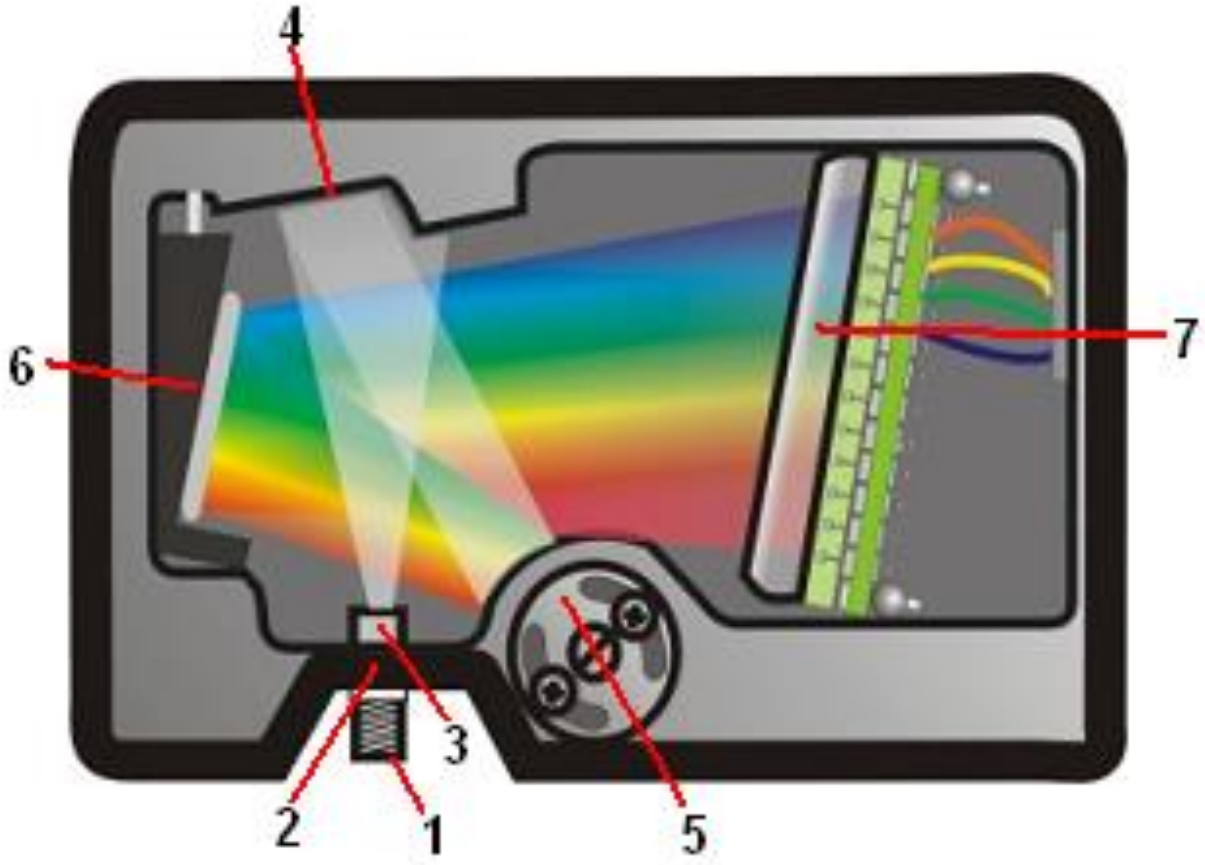
La sorgente di luce bianca LS-1 è costituita da una lampada alogena di tungsteno alimentata da un trasformatore da 12V. La temperatura di colore della sorgente è di 3100 K e l'intervallo spettrale di emissione si estende dal visibile al vicino infrarosso (360-2000nm).

La sonda di riflessione consiste in un fascio di sette fibre ottiche aventi ciascuna un diametro di 400 μm: sei di queste, posizionate in cerchio, forniscono l'illuminazione della superficie del campione, mentre la lettura in riflessione è affidata alla sola fibra in posizione centrale.

Il fascio di fibre ottiche si scompone in due rami: una estremità viene posizionata vicino alla superficie del campione, le altre due vengono collegate una alla sorgente di luce e l'altra allo spettrometro, costituendo rispettivamente il ramo di input ed il ramo di output della sonda.
Lo standard WS-1 è costituito da un disco (con diametro 32 mm) di Teflon in grado di diffondere uniformemente il 98% della radiazione che lo investe nell'intervallo di lunghezze d'onda che va da 250 ai 1500 nm, caratteristica che lo rende un diffusore quasi ideale. Il rivelatore è costituito da una matrice lineare CCD di Silicio (2048 elementi), sensibile tra 200 e 1100 nm, con risoluzione spettrale di 0,38 nm.



Lo spettrometro USB2000 si connette ad un calcolatore attraverso una porta USB. La figura illustra il cammino della luce attraverso il banco ottico dello spettrometro. Tutte le parti sono alloggiate in un contenitore a tenuta di luce, il cui interno è dipinto in nero opaco per eliminare l'effetto di riflessioni parassite.



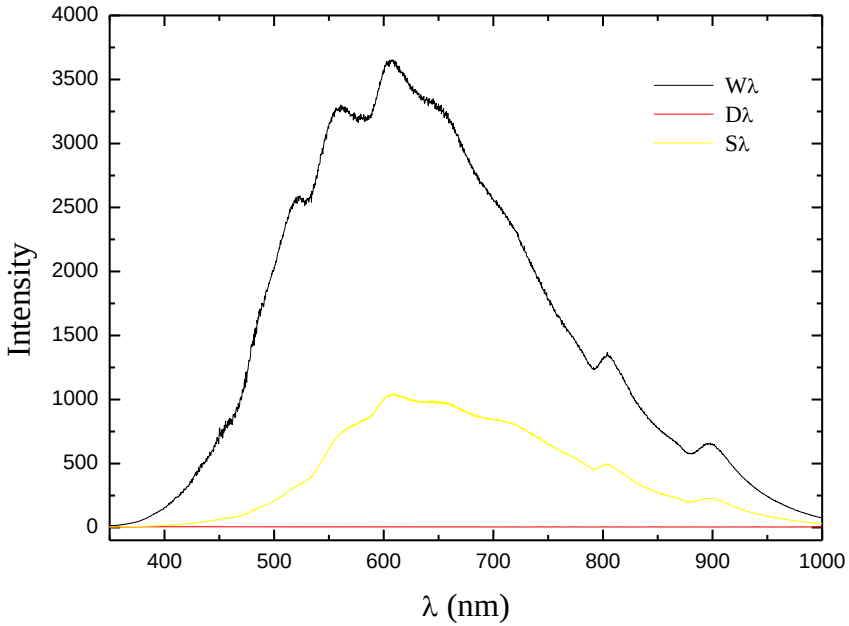
•1 connettore SMA per la sonda;
•2 fessura d'ingresso;
• 3 filtro d'ingresso;
• 4 specchio collimatore;
• 5 reticolo di diffrazione;
• 6 lo specchio focalizzatore;
•7 rivelatore CCD.

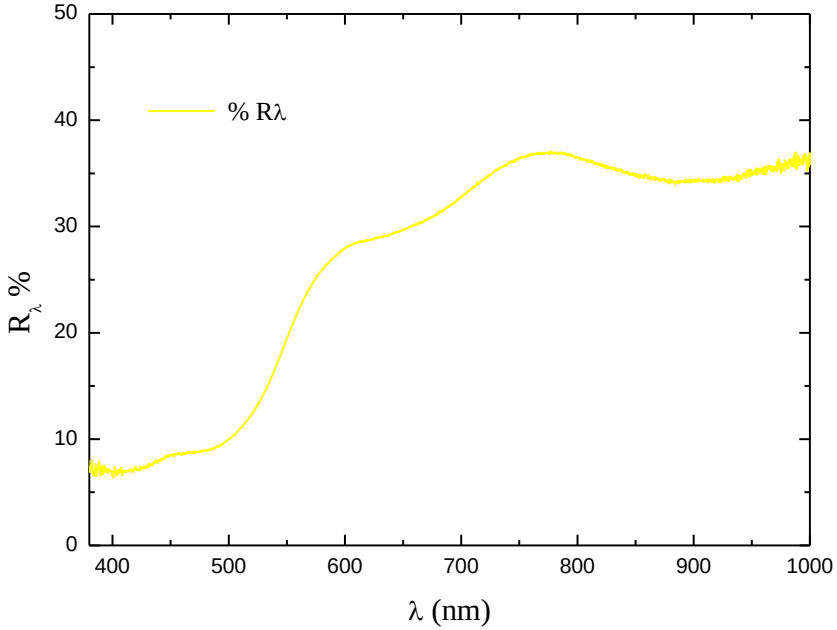
Prima di ogni misura in riflettanza si esegue l'acquisizione e la memorizzazione dello spettro del bianco standard WS-1 e del nero. Successivamente il segnale luminoso della sorgente è inviato sulla superficie del campione attraverso il ramo di input della sonda di riflessione. Una base mantiene la sonda a 90° rispetto alla superficie del campione. Il ramo di output della sonda di riflessione porta la luce retrodiffusa (geometria unidirezionale 0°/0°) dal campione allo spettrometro ed i dati raccolti vengono inviati al programma OOIBase32 che visualizza le informazione spettrali elaborate.
La riflessione è espressa come percentuale (%Rλ) relativa alla riflessione dello standard WS-1 di riferimento (relazione 7):

$$\%R_\lambda = \frac{S_\lambda - D_\lambda}{W_\lambda - D_\lambda} \times 100 \qquad (7)$$

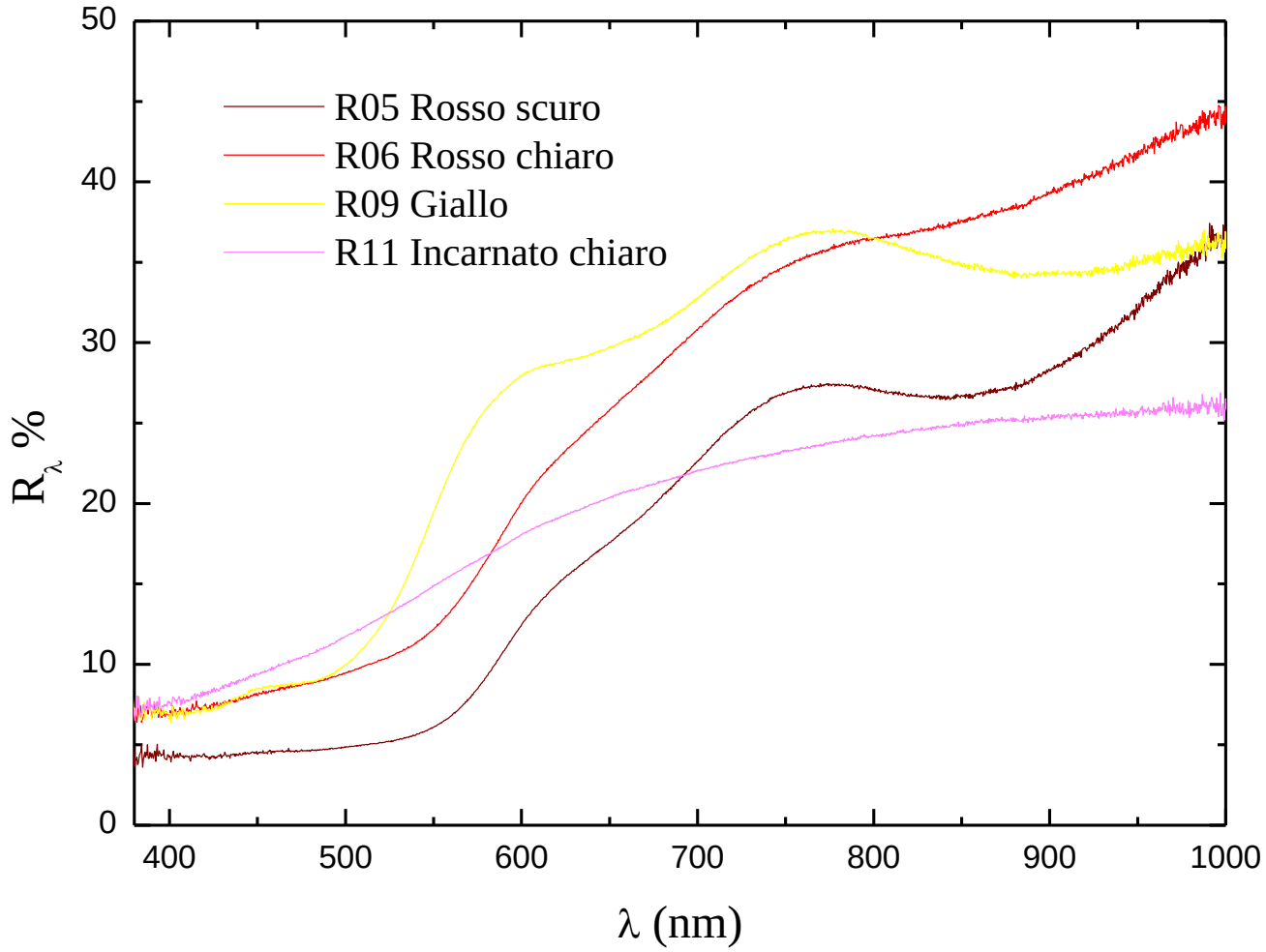
dove S_λ è l'intensità del campione alla lunghezza d'onda λ, D_λ è l'intensità del nero alla lunghezza d'onda λ, W_λ è l'intensità del riferimento alla lunghezza d'onda λ.

$$\%R_\lambda = \frac{S_\lambda - D_\lambda}{W_\lambda - D_\lambda} \times 100$$





Confronto tra diversi colori



8 Applicazioni

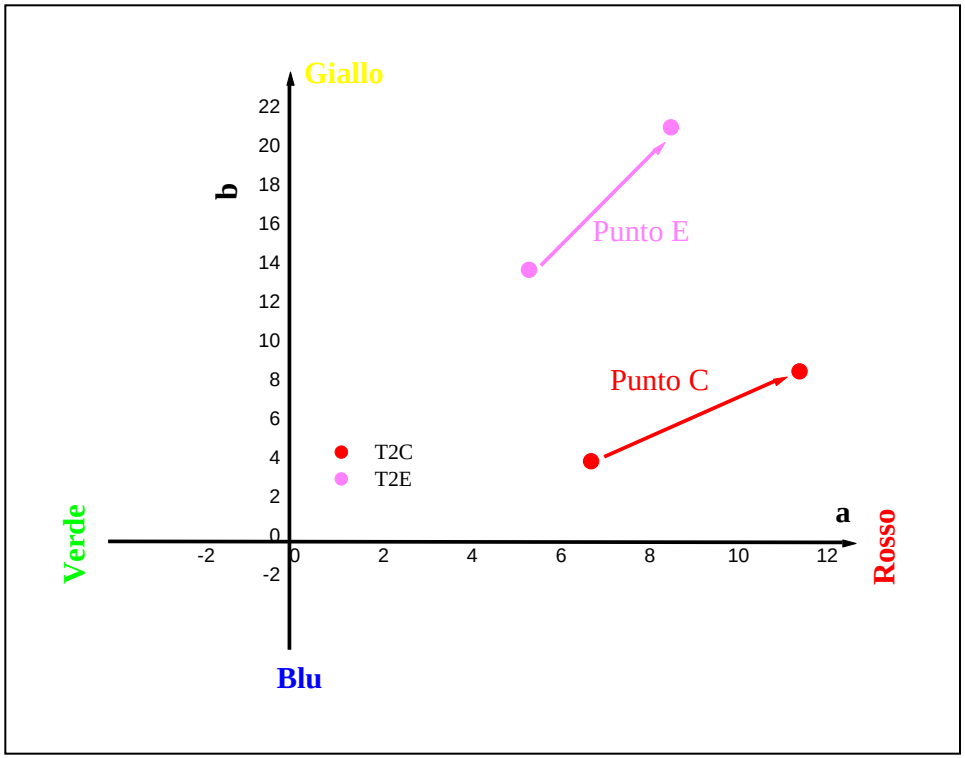
Di seguito si riporta una applicazione della colorimetria al restauro. In figura è riportato un dettaglio dell'opera raffigurante l'*incontro di Gesù con la samaritana presso il pozzo di Giacobbe* (Gv 4, 1-26). Si tratta di un dipinto (olio su tela) probabilmente cinquecentesco proveniente dal monastero "*Le figlie di Sant'Anna*" di Bari e restaurato presso la Soprintendenza di Bari nel corso del 2006.

Di seguito sono riportati i risultati di misure colorimetriche eseguite su due regioni, denominate **C** (rosso scuro) ed **E** (incarnato), analizzate prima e dopo un intervento di pulitura. Lo spazio colorimetrico usato è il CIELAB.
In tabella sono riportate le coordinate prima e dopo la pulitura.

Punto di misura	**Prima della pulitura**			**Dopo la pulitura**		
	L*	**a***	**b***	**L***	**a***	**b***
C	29.0	6.8	4.1	29.7	11.5	8.7
E	35.2	5.4	13.9	52.7	8.6	21.2

Punto di misura	ΔL*	Δa*	Δb*	ΔE*
C (rosso scuro)	0.7	4.7	4.6	6.6
E (incarnato)	17.5	3.2	7.3	19.2

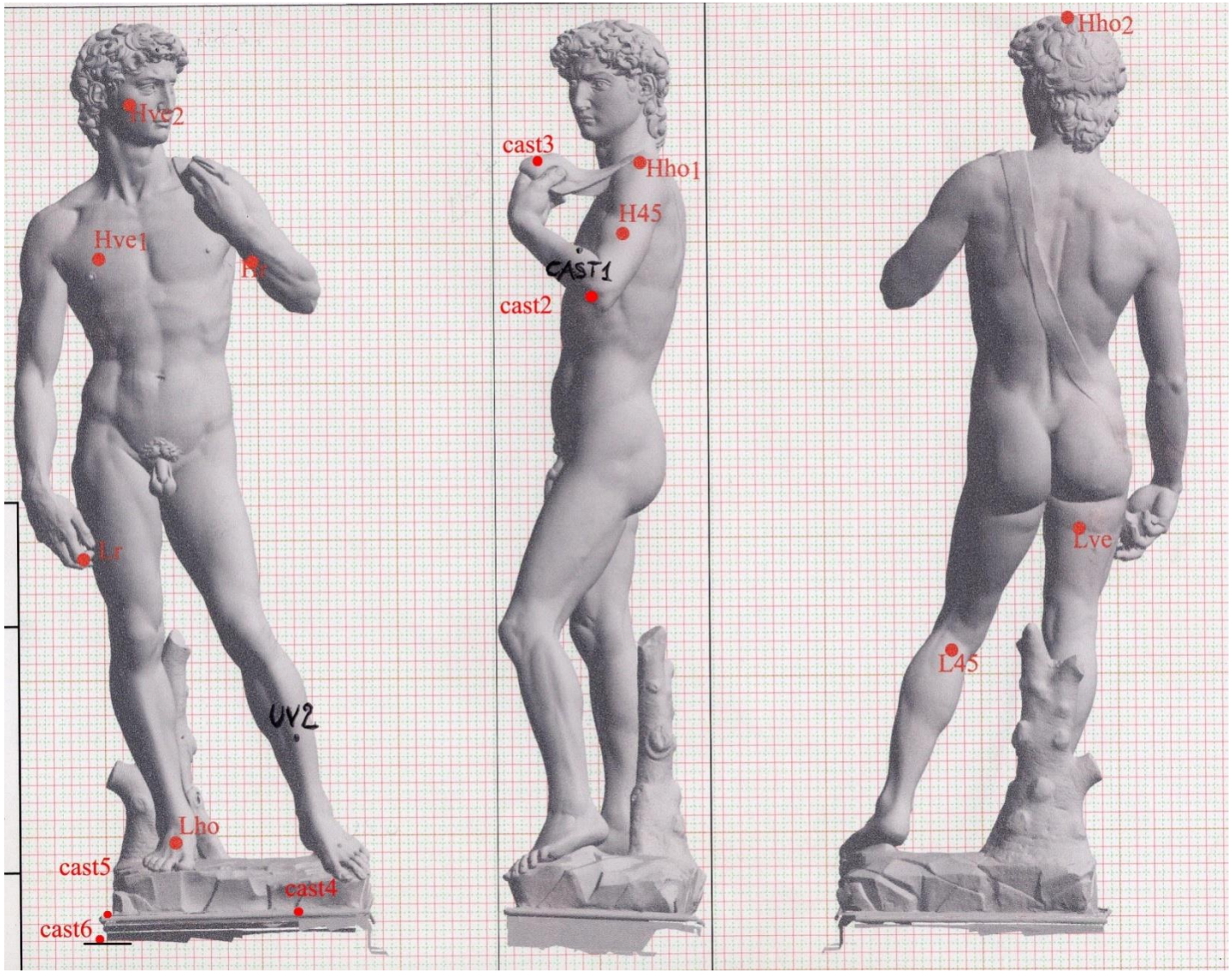
In tabella sono riportate le variazioni delle coordinate colorimetriche. Si evince che il processo di pulitura ha prodotto un aumento della chiarezza **L***: tale aumento è molto più evidente nel colore chiaro (punto E). Diversamente, il rosso scuro (punto C) subisce una variazione di solo 0.7. La rimozione dello sporco superficiale incide quindi molto sulla chiarezza dei colori chiari.
Molto interessanti risultano le variazioni delle coordinate **a*** e **b***: nella figura che segue sono riportate in un piano a chiarezza costante le coordinate colorimetriche dei due punti campionati e la loro variazione.



La componente **a*** subisce una notevole variazione positiva (pari a 4.7) nella regione di colore rosso scuro (punto C) e una variazione positiva ma meno marcata nelle zone di colore rosa con **Δa***=3.2 (punto E).

La colorimetria sul David di Michelangelo

Il laboratorio di Archeometria dell'Università del Salento dal 2002 ad oggi studia le polveri che si depositano sul David.

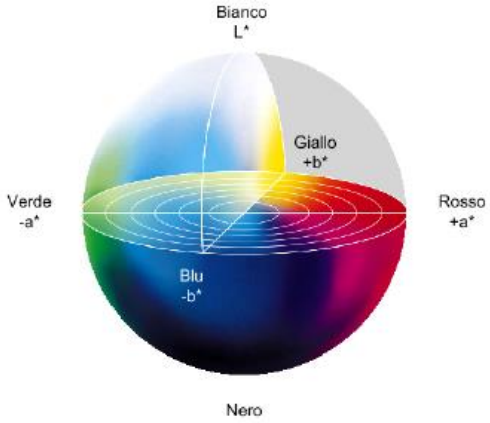

Hve2
Hve1
Hr
Lr
UV2
Lho
cast5
cast4
cast6
cast3
Hho1
H45
CAST1
cast2
Hho2
Lve
L45

area	L	a	b
Lho	71,2	1,1	12,0
Hve1	71,6	2,4	14,7
Hve2	82,0	0,5	12,0
Lve	77,2	1,3	9,3
Hr	79,0	0,5	8,7
Lr	78,9	1,5	13,3

prima del restauro

area	L	a	b
Lho	80,0	0,6	12,1
Hve1	82,0	0,6	10,6
Hve2	84,0	0,2	9,2
Lve	84,0	0,1	6,8
Hr	77,0	0,6	8,2
Lr	71,0	1,0	12,1

dopo il restauro



area	ΔE	Δ L	Δ a	Δ b
Lho	9	9	-0,5	0,1
Hve1	12	11	-1,8	-4,1
Hve2	3	2	-0,3	-2,7
Lve	7	7	-1,2	-2,5
Hr	2	-2	0,1	-0,5
Lr	3	2	-0,5	-1,1

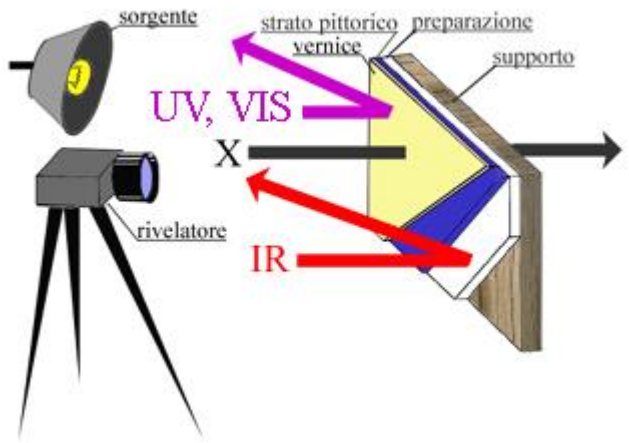
differenze dopo-prima

area	Δ E (1 anno)	Δ E (3 anni)
Lho	2,7±0,7	4,0±1,0
Hve1	2,0±1,0	1,0±1,0
Hve2	0,7±0,8	0,6±0,6
Lve	0,7±0,3	1,7±0,6
Hr	2,0±1,0	4,0±1,0
Lr	1,3±0,9	1,0±0,8

differenze nel tempo dopo restauro

RIFLETTOGRAFIA IR

La riflettografia infrarossa è una metodologia di indagine ottica che si applica in genere a dipinti, manoscritti e disegni. Rientra fra le tecniche di imaging quali l'analisi fotografica, la radiografia, la spettroscopia per immagini. La riflettografia in infrarosso può essere considerata la naturale evoluzione della fotografia infrarossa, eseguita tradizionalmente con pellicole bianco/nero sensibili fino a circa 800 nm. L'impiego delle moderne telecamere - è più recentemente di fotocamere a stato solido - permette, infatti, di ottenere riprese fino a lunghezze d'onda nella zona dell'infrarosso vicino (NIR: 800-2000 nm) e perciò l'indagine riflettografica è particolarmente adatta a rendere visibile il disegno (denominato disegno sottostante) tracciato dall'autore sulla preparazione presente sotto lo strato pittorico.



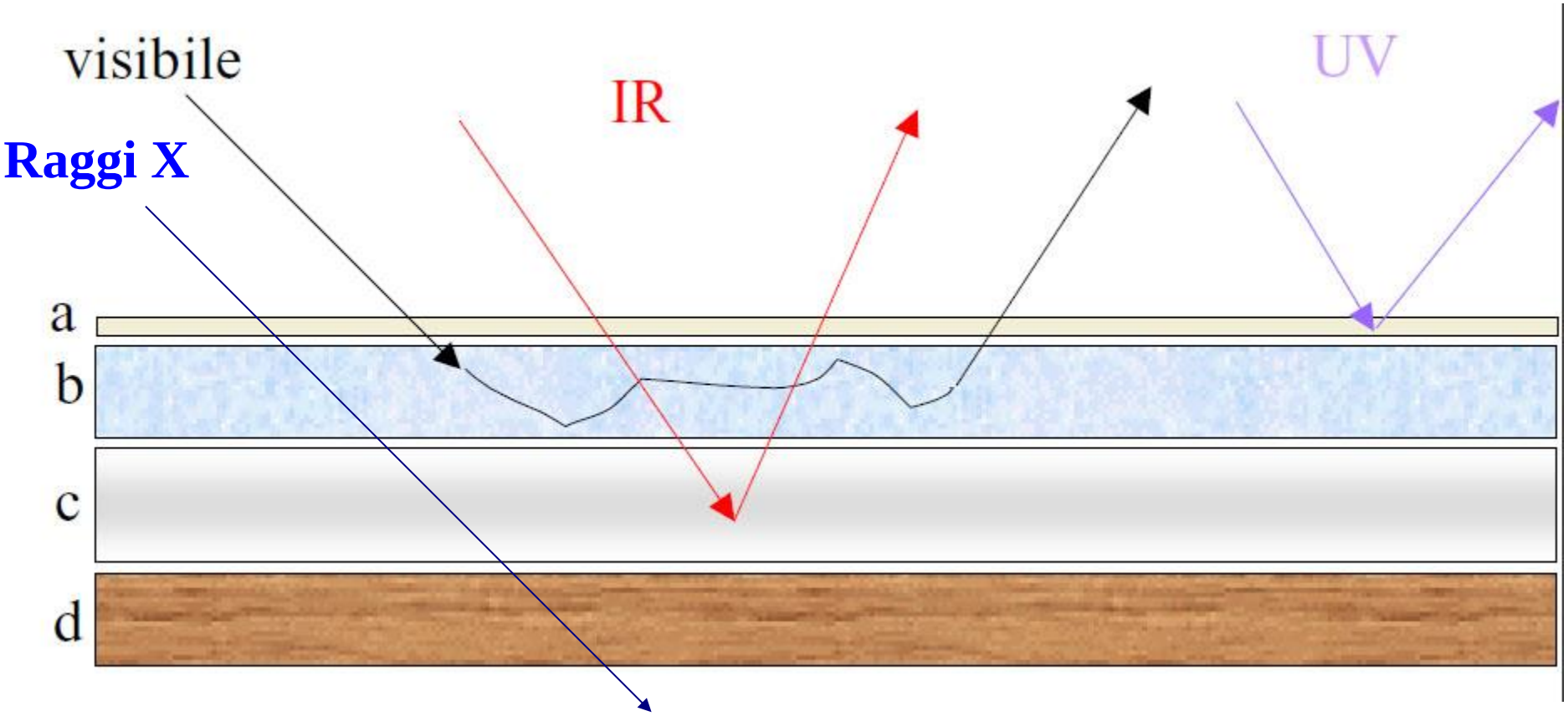
L'esame del disegno soggiacente nella maggior parte dei casi è di grande interesse per lo storico dell'arte perché rivela in modo diretto la mano dell'autore e ciò può essere di grande aiuto per esempio nei casi di dubbia attribuzione.

RIFLETTOGRAFIA IR

Il disegno è a volte costituito da poche tracce essenziali, in altri casi invece è eseguito con grande dettaglio e precisione fino al tratteggio delle ombre, rappresentando così una vera e propria opera d'arte, testimonianza fedele del processo creativo destinata a rimanere nascosta, ma per nostra fortuna resa visibile da questa tecnica.

L'analisi riflettografica inoltre è in grado di mostrare variazioni in corso d'opera (i cosiddetti pentimenti), l'estensione di interventi di restauro e ridipinture effettuati con pigmenti moderni e, in generale, lo stato di conservazione della superficie dell'opera.

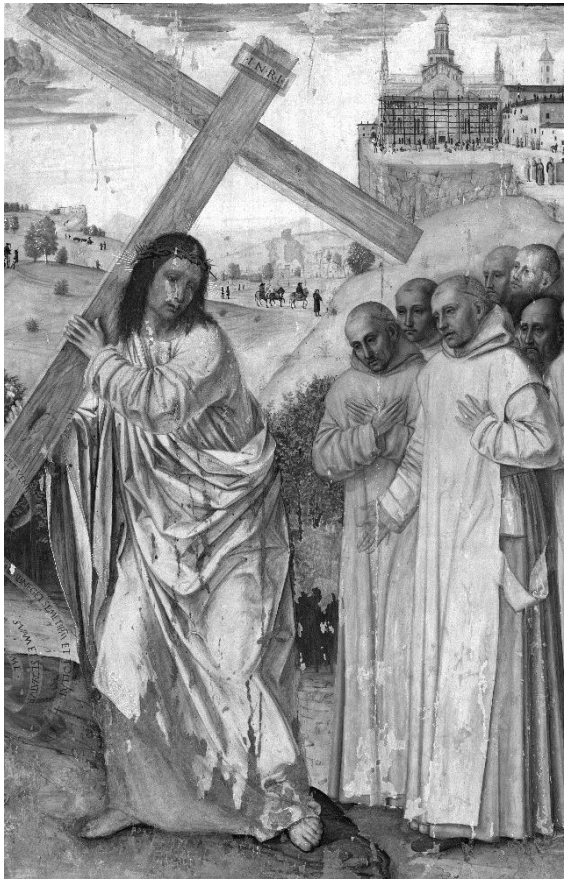
La riflettografia infrarossa è soprattutto impiegata per i dipinti su tavola o tela, raramente per le pitture murali. Nel caso degli affreschi, infatti, non essendo trasparente all'infrarosso lo strato di intonachino, il suo uso è limitato all'esame di zone di ripresa a secco.



a: vernice; b: strato pittorico; c: preparazione; d: supporto

Giovanni Bellini, Madonna col Bambino, Pinacoteca di Brera, Milano.
Riflettografia eseguita nel 1996 dall'INOA.

Pinacoteca di Brera, Milano
Ambrogio Bergognone:
Cristo portacroce con Certosini



pentimento

Anonimo

Ritratto del Card. Mazarino

Olio su tela XVII sec.

Restaurato e ridipinto nella prima metàdel 900

Visibile **IR**

WED NOV 11 18:10:29 2009

WED NOV 11 18:11:10 2009

WED NOV 11 18:32:13 2009

WED NOV 11 18:29:57 2009