



A.A. 2017/2018

---

**TECNICHE E TECNOLOGIE  
DELLA DIAGNOSTICA 2**



[www.simonecaglio.it](http://www.simonecaglio.it)

Quest'opera è distribuita con Licenza

Creative Commons - Attribuzione - Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale.

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



# TECNICHE E TECNOLOGIE DELLA DIAGNOSTICA 2

## A.A. 2017/2018

### SOMMARIO

Introduzione alla diagnostica e classificazione delle metodologie di analisi

Tecniche fotografiche

Fluorescenza ultravioletta

Ultravioletto riflesso

Riflettografia in infrarosso

Infrarosso in falsi colori

Radiografia

Termografia

Fisica Ambientale e Microclima

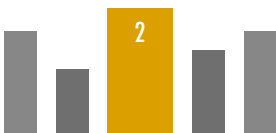
Colore e Colorimetria

Spettrometria in riflettanza nell'UV, nel visibile e nel vicino IR

Presentare i dati

Progettare una campagna d'analisi





# Introduzione alla diagnostica e classificazione delle metodologie di analisi

## ANALISI NON INVASIVE, INVASIVE, NON DISTRUTTIVE E DISTRUTTIVE

Le metodologie d'analisi dedicate allo studio delle opere d'arte possono essere classificate in diversi modi: in base al processo chimico-fisico su cui si basano, alle informazioni che forniscono, alla tipologia di opere che permettono di studiare o ancora all'estensione dell'area indagata.

A monte di ogni possibile classificazione, però, è necessario tener conto del rispetto dell'oggetto che si sta esaminando, così da procurare la minore alterazione possibile. Sulla base di questo possiamo identificare due macro-classi di analisi: le tecniche invasive e le tecniche non invasive.

Con analisi invasive, si intendono quelle che alterano l'opera, in tutto o in parte, dal punto di vista chimico o fisico prevedendo in genere un prelievo, seppur modesto, di materiale, o ancora la realizzazione di

### ANALISI NON INVASIVE

---

#### Metodologie per immagine

- Metodi fotografici
- Riflettografia IR (IRR)
- Infrarosso falso colore (IRC)
- Analisi UV (UVF, UVR)
- Imaging multispettrale
- Termografia (IRT)
- Radiografia e tomografia (RX, TAC)
- Autoradiografia per attivazione neutronica
- Misurazione della forma

#### Metodologie spettrometriche

- Spettrometria in riflettanza UV-visibile- NIR (RS e FORS)
- Colorimetria
- Spettrometria X (EDXRF, PIXE, PIGE)
- Diffrazione di raggi X (XRD)
- Spettrometria Raman
- Spettrometria infrarossa in riflettanza (RS-FTIR)

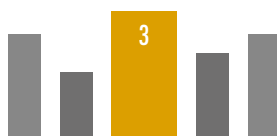
#### Microscopie

- Microscopia ottica in luce riflessa
- micro-FTIR, micro-XRF e micro-Raman mapping

#### Datatione

- Dendrocronologia
- 

Esempio di classificazione delle principali analisi diagnostiche non invasive applicate ai dipinti



cavità per ispezioni, l'introduzione di materiali estranei, la rottura di legami chimici e la produzione di molecole differenti da quelle originali. Tipiche analisi invasive sono quelle che studiano i microprelievi. Inoltre le tecniche invasive possono avere o meno carattere distruttivo, possono cioè alterare il campione stesso dopo l'analisi, in genere perché la procedura diagnostica prevede la sua polverizzazione o soluzione, così che non si possano eseguire ulteriori test, talvolta neppure per ripetere gli stessi.

Con metodi non invasivi intendiamo invece quelli in cui non si induce alcuna modifica nell'oggetto dell'analisi. Un metodo non invasivo è ovviamente anche non distruttivo. Talune analisi non invasive possono naturalmente, in base alla modalità d'impiego, essere utilizzate per misure su prelievi, garantendo la non distruzione degli stessi.

È evidente in questo caso che la metodologia impiegata diventi di fatto un'analisi invasiva se eseguita su prelievi, dato che l'opera d'arte non viene preservata nella sua integrità.

## ANALISI INVASIVE, MICROINVASIVE, DISTRUTTIVE E NON DISTRUTTIVE

### Metodologie spettrometriche elementari

- Analisi distruttive del campione (AAS, AES, ICP-OES, ICP-MS)
- Analisi micro-distruttive del campione (LIP: LA-ICP-MS, LIBS, ...)
- Analisi non distruttive del campione (EDXRF, WDXRF, PIXE, PIGE, SEM-EDX,...)

### Metodologie spettrometriche molecolari

- Spettroscopia UV-visibile-NIR
- Spettroscopia infrarossa (IRS e FTIR)
- Spettroscopia Raman e FT-Raman
- Spettrometria di massa (MS)

### Metodologie cromatografiche

- Gascromatografia (GC)
- Cromatografia liquida e HPLC
- GC con spettrometria di massa (GC-MS)

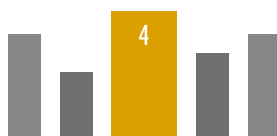
### Microscopie

- Microscopia elettronica
- Microscopia ottica su campioni in luce visibile, polarizzata, UV

### Datazione

- Carbonio 14
- Rapporti isotopici del piombo
- Dendrocronologia

Esempio di classificazione delle principali analisi diagnostiche invasive applicate ai dipinti



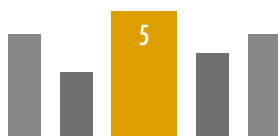
## ANALISI GLOBALI E LOCALI STRUMENTAZIONE PORTATILE

Le metodologie diagnostiche possono essere anche suddivise in base alla superficie della zona indagata; si parlerà di analisi per immagine, o globali, quando applicate su aree più o meno vaste che restituiscono di fatto un'immagine, sia che ciò accada immediatamente o successivamente a processi di scansione della superficie o del volume in esame; sono invece metodologie locali, o puntuali, quelle che riguardano porzioni decisamente ridotte dell'opera, in genere pochi millimetri quadrati o meno.

In entrambi i casi è possibile, seppur non per tutte le tecniche esistenti, avvalersi di strumentazione portatile per eseguire le misure, così da svolgere le analisi sul campo. La portabilità della strumentazione dipende in genere dai suoi ingombri, e non significa che possa venire trasportata necessariamente in una comoda valigetta, bensì talvolta nel bagagliaio di un'automobile.

Tecnica	Per immagini	Puntuali	Strumentazione portatile
Fluorescenza UV	X		X
UV riflesso	X		X
UV falso colore	X		X
Tecniche fotografiche	X		X
Riflettografia IR	X		X
IR falso colore	X		X
Radiografia (e tomografia)	X		X
Autoradiografia	X		
Scanner 3D	X		X
Tecniche radar	X		X
Spettrometria UV-Vis-Nir	X	X	X
Spettrometria FTIR		X	X
Spettrometria RAMAN		X	X
Spettrometria in fluorescenza UV	X	X	X
XRF		X	X
PIXE		X	(X)
Colorimetria	X	X	X

Principali metodologie analitiche per lo studio dei dipinti



# Tecniche fotografiche

Per tecniche fotografiche si intendono tutte quelle metodologie che riproducono per immagini l'opera sfruttando la radiazione luminosa visibile, la stessa a cui è sensibile l'occhio umano. I diversi metodi fotografici si distinguono solitamente per ingrandimento e collocazione della sorgente luminosa.

Moltissime sono le applicazioni della fotografia anche in ambito storico artistico, a partire dalla documentazione dell'opera, del suo stato conservativo, fino all'archiviazione come dati per la futura tutela o memoria. Tra gli usi più tecnici si ha la manipolazione digitale delle immagini come supporto informativo attraverso l'illustrazione degli interventi apportati o proposti, per la ricostruzione della cromia originale, o la restituzione di parti mancanti, fino ad arrivare ai restauri virtuali. L'importanza di una corretta documentazione fotografica è essenziale per mantenere memoria della storia evolutiva di un dipinto, soprattutto nel caso di interventi irreversibili.

È bene sottolineare anche che con l'avvento della fotografia digitale, una stessa immagine, dopo essere stata acquisita, può essere visualizzata e riprodotta con diversi fattori di ingrandimento o riduzione rendendo di fatto inutile e talvolta fuorviante indicare i rapporti numerici di ingrandimento (o riduzione); sarebbe invece buona norma, soprattutto nel caso di macro- e micro- fotografia di dettagli, inserire nell'immagine un riferimento metrologico così da avere un immediato confronto visivo tra una dimensione nota e gli elementi riprodotti nell'immagine.

## MACROFOTOGRAFIA

La macrofotografia consiste nel ritrarre piccoli soggetti con forte ingrandimento. I fattori di ingrandimento propri della macrofotografia sono stabiliti da una norma internazionale (DIN 19040) e comprendono le riprese dalla scala 1:10 alla scala 10:1, dove il primo numero si riferisce alla dimensione riprodotta nell'immagine, mentre il secondo alla dimensione reale del soggetto. Considerando che l'occhio umano riesce a mettere a fuoco oggetti fino a circa 20 cm di distanza e non è in grado di distinguere distanze fra due punti inferiori a 1/5 di millimetro (potere risolutivo), è palese che l'utilizzo della macrofotografia sia di grande supporto alla documentazione visiva.

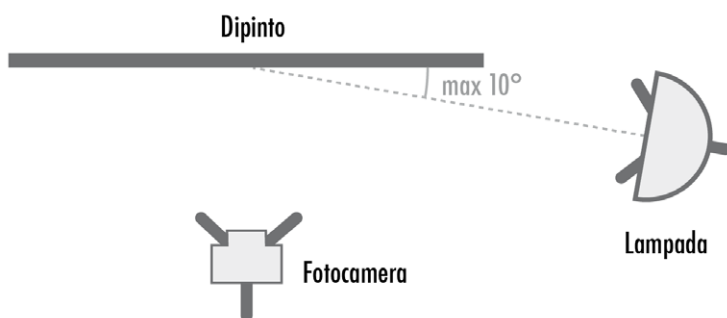
## MICROFOTOGRAFIA

Quando si raggiungono rapporti di ingrandimento molto superiori a quelli della macrofotografia si parla di microfotografia, che consiste in pratica nel fotografare per mezzo di un microscopio piccole porzioni della superficie dell'opera, fino ai dettagli della materia utilizzata dal pittore e le sue alterazioni, i sollevamenti, le porosità superficiali e i dettagli più minuti.

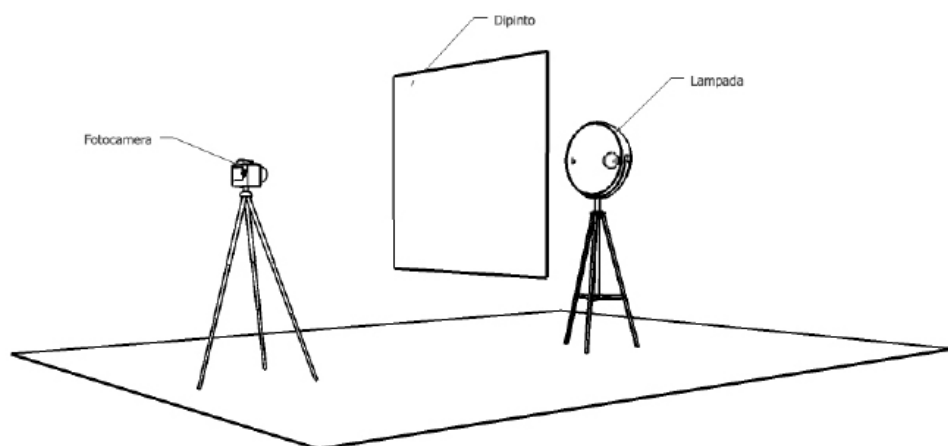


Fattore di ingrandimento	Denominazione
Fino a 1:10	Fotografia convenzionale
1:10 - 1:1	Macrofotografia: fotografia ravvicinata (Close-up)
1:1 - 10:1	Macrofotografia propria
Oltre 10:1	Macrofotografia spinta
10000:1 - 20000:1	Microfotografia

Tabella riassuntiva delle tecniche fotografiche suddivise per fattore d'ingrandimento



Schema strumentale di una analisi in luce radente



Schema strumentale di una analisi in transilluminazione su un dipinto

## FOTOGRAFIA IN LUCE RADENTE

Con fotografia in luce radente si intende una tecnica in cui la fonte di illuminazione viene posta quanto più possibile parallela alla superficie del dipinto; l'angolo di incidenza della radiazione luminosa può variare a seconda dell'oggetto ripreso, ma in genere non deve superare i  $10^\circ$  rispetto alla superficie, così da ottenere un'immagine che metta in evidenza tutte le irregolarità, indipendentemente dal tipo di supporto. Nel caso in cui non fosse possibile ottenere un'immagine in luce radente dell'intera opera, è comunque opportuno procedere a riprendere singole aree o dettagli.

La sorgente luminosa va posta lateralmente (o in alternativa in alto) rispetto al quadro al fine di ottenere un'immagine in cui la percezione del rilievo o della morfologia superficiale corrisponda a quella reale, dichiarandone la posizione (destra/sinistra/alto) in fase di descrizione dei risultati.

## TRANSILLUMINAZIONE

La transilluminazione, detta anche retroilluminazione, consiste nello scattare una fotografia collocando macchina fotografica e sorgente luminosa da parti opposte del dipinto, che viene quindi illuminato dal retro (ma in taluni casi anche di fronte). Con questa tecnica si possono studiare dipinti su tela con preparazione sottile, oltre a dipinti, miniature e disegni su carta o pergamena. Per riprese ottimali è necessario che il fascio luminoso sia collimato sulla sola superficie dell'opera evitando che fuoriesca lateralmente raggiungendo l'obiettivo fotografico. Nel caso si utilizzi un piano luminoso, come di prassi per carte e pergamene, sarà sufficiente oscurare le zone eventualmente scoperte dell'opera mediante opportuni materiali; se invece si sta analizzando un dipinto su tela utilizzando una lampada o un proiettore, potrà essere necessario utilizzare delle alette per collimare il fascio. È bene inoltre evitare il surriscaldamento dell'opera utilizzando sorgenti fredde o avendo l'accortezza di mantenere opportune distanze tra la sorgente luminosa e la superficie illuminata. Una variante della transilluminazione è l'utilizzo di radiazione infrarossa al posto di quella visibile: la transilluminazione in infrarosso permette di ottenere informazioni simili a quelle della riflettografia (si veda oltre), seppur talvolta migliori perchè esclude gli effetti di riflessione speculare dovuti a particolari superfici e aumenta i contrasti tra zone opache e trasparenti.

# Fluorescenza ultravioletta

## Ultravioletto riflesso

Le analisi con radiazione ultravioletta si distinguono in fluorescenza e riflessione. Le prime (UVF) consistono nello studio della risposta che si ottiene osservando nel visibile la fluorescenza dei materiali costituenti la superficie e illuminati con radiazione di tipo UVA. La tecnica, adoperata in prevalenza su dipinti, manoscritti e disegni, viene anche definita analisi in lampada di Wood, o in luce Wood.

Le analisi in ultravioletto riflesso (UVR) coinvolgono invece solo la componente UV riflessa dalla superficie indagata, dando anch'esse informazioni di carattere conservativo, complementari a quelle della fluorescenza.

Con fluorescenza UV si intende la proprietà di alcuni materiali sottoposti a irraggiamento con radiazione ultravioletta di riemettere radiazioni nella banda del visibile. La UVF è quindi una fluorescenza nel visibile indotta da irraggiamento con UV.

Per l'esito ottimale dell'analisi è importante che la componente visibile sia unicamente quella emessa dalla superficie in esame, quindi è indispensabile operare in completa oscurità. È fondamentale anche evitare l'uso accoppiato di tubi a fluorescenza UV nel visibile: questi ultimi infatti, anche se spenti, colpiti dalla radiazione UV emessa dai tubi di Wood, emettono a loro volta della radiazione di fluorescenza che interferisce con le analisi.

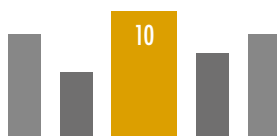
Rispetto alla fluorescenza, l'ultravioletto riflesso si basa sulla soppressione della radiazione visibile affinché solo quella UV sia registrata. Poiché i vetri delle ottiche fotografiche non sono trasparenti al di sotto dei 340nm, si possono normalmente sfruttare solo le radiazioni dell'UV vicino nelle comuni fotocamere; esistono comunque ottiche e lenti di quarzo o di fluorite, trasparenti fino a 220nm circa. Fondamentale è che la radiazione UV che attraversa il gruppo ottico non generi fluorescenza, che si ha invece tipicamente per lenti trattate con rivestimenti antiriflesso.

## APPLICAZIONI

L'importanza delle analisi con radiazione ultravioletta è legata sostanzialmente allo studio dello stato conservativo degli strati superficiali di un dipinto, e, nel caso di manoscritti, alla possibilità di rendere leggibili scritture cancellate o molto sbiadite. Quanto alle policromie, l'analisi con radiazione ultravioletta è limitata allo studio della superficie visibile, non penetrante rispetto agli strati di colore. Su pitture, sculture e oggetti policromi è spesso utilizzata dai restauratori come ispezione prima e durante le operazioni di restauro per verificare il livello di rimozione della vernice superficiale e per identificare ridipinture e precedenti ritocchi. L'interpretazione della fluorescenza non è affatto semplice, dato che i comportamenti non sono di facile previsione e dipendono da svariati fattori non sempre individuabili; non può infatti essere considerata una tecnica analitica utile a caratterizzare e riconoscere i materiali (se non in pochi casi come per i pigmenti bianchi, la gomma lacca e poco altro), ma resta comunque molto valida nella discriminazione della presenza di materiali diversi nella vernice e nello strato pittorico superficiale. Altri impieghi di questa metodologia diagnostica consistono nello studio di coloranti in tessuti, di oggetti d'ambra e per favorire l'individuazione di vernici pigmentate. Molto interessante è l'applicazione della fluorescenza UV a manoscritti e palinsesti al fine di recuperare testi cancellati per via meccanica o chimica, o parzialmente ricoperti da altre scritture. Per quanto riguarda le analisi in riflessione UV, gli ambiti d'applicazione sono in genere i medesimi della fluorescenza UV, anche se i risultati sono talvolta più difficili da interpretare, ma in generale complementari alla fluorescenza. Nel caso, ad esempio, di inchiostri di tipo ferro-gallico cancellati, l'ultravioletto riflesso può fornire migliori risultati grazie al forte assorbimento di questi composti nell'ultravioletto. Nello studio dello stato di conservazione dei dipinti, l'UV riflesso può essere impiegato in modo simile alla fluorescenza, con risultati complementari: le aree che più assorbono gli UV appariranno in questo caso nere o scure, mentre più chiare saranno le zone riflettenti la radiazione ultravioletta. È necessario comunque conoscere preliminarmente il comportamento dei materiali per interpretare le immagini ottenute.

Materiale	Fluorescenza
Bianco di Titanio	Nessuna
Bianco di Piombo	Bianco azzurrato
Bianco di Zinco	Rosa pallido
Olio	Giallo
Tempera (uovo)	Azzurrato
Gommalacca	Aranco dorato

Esempi di fluorescenza UV



# Riflettografia in infrarosso

La riflettografia in infrarosso (IRR), chiamata spesso anche solo riflettografia, è una tecnica d'analisi d'immagine che sfrutta la trasparenza degli strati pittorici alla radiazione del vicino infrarosso e permette di visualizzare gli strati sottostanti identificando, se presenti, il disegno soggiacente, i pentimenti o ripensamenti dell'artista o più in generale ciò che è stato fatto "prima" della stesura del colore. Questa metodologia d'indagine è anche utile per ricostruire il processo creativo dell'opera, o per identificare presenza di materiale non omogeneo, come nel caso di passati restauri o modifiche successive il termine del dipinto.

La riflettografia in infrarosso applicata allo studio dei dipinti si basa sulla lettura della radiazione del vicino infrarosso (NIR: 750 - 3000 nm) riemessa dalla superficie opportunamente illuminata.

Il setting operativo prevede che l'illuminazione sia quanto più uniforme possibile, evitando riflessioni dirette della radiazione IR verso il rivelatore; per annullare o ridurre il più possibile la componente speculare della radiazione IR le lampade vengono in genere inclinate di 30 gradi rispetto alla superficie dell'opera, anche se è opportuno verificare il miglior posizionamento avvicinando, allontanando o modificando l'inclinazione durante le riprese.

L'assorbimento della radiazione del vicino infrarosso da parte dei composti chimici dei pigmenti utilizzati in pittura è solitamente piccolo, rendendo gli strati pittorici maggiormente trasparenti a questa radiazione rispetto a quella visibile. Quindi aumentando la lunghezza d'onda infrarossa diminuisce in genere l'opacità dello strato dipinto, permettendo di raggiungere la preparazione, e così di "vedere" al di sotto del colore.

La trasparenza degli strati pittorici dipende, oltre che dallo spessore dello strato stesso, dal tipo di pigmento o dalla miscela di pigmenti, dalla loro granulometria e concentrazione e dal tipo di legante.

Per garantire il sufficiente contrasto necessario al riconoscimento del disegno sottostante (underdrawing) è necessario che il segno disegnativo sia fatto con materiale opaco alle lunghezze d'onda dell'infrarosso e sia steso sopra un supporto (preparazione, imprimitura, tavola o tela) abbastanza riflettente da consentire la riflessione.

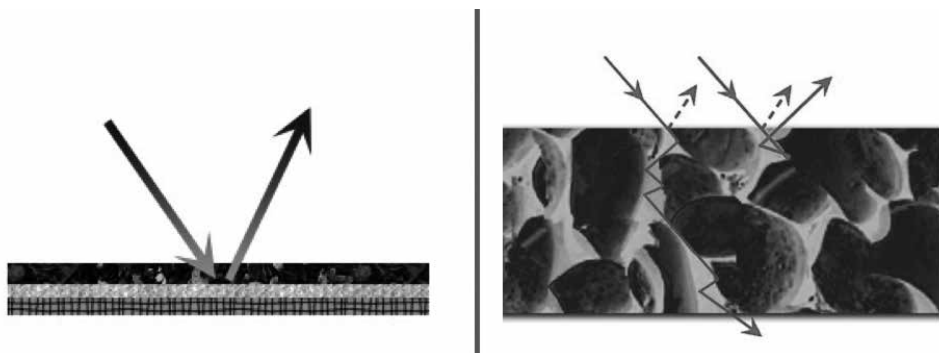
Le immagini ottenute vengono poi elaborate perchè siano in scala di grigi, ottimizzando i livelli e quindi i contrasti così da aumentare la leggibilità; per non falsare le informazioni è bene non eccedere con i bilanciamenti, evitando di saturare luci e ombre e introdurre o esaltare anomalie di ripresa.

## APPLICAZIONI

La riflettografia in infrarosso è in grado di fornire informazioni sulla genesi del dipinto, rivelando versioni differenti nascoste, scritte e disegni, evidenziando la tecnica pittorica peculiare dell'artista attraverso l'identificazione dei medium e della tecnica disegnativa o di riporto del disegno sottostante oltre ad alcune caratteristiche della pennellata. Se raffrontata ad uno studio sistematico dei materiali, l'immagine riflettografica può servire per una prima identificazione dei pigmenti impiegati dall'artista e può migliorare la leggibilità del dipinto in presenza di sporco o depositi superficiali. In fase di restauro è utile impiegare la tecnica riflettografica per individuare la presenza e l'estensione di precedenti interventi sulla superficie pittorica; l'infrarosso offre infatti indicazioni sullo stato conservativo dell'opera, consentendo di vedere ridipinture e integrazioni fatte con materiali dissimili dagli originali.

Per quanto concerne l'ambito dello studio storico di un'opera o di un artista, l'apporto che la riflettografia può offrire è la possibilità di studiare il disegno sottostante gli strati pittorici: disegno che può essere così caratteristico da permettere l'identificazione del lavoro di uno specifico artista e confermare l'attribuzione di un'opera o valutarne l'intervento della bottega. Lo studio sistematico delle riflettografie su opere di un singolo autore permette inoltre di studiare le caratteristiche grafiche tipiche o l'evoluzione del modus disegnativo altrimenti non visibile e che, per la sua funzione di supporto alla stesura cromatica, può differenziarsi da bozzetti e studi su carta.

Infine, un'applicazione della riflettografia IR particolarmente importante in fase di progettazione di una campagna di studio che intenda integrare varie tecniche analitiche è l'uso delle immagini ottenute per la scelta delle zone ove svolgere analisi puntuali non invasive o anche microprelievi.



Il principio alla base della Riflettografia in Infrarosso

# Infrarosso in falsi colori

Il cosiddetto infrarosso falso colore (IRC), o infrarosso in falso colore, è una tecnica analitica per immagini che permette in molti casi la distinzione dei materiali pittorici impiegati negli strati superficiali dell'opera. È spesso utilizzata preliminarmente o nel corso dei restauri per individuare ridipinture, alterazioni o passati interventi eseguiti con materiali differenti dagli originali ma che otticamente non è possibile distinguere.

L'infrarosso falso colore permette di visualizzare in un'unica immagine le informazioni derivanti dall'analisi nella banda dell'infrarosso con quelle di alcune bande dello spettro visibile; in particolare, nell'IRC tradizionale la radiazione elettromagnetica tra 500 e 600 nm (verde e parte di giallo) viene riprodotta in blu, quella tra 600 e 700 nm (rosso) viene restituita in verde, mentre quella tra 700 e 900 nm (infrarosso vicino) con il rosso. La componente viola-blu dello spettro visibile viene invece esclusa nelle indagini in infrarosso falso colore. Questo sfasamento dei colori, in cui viene persa la corrispondenza con quelli reali, permette di unire le informazioni derivanti dalla risposta in infrarosso dei materiali a parte di quella visibile, mantenendo la leggibilità tipica dell'immagine a colori unitamente a caratteristiche non visibili a occhio nudo.

Le indagini in falsi colori nascono grazie alla presenza sul mercato fotografico tradizionale di pellicole specifiche, sensibili fino a 900 nm, adoperate su macchine fotografiche analogiche; oggi invece si utilizzano fotocamere munite di rivelatori a stato solido, con la possibilità di estendere la sensibilità della componente infrarossa dell'immagine fino a 1000 nm o oltre, in dipendenza dal particolare sensore.

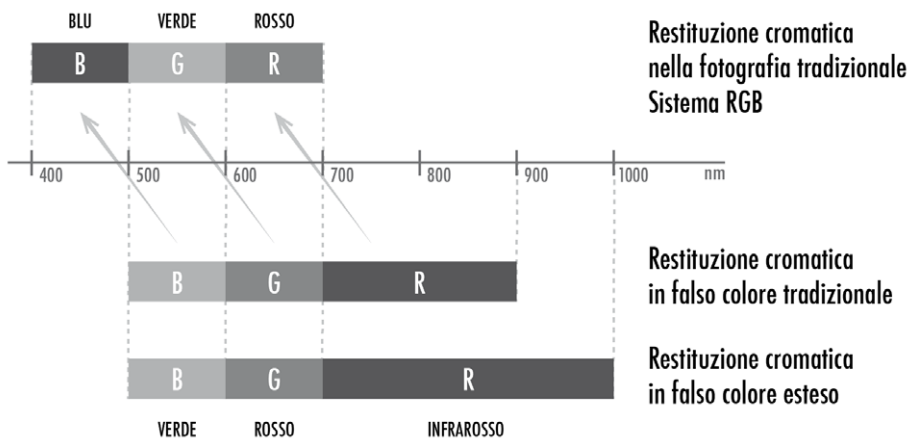
Va inoltre precisato che la scelta degli abbinamenti cromatici è arbitraria e motivata solamente da ragioni storiche dovute alla sensibilità delle emulsioni della pellicola fotografica realizzata per il falso colore.

Come accennato, pigmenti difficilmente distinguibili a occhio, possono esserlo in IRC; è però importante sottolineare che il riconoscimento dei pigmenti mediante immagini in falsi colori è del tutto parziale e preliminare ad altri esami più approfonditi che si basino su risposte di tipo spettroscopico elementare o molecolare, poichè la risposta cromatica in falso colore dipende anche dagli strati sottostanti e dallo spessore dello strato pittorico di superficie. L'influenza del legante sulla risposta IRC è invece del tutto trascurabile, salvo poche eccezioni.

## APPLICAZIONI

Questa tecnica viene utilizzata principalmente in ambito conservativo, a sostegno di interventi di restauro su dipinti, accompagnata dalle analisi d'immagine con radiazione ultravioletta. La diversa risposta che alcuni pigmenti hanno in infrarosso falso colore rispetto al visibile consente di ottenere indicazioni preliminari circa la loro distribuzione sulla superficie pittorica, e, più precisamente, la distinzione di aree interessate da ridipinture e integrazioni all'interno di campiture che a vista appaiono omogenee, purchè tali interventi siano eseguiti con materiali diversi da quelli originali.

In alcuni casi l'analisi IRC può essere di grande aiuto per permettere di individuare in campiture che a vista appaiono molto scure o nere la presenza di pigmenti colorati. Infine le immagini in falsi colori sono spesso di grande utilità, anche più della riflettografia, per la scelta dei punti da indagare con tecniche spettrometriche o eventualmente dove effettuare prelievi, così come per estendere ad aree più vaste gli esiti delle stesse analisi puntuali.



Schema delle corrispondenze cromatiche tra immagine visibile e falso colore



# Radiografia

La radiografia (RX) è una metodologia che permette di visualizzare l'immagine prodotta dai raggi X che attraversano un corpo: il differente assorbimento dei raggi X da parte dei diversi materiali di cui è costituita un'opera, strati pittorici e del supporto, permette la lettura di dettagli in genere celati alla vista, come prime versioni o pentimenti nei dipinti, strutture e deterioramenti in supporti e statue lignee.

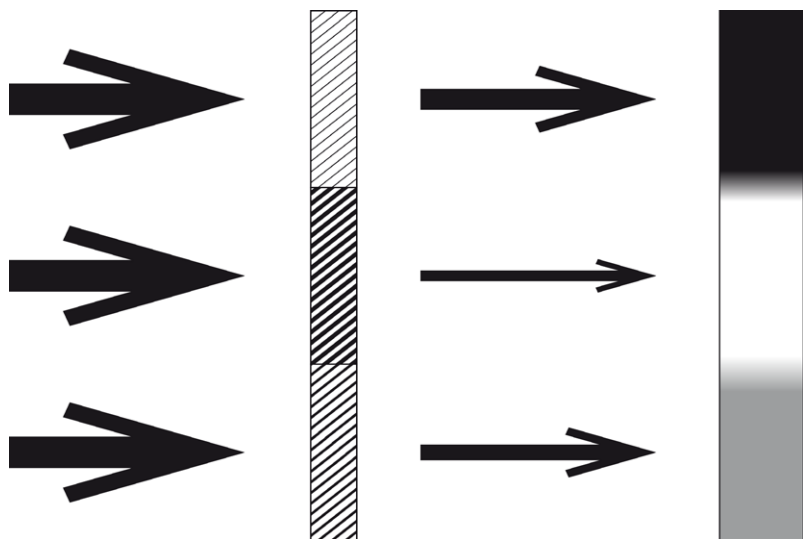
La strumentazione necessaria ad eseguire una radiografia prevede l'uso di una sorgente di raggi X (detto tubo X) e di un sensore (pellicola o lastra ai fosfori) in grado di rivelare la radiazione una volta oltrepassato l'oggetto in esame.

L'energia del tubo X è scelta in base ai materiali costituenti l'opera in analisi e al suo spessore, oltre che alla necessità di individuare specifici particolari nascosti sotto la superficie visibile. La possibilità di ottenere un'immagine sufficientemente ricca di informazioni dipende dal diverso assorbimento, detto radiopacità, dei materiali rispetto ai raggi X.

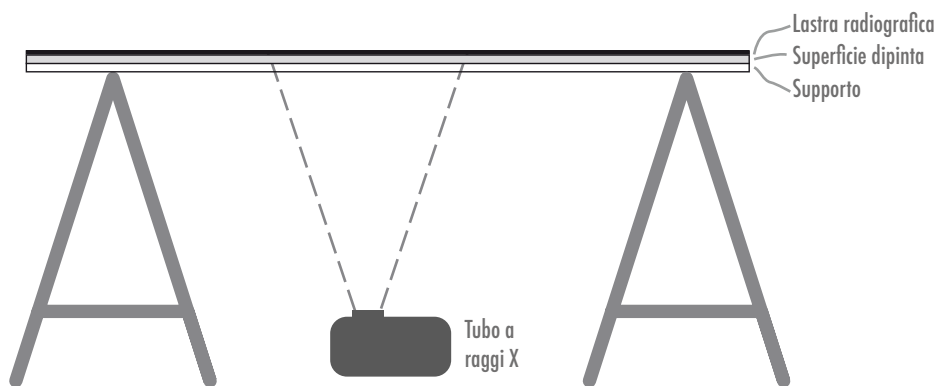
L'assetto tipico di un sistema per analisi radiografiche su dipinti prevede che il tubo radiogeno sia collocato sul pavimento e che l'opera venga posizionata orizzontalmente, con la parte dipinta rivolta verso l'alto e che le pellicole, conservate in apposite buste che ne garantiscono il riparo dalla luce, siano appoggiate sulla superficie pittorica. L'applicazione della radiografia digitale si differenzia da quella convenzionale solo per tipo di supporto: i cristalli d'argento della pellicola tradizionale sono sostituiti da cristalli di fosforo. Al termine dell'esposizione la lastra viene processata da un apposito scanner che trasforma in immagine digitale quanto registrato dai cristalli di fosforo che saranno contestualmente "azzerati" così da rendere la lastra riutilizzabile, a differenza della pellicola tradizionale che permette una unica esposizione.

L'immagine radiografica si presenta simile ad un negativo fotografico in bianco e nero in scala 1:1 (o di poco superiore, dal momento che l'apertura del fascio X è conica) in cui le zone chiare sono quelle meno colpite dalla radiazione e corrispondono alle parti dell'opera più radiopache.

La radiografia su oggetti di interesse storico-artistico viene considerata una metodologia di analisi totalmente non invasiva: i processi fisici derivanti dall'interazione tra radiazione X e materia non sono considerati tali da produrre alterazioni molecolari sostanziali su vasta scala seppure sia noto che un esiguo numero di molecole possa subire parziali modificazioni, dovute alla ionizzazione degli atomi e alla rottura di legami chimici, come avviene nei tessuti biologici.



Nell'immagine radiografica a materiali maggiormente radiopachi corrispondono aree più chiare



Settup strumentale tipico in caso di una radiografia ad un dipinto su supporto mobile

## APPLICAZIONI

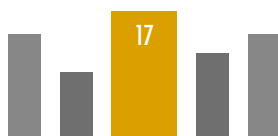
La radiografia permette di riconoscere la struttura interna degli oggetti senza effettuare ispezioni invasive, per questo è applicata in ambito archeometrico su diverse tipologie di opere, dalle mummie alle sculture, dai manufatti fittili ai dipinti, consentendo di acquisire importanti informazioni sia sull'esecuzione, sia per la conservazione.

L'applicazione di questa tecnica ai dipinti è di estrema importanza a fini conservativi per lo studio del supporto – tela e telaio, tavola – e degli interventi occorsi nei secoli, e in parte dello stato della pellicola pittorica (craquelure o abrasioni). Nel caso di supporti in legno la tecnica permette di riconoscere il taglio delle tavole, il loro assemblaggio, la presenza di chiodi, grappe metalliche, incastri, farfalle, committiture di stoffa, oltre a nodi e gallerie di tarli. Quanto ai supporti in tela, l'immagine radiografica consente di leggere l'assottigliamento del film pittorico, la presenza di strappi o cuciture e il titolo del filato. Sia per opere su tavola che su tela, è possibile individuare pentimenti, crettature, fenditure o distacchi oltre a parti aggiunte successivamente.

Come la riflettografia, anche la radiografia è una tecnica utile a ricostruire il percorso creativo dell'opera, rivelando peculiarità della prassi esecutiva dell'artista: la radiografia permette di evidenziare le caratteristiche del ductus pittorico, l'individuazione di ripensamenti o addirittura di riutilizzi del supporto. Va sottolineato che la radiografia non consente di individuare il disegno sottostante, se non in alcuni casi particolari: disegno inciso e colmato con pigmento radiopaco, o eseguito con punta di piombo o con pigmento molto radiopaco come cinabro, biacca (o una mescolanza di questi).

Materiale	Radiopacità relativa
bianco di piombo (biacca), minio, giallo di piombo e stagno, cinabro, elementi metallici (chiodi, staffe, pastiglie, ...), tracciati con punte di piombo	molto alta
bianco di zinco, composti di rame, cromo, ferro, cobalto, manganese, terre e ocre (composti di ferro)	alta
bianco di titanio, pigmenti minerali leggeri, solfato di calcio, carbonato di calcio, supporti in legno spessi (superiori a 2 cm circa)	media
supporti in legno sottili (inferiori a 2 cm circa), supporti in tela (canapa, lino), leganti e pigmenti organici	bassa

Esempi di materiali e indicazione della loro radiopacità relativa



# Termografia

La termografia (IRT) è una tecnica di analisi per immagine in grado di determinare la temperatura superficiale di un oggetto attraverso la misura della radiazione di corpo nero emesso dall'oggetto stesso. L'utilizzo tipico in archeometria riguarda l'esame a distanza e senza contatto di edifici e pitture murali.

Qualsiasi corpo che abbia una temperatura superiore allo zero assoluto emette radiazione elettromagnetica in diverse lunghezze d'onda e con differenti intensità: il tipo di emissione dipende sia dalla temperatura effettiva del corpo che dalla sua natura fisico-chimica.

L'energia emessa da un corpo può essere legata alla sua temperatura grazie a una legge scoperta dal fisico Max Planck nel 1900, secondo cui ogni corpo emette radiazione con una ben nota distribuzione in funzione della lunghezza d'onda, legata alla temperatura, e dell'emissività, caratteristica del corpo.

Le termocamere misurano queste emissioni, impostando il corretto valore di emissività, restituiscono il valore di temperatura per ogni punto (pixel) dell'immagine inquadrata.

Per una corretta lettura delle immagini termografiche è necessario conoscere i processi fisici di scambio termico tra la superficie esaminata e l'ambiente: irraggiamento in ingresso e in uscita (emissione), convezione, conduzione, evaporazione.

È opportuno distinguere preliminarmente tra termografia passiva e attiva: nel primo caso la superficie che viene analizzata non viene riscaldata come avviene invece nel secondo caso. Il riscaldamento attivo avviene di solito per convezione o per irraggiamento e serve per generare adeguati gradienti termici, ossia differenze di temperatura, tra diverse parti dell'oggetto.

Nel caso di termografia attiva, è necessaria una ulteriore distinzione: parliamo di termografia in riflessione se il riscaldamento avviene dalla stessa parte in cui si effettua la ripresa, è invece nota come termografia in trasmissione quella in cui fonte di calore e termocamera sono poste da parti opposte dell'oggetto.

Nelle moderne termocamere con sensore microbolometrico, le immagini termografiche sono acquisite in livelli di grigio che corrispondono alle diverse temperature della superficie esaminata, e successivamente rappresentata attraverso una scala cromatica in falsi colori per evidenziare con maggior precisione le differenze di temperatura fra zone contigue. I termogrammi in bianco e nero sono in genere preferiti per evidenziare le strutture murarie nascoste, favorendo di norma in tali casi la leggibilità dell'immagine.

Nella lettura dei termogrammi bisogna prestare attenzione a diversi fattori poichè comportamenti termici differenti possono apparire simili nelle immagini cambiando il setting sperimentale: applicando il metodo termografico attivo in riflessione, le zone che presentano dei distacchi sub-superficiali o dei materiali

isolanti appaiono più calde della zona circostante, dal momento che il calore fornito viene fermato proprio in corrispondenza dell'isolamento. Le aree più calde possono essere però anche quelle con emissività più alta: è bene stimare le possibili differenze di emissività tra le varie zone della superficie, indotte anche dalla colorazione (zone più scure, emissività maggiore).

Nel caso di termografia attiva in trasmissione invece, le zone che presentano cavità o inserti a minore conducibilità termica tendono a fermare il calore e risultano più fredde.

## APPLICAZIONI

La termografia su superfici murarie consente di evidenziare la presenza di strutture architettoniche nascoste, di decoesioni e fenditure, così come zone interessate dalla presenza di umidità, oppure da fenomeni di dissipazione del calore dovuti a isolamenti inefficaci, a perdite in condotte, etc.

Per quanto riguarda l'uso della termografia per l'individuazione di problematiche strutturali come cavità, distacchi sub-superficiali, o presenze di strutture invisibili quali tamponamenti, ammorsamenti o tessitura muraria, i termogrammi riscono ad evidenziare le differenze di conducibilità e capacità termiche tra i materiali posti all'interno della parete come differenza di temperatura sulla superficie: la sollecitazione termica è di solito necessaria in questi casi.

Nel caso della ricerca di umidità, dovuta sia a problemi di infiltrazione o risalita capillare che di condensazione, è possibile sfruttare la termografia per visualizzare i processi evaporativi in atto come aree più fredde rispetto a quelle "asciutte": in questo caso si applica il metodo termografico passivo, creando nell'ambiente le condizioni necessarie perchè l'evaporazione possa avvenire in modo naturale. Dalla termografia passiva si possono inoltre ricavare informazioni sulle problematiche costruttive identificando la presenza di ponti termici dovuti a disomogeneità geometrica o materica, aree di dispersione termica per mancato o cattivo isolamento e sovastimolazione di alcune strutture costitutive quali piloni e colonne.

In ultimo, la termografia può essere impiegata per conoscere l'entità dell'irraggiamento e del calore assorbito dalle diverse parti di un oggetto esposto, integrando in questo modo le misure microclimatiche e ambientali di spazi museali atte a valutare le migliori condizioni espositive.

# Fisica Ambientale e Microclima

## IL MICROCLIMA E I PARAMETRI AMBIENTALI

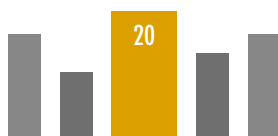
Prima di tutto, può essere utile dare una definizione del termine microclima nell'ambito dello studio della fisica ambientale. Nel quotidiano si sfruttano spesso alcuni termini come clima globale, macroclima, clima, microclima, ed è chiaro che tutti questi termini sono utilizzati per definire il clima di una determinata zona, e il prefisso viene scelto per indicare la dimensione della zona interessata. In linea di principio, il prefisso varia con le dimensioni dell'area effettiva, come determinato da fattori locali geografici, topografici o altro, ad esempio il requisito di raggiungere una omogeneità di fondo per alcuni parametri chiave. In pratica, utilizzeremo il suffisso micro per riferirci a tutto l'ambiente che è necessario studiare per conoscere i fattori che hanno un'influenza diretta sullo stato fisico del monumento e le interazioni con l'aria e gli oggetti circostanti. Con clima si si riferisce invece all'insieme delle condizioni atmosferiche giorno per giorno in una data area. Possiamo quindi concludere che, nell'ambito della diagnostica per i beni culturali, il microclima è la sintesi delle condizioni ambientali fisiche (come ad esempio, distribuzioni nel tempo e nello spazio, fluttuazioni di valori e tendenze, valori medi ed estremi, gradienti spaziali e frequenza delle oscillazioni) dovute alle variabili atmosferiche (temperatura, umidità, luce del sole, velocità dell'aria) o interazioni con altri oggetti per un periodo di tempo rappresentativo di tutte le possibili condizioni determinate da fattori naturali e artificiali.

I singoli parametri non devono essere considerati separatamente (es. temperatura, umidità, sole, vento, precipitazioni) senza tener conto delle interazioni e retroazioni tra questi e le superfici. Il microclima è determinato dalla complessa interazione di diversi fattori e non è solo una descrizione di ciò che sta accadendo, ma anche la base per prevedere ciò che potrebbe accadere in futuro.

La stessa varietà di interazione tra i vari parametri ambientali può essere riscontrata sia in ambiente esterno, sia in ambiente interno, sebbene l'entità e il livello di complessità possano variare.

La distinzione più importante è che il microclima interno può essere controllato, almeno in linea di principio, ed è molto importante sapere come farlo.

Per quanto riguarda gli ambienti interni i principali fattori che influiscono sul degrado delle opere mobili e immobili sono: temperatura, umidità, illuminazione.



# TEMPERATURA E CALORE

La temperatura è la proprietà che caratterizza lo stato termico di un sistema e che regola il trasferimento di energia termica. Per questa proprietà, un termometro può essere messo in equilibrio con il corpo, per leggere la sua temperatura, purchè questo non perturbi la temperatura iniziale del corpo stesso.

Il calore è l'energia trasferita da due sistemi in dipendenza dalla loro differenza di temperatura. Il calore quindi non può essere considerato una proprietà associabile ad una configurazione di equilibrio, ma è un "flusso" di energia tra corpi a temperature diverse, il calore fluisce dai punti a temperatura maggiore a quelli a temperatura minore, finché non viene raggiunto l'equilibrio termico. Il quantitativo di calore scambiato dipende dal particolare percorso seguito dalla trasformazione per arrivare dallo stato iniziale allo stato finale. Dato che il calore è definibile come "energia in transito", non come "energia posseduta da un corpo", frasi del tipo "il corpo possiede calore, cede calore, acquista calore" non hanno alcuna valenza scientifica.

Il trasferimento, o propagazione, del calore tra sistemi diversi può avvenire fondamentalmente in tre modi differenti:

- per conduzione, quando in uno stesso corpo o fra corpi a contatto si ha una trasmissione di energia cinetica tra molecole di zone adiacenti del materiale. Nella conduzione viene trasferita energia attraverso la materia senza movimento macroscopico di materia;
- per convezione, quando in un fluido in movimento, porzioni del fluido possono scaldarsi o raffreddarsi per conduzione venendo a contatto con superfici esterne e poi, nel corso del loro moto, trasferire (sempre per conduzione) l'energia acquistata ad altre superfici, dando così luogo ad un trasferimento di calore per avvezione;
- per irraggiamento, quando tra due sistemi la trasmissione di calore può avvenire per emissione, propagazione e assorbimento di onde elettromagnetiche a distanza o nel vuoto. Il meccanismo dell'irraggiamento non richiede il contatto fisico tra i corpi coinvolti nel processo.

La sensazione di "caldo" o di "freddo" che si ha toccando un corpo è determinata dalla sua temperatura e dalla conducibilità termica del materiale di cui è composto, in aggiunta ad altri fattori.

Il calore scambiato durante una trasformazione termodinamica può essere in generale scomposto da due termini: il calore sensibile e il calore latente.

A differenza del calore sensibile, uno scambio di calore latente avviene a temperatura costante.

Il calore sensibile è la quantità di calore legata a una variazione di temperatura secondo la relazione:

$$Q = C \cdot \Delta T$$

dove  $C$  è detta capacità termica e dipende sia dal tipo di materia, sia dalla sua massa:

$$C = m \cdot c_s$$

con  $m$  che definisce la massa del corpo e  $c_s$  il suo calore specifico.

Il calore specifico è definito come la quantità di calore necessaria ad innalzare di 1K una massa unitaria di sostanza e dipende, oltre che dalla sostanza stessa, anche dal tipo di trasformazione a cui è sottoposto il corpo. Esistono infatti il calore specifico a pressione costante ( $c_p$ ) per trasformazioni isobare e il calore specifico a volume costante ( $c_v$ ) per trasformazioni isocore.

Il calore latente  $\lambda$  è l'energia necessaria per un passaggio di stato; in base alla particolare transizione parleremo quindi di calore latente di fusione, di vaporizzazione o di sublimazione.

Il calore necessario ad un corpo per cambiare la sua fase è quindi:

$$Q = \lambda \cdot m$$

da cui si deduce immediatamente che il calore sottratto al sistema non influisce sulla variazione di temperatura durante il cambio di stato, come mostrato anche dal grafico

Questa particolare proprietà viene impiegata per riconoscere la presenza di fenomeni evaporativi associati ai contenuti d'acqua negli oggetti: l'acqua da imbibizione evaporando, infatti, sottrae calore al sistema in cui è contenuta raffreddando l'area interessata al fenomeno.

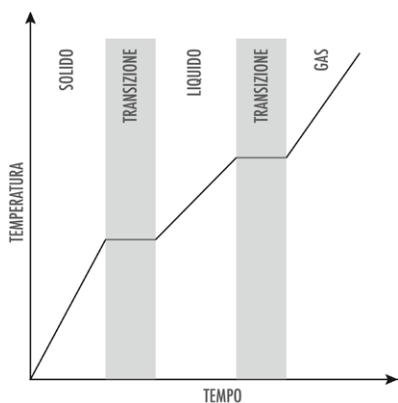


Grafico dell'innalzamento della temperatura nel tempo in funzione dell'apporto di calore e dei relativi passaggi di stato



# UMIDITÀ

Il termine umidità è comunemente usato quando si parla di umidità presente nell'atmosfera; tuttavia, è una parola generica e ambigua; esistono diversi termini specifici, ognuno dei quali rappresenta un differente parametro utile per descrivere una proprietà particolare.

In generale l'umidità atmosferica è la misura della quantità di vapore acqueo (o acqua in sospensione molecolare) in un dato volume d'aria. Il vapore acqueo è un costituente variabile dell'atmosfera, la cui concentrazione dipende da fattori locali, e generalmente varia tra 0,5% e 4%. Questa variabilità è una conseguenza del fatto che il vapore acqueo può cambiare stato, diventando liquido o solido.

Il primo parametro igrometrico è la pressione parziale di vapore acqueo: tale pressione, esercitata dalle molecole di acqua, può aumentare fino a raggiungere un certo limite; a questa soglia, il numero di molecole di acqua in evaporazione da un liquido è uguale al numero di quelle che dall'atmosfera ritornano nel liquido stesso, creando così un equilibrio dinamico tra evaporazione e condensazione, chiamato saturazione. La soglia di saturazione è determinata dalla temperatura, oltre questa soglia prevale la formazione di condensa.

Il rapporto di miscelazione di aria umida (cioè aria secca e vapore acqueo) è il rapporto adimensionale tra la massa di vapore acqueo e la massa di aria secca e questo rapporto rappresenta la miscela ponderale di queste due sostanze gassose.

## PRINCIPALI COSTITUENTI DELL'ARIA

---

### Elementi maggioritari

Azoto ( $N_2$ , 78,084% volume)

Ossigeno ( $O_2$ , 20,946%)

Argon (Ar, 0,934%)

---

### Elementi minoritari

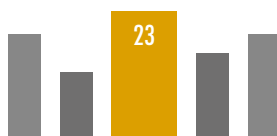
Anidride Carbonica ( $CO_2$ , variabile, 360 ppm nel 1998, 399 ppm nel 2013)

Neon (Ne, 18,182 ppm)

Elio (He, 5.24 ppm)

Metano ( $CH_4$ , 1,77 ppm)

---



L'umidità assoluta  $U_A$  è il contenuto in grammi di vapore acqueo ( $m_v$ ) in un metro cubo ( $V_{TP} = 1\text{ m}^3$ ) di aria a specifici valori di temperatura e pressione.

Parametro	Formula
Umidità Assoluta	$U_A = m_v / V_{TP}$
Umidità Specifica	$U_S = m_v / m$ con $m = m_a + m_v$
Umidità Relativa (RH%)	$U_R = m_v / m_{v,sat}$

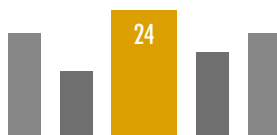
L'umidità specifica  $U_S$  di aria umida è il rapporto adimensionale tra la massa di vapore acqueo ( $m_v$ ) e la massa umida dell'aria ( $m_a + m_v$ ) e questo rapporto rappresenta la diluizione ponderale del vapore nella atmosfera.

Infine l'umidità relativa ( $U_R$  o più spesso RH%) indica il rapporto percentuale tra la massa di vapore acqueo ( $m_v$ ) contenuto in una data massa d'aria e la quantità massima che la stessa massa può contenere ( $m_{v,sat}$ ) in specifiche condizioni di temperatura e pressione.

La temperatura del punto di rugiada, o più comunemente punto di rugiada (Dew Point in inglese), è la temperatura alla quale una particella di aria umida deve essere raffreddata a pressione atmosferica costante e contenuto di vapore d'acqua costante per raggiungere la saturazione. La temperatura di rugiada è quindi la temperatura per cui l'umidità relativa raggiunge  $U_R = 100\%$  e si ha condensazione. Essa indica a che temperatura deve essere portata l'aria per far condensare il vapore acqueo in rugiada, senza alcun cambiamento di pressione. Se il punto di rugiada cade sotto  $0^\circ\text{C}$ , esso viene chiamato anche punto di brina.

T/RH%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%
15°C	-2,4°C	-0,3°C	1,5°C	3,2°C	4,7°C	6,0°C	7,3°C	8,5°C	9,6°C
20°C	1,9°C	4,1°C	6,0°C	7,7°C	9,3°C	10,7°C	12,0°C	13,2°C	14,4°C
25°C	6,2°C	8,5°C	10,4°C	12,2°C	13,8°C	15,3°C	16,7°C	18,0°C	19,1°C
30°C	10,5°C	12,8°C	14,9°C	16,8°C	18,4°C	20,0°C	21,4°C	22,7°C	23,9°C

Esempi di computo di Dew Point a diversi valori di temperatura e umidità relativa



## ILLUMINAMENTO

L'occhio umano può distinguere visivamente una certa porzione spettrale della luce solare, e lampade dovrebbe riprodurre strettamente lo spettro solare, o almeno le bande spettrali corrispondenti ai colori visibili. Nell'ambito della conservazione preventiva, l'illuminazione, sia essa di una esposizione permanente, una mostra temporanea o un ambiente di interesse storico-artistico, deve rispondere fondamentalmente a tre problemi: la corretta visione e godimento di colori, gli effetti diretti e indiretti dell'irraggiamento e i movimenti convettivi dell'aria generato dalle fonti di luce.

La variabilità dello spettro solare pone una domanda, fondamentale quando è necessaria progettare l'illuminazione di ambienti: Che tipo di lampada darà la stessa sensazione della luce solare?

Nessuna lampada può varia durante il giorno come fa il sole, nè coi cambi stagionali o al cambiare delle condizioni meteo: ogni lampada può riprodurre solo uno di questi particolari tipi di sensazione visiva e non può riprodurre una sequenza dinamica di colori, toni e sfumature, come la luce del sole.

Tuttavia, di fronte a un affresco, o in una sala espositiva, è necessario scegliere il tipo di illuminazione da adottare. Sarebbe meglio scegliere una luce che dà lo stesso colore di una candela, una torcia, o il sole all'alba o un altro momento preciso? Questa è una sensazione statica che deve essere scelto a priori, e una volta che è stato realizzato il sistema di illuminazione, per lo più rimarrà invariato.

Per l'illuminazione di un ambiente il primo passo è la scelta della sorgente luminosa più conveniente che dovrebbe garantire una buona riproduzione dei colori e il minimo danneggiamento degli oggetti e delle superfici. È noto che per la maggior parte degli oggetti con superficie fotosensibile, la sensibilità spettrale diminuisce esponenzialmente dal UV a IR, ossia diminuisce rapidamente con l'energia della radiazione. D'altra parte, la radiazione infrarossa, pur causando meno problematica di decolorazione o causare altri effetti chimici, può surriscaldare le superfici. Una buona pratica per ridurre i fattori di degrado dati dall'illuminazione è quella di evitare un'intensità di illuminazione eccessiva e l'esposizione diretta alle radiazioni UV e IR che sono nocive e non utili per la corretta visione dei colori.

Tutte le sorgenti luminose hanno uno spettro caratteristico di emissione, anche in nelle bande dell'Ultravioletto e dell'Infrarosso che spesso costituiscono una parte considerevole dello spettro di irraggiamento totale. Gli effetti nocivi delle radiazioni UV e IR possono variare con il tipo di materiale e la sua sensibilità a queste lunghezze d'onda, inoltre, se gli oggetti sono fotosensibili, la scelta migliore è quella di illuminare con la più bassa intensità di luce richiesto per la corretta visualizzazione e solo per la durata strettamente necessaria.

L'illuminamento in un punto di una superficie è il rapporto tra il flusso luminoso che incide su un elemento di superficie intorno al punto e l'area dell'elemento stesso. Nel Sistema Internazionale si misura in lux (lx).

Le differenti sorgenti luminose possono avere un differente effetto sulla percezione del colore di oggetti in mostre o superfici policrome, in dipendenza del loro indice di resa cromatica (CRI - colour rendering index- o, più precisamente, Ra) che è determinato dalla distribuzione spettrale della sorgente luminosa. Per la migliore fruizione del colore, la lampada dovrebbe produrre uno spettro continuo, possibilmente vicino a quello della luce solare. Le lampade alogene forniscono la migliore approssimazione e sono utilizzati come riferimento ( $Ra = 1$ ) anche se il loro massimo di emissione è spostato verso il rosso: il picco è nel vicino IR, di conseguenza tendono a surriscaldare le superfici illuminate e dissipano molto calore nell'ambiente. Questi tipi di sorgenti fanno parte della categoria delle lampade ad incandescenza che hanno uno spettro continuo, con un'intensità spettrale che si differenzia dalla luce del sole per la temperatura di emissione che privilegia i toni caldi. Queste lampade emettono in genere poca radiazione UV pur avendo come problema principale la grande emissione in IR (oltre il 90% dell'energia), che dissipano energia sotto forma di calore.

Le lampade fluorescenti al contrario hanno una bassa dissipazione in infrarosso e per questo motivo si dicono a luce fredda. Il loro spettro è caratterizzato da un certo numero di bande spettrali, con alcuni colori predominanti e altri mancanti. Le lampade fluorescenti, come ad esempio i tubi al neon, hanno emissione di raggi UV superiore rispetto alle lampade ad incandescenza e sono poco indicate per la conservazione dei materiali fotosensibili come carte e pergamente, anche se al giorno d'oggi esistono lampade con filtri anti-UV incorporati. Si noti che un tipo di lampada di Wood è proprio quella a fluorescenza!

Un'ulteriore tipologia di fonte luminosa che si sta affermando oggi è quella a LED. Un LED è un dispositivo che sfrutta le proprietà ottiche di alcuni materiali semiconduttori per produrre fotoni attraverso il fenomeno dell'emissione spontanea ed è in genere monocromatico. Esistono LED a luce bianca (calda o fredda) il cui spettro luminoso è abbastanza continuo seppur con una leggera dominante nel blu. Per ottenere luce "naturale" vengono spesso accoppiati led a luce "calda e fredda". Il maggior vantaggio degli illuminanti a LED bianchi è quello di avere bassa emissione sia nella banda UV sia in quella IR.

# MECCANISMI DI DEGRADO CAUSATI DAL MICROCLIMA

Come i processi di degrado non sono esclusivi, anzi, in genere ne avvengono diversi simultaneamente, così i parametri microclimatici concorrono all'attuazione dei fenomeni di deterioramento e all'accentuarsi dell'invecchiamento. Gli effetti della modificazione dei parametri ambientali influenza in maniera complessa e diversificata i diversi processi fisici e chimici. Vediamo qui di seguito alcuni di essi.

## *Espansione termica*

L'aumento e la diminuzione della temperatura provoca effetti di dilatazione e restringimento che influenzano la resistenza strutturale dell'oggetto da conservare, sia esso di materia organico o inorganico.

## *Cicli di temperatura*

Uno degli effetti termici più influenti dal punto di vista strutturale sono i cicli di innalzamento e abbassamento della temperatura che, oltre a coinvolgere i materiali costituenti, intervengono anche sul contenuto di umidità, provocando danni di carattere meccanico come fratture e fessurazioni.

## *Movimenti dell'aria e depositi superficiali*

Le differenze di temperatura di un ambiente modificano temperatura e densità dell'aria generando movimenti che portano all'accumulo di sostanze incoerenti e/o inquinanti sulle superfici degli oggetti esposti, con possibile accelerazione dei processi di deterioramento chimico.

## *Modifica dell'umidità relativa (RH)*

L'aumento o la diminuzione della temperatura dell'aria portano ad un cambio di densità e conseguente modifica del livello di saturazione del vapore d'acqua contenuto nella massa d'aria stessa con possibilità di condensazione sulle superfici degli oggetti.

## *Variazione della Temperatura di transizione vetrosa (Tg)*

Rappresenta il valore di temperatura al di sotto della quale un materiale amorfo si comporta da solido vetroso. I polimeri possono possedere più Tg ai cui valori di temperatura diventano rigidi e fragili assumendo la tendenza a frantumarsi. Inoltre a valori di temperatura maggiori di Tg tali polimeri possiedono elasticità e capacità di subire deformazioni plastiche senza andare incontro a fratture. L'invecchiamento, comunque esso sia generato, provoca una variazione della Tg.

## *Cinetica chimica*

L'aumento della temperatura, quindi l'apporto di energia al corpo in forma di calore, favorisce le reazioni chimiche degenerative. Le molecole costituenti il corpo, avendo più energia a disposizione, possono rompere più facilmente i loro legami e generare tutti quei processi di degrado che spesso coinvolgono anche composti "esterni" quali depositi inquinanti e molecole d'acqua.

### *Propagazione di microorganismi*

Il miglior ambiente per il proliferare dei microorganismi che inducono il degrado è quello con umidità relativa elevata e temperature tra i 18 e i 35 °C. Nonostante questo esistono specie che possono “sopportare” anche climi più rigidi e secchi.

### *Igroscopicità*

La carta, come la pergamena, il legno, le tele naturali e in genere la maggior parte dei supporti organici, hanno una elevata sensibilità ai cambiamenti di umidità nell’ambiente di conservazione. Variazioni significative e/o repentine dell’umidità relativa possono portare a stress meccanico e conseguente indebolimento delle strutture fisiche oltre alla migrazione di materiali costituenti il supporto stesso.

### *Reazioni chimiche*

La concomitanza di temperature “elevate” e presenza di acqua come umidità interna dell’oggetto favoriscono i processi di idrolisi e ossidazione. Anche l’impiego di medium designativi può indurre processi degenerativi, come nel caso dell’inchiostro ferro-gallico che, in ambienti umidi, può percolare dal verso al recto del foglio o addirittura liberare acido tannico che, in presenza di catalizzatori come i metalli, corrode la carta.

### *Alterazione della struttura polimerica*

L’energia trasportata dalla radiazione luminosa, comprensiva delle componenti IR e UV, può essere assorbita dalle molecole e se questa supera quella di legame, si ha rottura delle catene polimeriche con possibile viraggio cromatico, decoesioni e perdita di legante.

### *Stress interno-esterno*

Anche in assenza di reazioni fotochimiche, l’irraggiamento luminoso produce una variazione di temperatura sulla superficie dell’oggetto e nell’area circostante con conseguente alterazione dell’equilibrio (temperatura, umidità, equilibrio chimico, etc.)

### *Gradienti termici ambientali da irraggiamento*

Il posizionamento delle fonti luminose deve essere fatto con cura poiché sia le lampade, sia la luce solare che entra dalle aperture riscalda l’aria circostante inducendo dei moti “ventosi” che possono ingenerare alcune problematiche conservative come il riscaldamento o raffreddamento per convezione, la deposizione di materiali incoerenti o inquinanti.

# Colore e Colorimetria

La colorimetria è quella parte dell'ottica che, come dice la parola, si occupa della misura scientifica del colore. La sua importanza pratica è grande ed evidente, basta pensare alla riproduzione delle immagini, dalla fotografia, alla stampa, alla televisione. È una disciplina con radici nell'antichità che si è evoluta attraverso una successione di fasi strettamente legate alla fisiologia, alla fisica e alla psicologia. Tutt'oggi gli studi colorimetrici non sono conclusi e probabilmente la loro chiusura coinciderà con la comprensione totale del fenomeno della visione a colori. Le fasi storiche della colorimetria sono tre:

- il colour matching è la prima fase basata sulla psicofisica ed è dovuta principalmente a James C. Maxwell (1860), che per primo misurò le "colour-matching functions";
- il colour difference è la seconda fase basata sulla psicometria, riguarda le scale di colore ed è iniziata con Hermann von Helmholtz (1891-92) ed Ervin Schrödinger (1920), che posero e discussero il problema della metrica nello "spazio del tristimolo";
- la colour appearance è la terza fase e riguarda la percezione e studia il colore percepito sotto l'influenza di due fattori apparentemente contraddittori: da una parte il fenomeno della costanza del colore, secondo il quale il colore percepito di un oggetto illuminato sembra non mutare al cambiare dell'illuminazione; dall'altra la mutevolezza del colore percepito in relazione al campo prossimale, al contorno, allo sfondo e al livello d'illuminazione.

La pratica colorimetrica si basa su norme e raccomandazioni della "Commission International de l'Éclairage" (CIE - Commissione Internazionale per l'Illuminazione).

Tutto ha inizio con lo studio di come funziona l'apparato visivo. L'occhio umano ha fotorecettori per la visualizzazione di colori a media e alta luminosità con picchi di sensitività in lunghezze d'onda brevi (S, 420-440 nm), medie (M, 530-540 nm), e lunghe (L, 560-580 nm). Così, la sensazione del colore è descritta da tre parametri. Ogni colore potrà così essere identificato con valori, detti di tristimolo, che sono la somma dei 3 colori primari in un modello di colore con 3 componenti additive.

Nel 1931 la CIE definì uno spazio di colore basato proprio sul principio del tristimolo e che comprendeva tutte le tinte visibili dall'occhio umano, a prescindere dalla luminanza: qualunque colore all'interno di questo spazio bidimensionale può infatti avere una luminanza che varia dal bianco al nero. Se poi si tiene conto anche di questo fattore (la luminanza) lo spazio così definito diviene tridimensionale e rappresentato mediante coordinate XYZ.

Il modello CIE 1931 si basa, come altre codifiche note, sull'utilizzo di tre colori primari che, opportunamente miscelati tra loro in sintesi additiva, permettevano di ottenere tutti i colori che l'occhio umano può

percepire. La commissione CIE ha comunque definito diversi modelli matematici di percezione del colore indicati come spazi di colore e rappresentati da sigle come XYZ (è il modello CIE 1931), xyY, LCH, Luv, Lab. A differenza, però, dei metodi RGB o CMYK (usati rispettivamente in sintesi additiva e in sottrattiva), il diagramma di cromaticità proposto dalla CIE non dipendeva dal comportamento di questo o quel dispositivo di visualizzazione o stampa in quanto basato sul concetto di Osservatore Standard.

L'Osservatore Standard CIE 1931 è valido per visione foveale con campo visivo di  $2^\circ$ . Per la visione esterna alla macula (campo visivo di  $10^\circ$ ) è stata successivamente introdotta una trattazione analoga a quella relativa al sistema CIE 1931 che ha portato alla definizione dell'Osservatore Standard Supplementare CIE 1964.

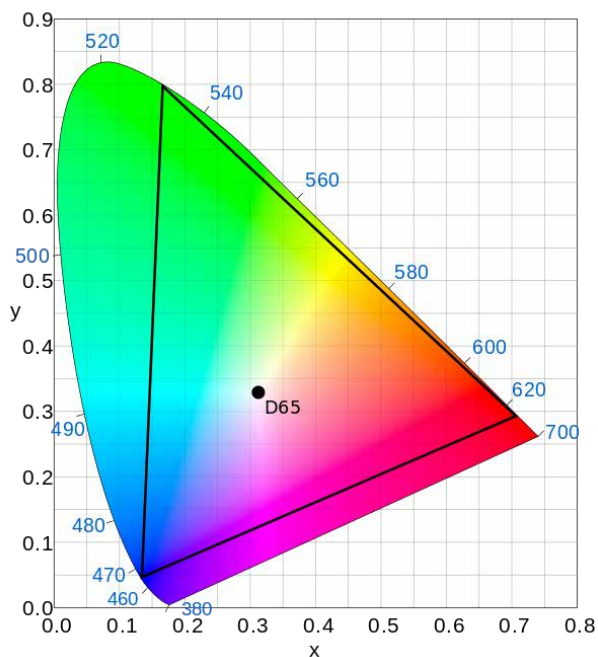
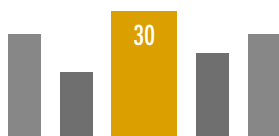


Diagramma di cromaticità CIE 1931





## IL METAMERISMO

Il metamerismo consiste nella possibilità da parte dell'occhio di percepire la stessa sensazione di colore in presenza di luce con distribuzione spettrale diversa dal colore puro in questione. Esistono infatti radianze differenti a cui corrispondono uguali attivazioni dei fotorecettori per la visualizzazione a colori e che, quindi, producono uguali sensazioni di colore. Questo fenomeno è detto metamerismo e gli stimoli di colore che producono uguali sensazioni di colore sono detti stimoli metamericici.

Possiamo dire metameici, quindi, i colori che:

- appaiono uguali pur avendo spettri differenti;
- appaiono uguali sotto uno specifico illuminante e possono apparire differenti sotto altri;
- sotto un particolare illuminante, appaiono uguali per l'osservatore standard CIE 1931 ma non per l'osservatore supplementare CIE 1964.

L'entità di questi fenomeni è definita da opportuni indici di metamerismo.

### *Indice di metamerismo per cambiamento dell'illuminante*

L'indice di metamerismo per cambiamento dell'illuminante riguarda coppie di colori superficiali (come nel caso dei ritocchi), i quali, sotto un particolare illuminante, risultano metamericici, cioè con uguale risposta colorimetrica. L'illuminante di riferimento è tipico del settore d'impiego dei colori in esame e, in mancanza di un illuminante tipico, la CIE raccomanda il D65 (Daylight 65), illuminante che simula la luce diurna a 6500K. Al cambiare dell'illuminante i due colori metamericici possono avere diverse risposte del colore, la cui differenza è valutabile con una delle formule di differenza di colore raccomandate dalla CIE o con altre formule. L'indice di metamerismo  $M_s$  è espresso da questa differenza di colore e dipende dall'illuminante e dalla formula di differenza di colore usata. Nel caso di restauri che prevedono il reintegro cromatico mimetico, e quindi il più possibile non riconoscibile non immediatamente riconoscibile in luce visibile, è sempre bene valutare il metamerismo cambiando l'illuminante di riferimento e valutare la scelta della lampada da utilizzare in fase di ritocco in base alle condizioni di illuminamento della collocazione finale. Le dominanti colorimetriche specifiche di alcune lampade possono palesare la scelta di pigmenti con composizione chimica differente dall'originale.

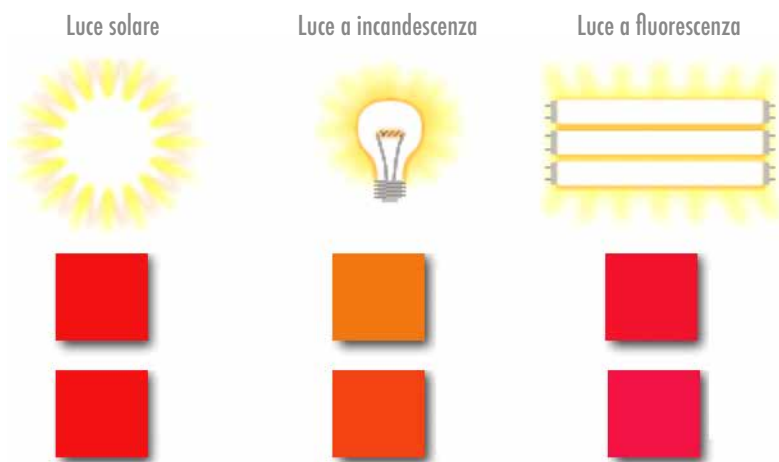
### *Indice di metamerismo per cambiamento dell'ampiezza dell'angolo di visione*

I due osservatori standard della CIE sono riferiti rispettivamente a un campo visivo di 2° e 10°.

Si può verificare che coppie di colori siano metameriche per un osservatore e non lo siano più per l'altro (e viceversa). L'indice di metamerismo  $M_0$  è rappresentato dalla differenza di colore valutata con una delle formule di differenza di colore raccomandate dalla CIE o con altre formule. L'indice di metamerismo  $M$  dipende dalla formula di differenza di colore usata.

### *Metamerismo geometrico*

Due campioni, i cui colori risultano metamerici se misurati secondo una particolare geometria, possono essere non più tali al cambiare della geometria e ciò denuncia in generale la presenza di un effetto superficiale che li differenzia. Tale fenomeno viene comunemente detto metamerismo geometrico e anche per questo si può definire un indice di metamerismo. In genere, nella percezione quotidiana, la variazione di percezione del colore dipende dall'angolo di incidenza della luce in relazione all'angolo specifico di visione dell'osservatore.



Metamerismo da illuminante

# Spettrometria in riflettanza nell'UV, nel visibile e nel vicino IR

La spettroscopia in riflettanza, spesso chiamata anche spettrofotometria, è una tecnica spettroscopica non invasiva basata sulla misura del fattore di riflettanza spettrale che indica la quantità di radiazione retrodiffusa da una superficie alle varie lunghezze d'onda, generalmente nel vicino ultravioletto (UV), nel visibile (vis) e nell'infrarosso vicino (NIR).

Alla base della spettroscopia di riflettanza si pone lo studio della riflessione diffusa che avviene quando la radiazione interagisce con il campione e poi si propaga in tutte le direzioni.

Un oggetto, quando irraggiato con luce visibile, assorbe alcune componenti e ne riflette, in maniera diffusa, altre: questo è il principio per cui possiamo vedere i colori degli oggetti. Estendendo questo principio anche alla bande del vicino ultravioletto e del vicino infrarosso, è possibile misurare la quantità di radiazione retrodiffusa dal campione in esame per ogni lunghezza d'onda ottenendo così lo spettro di riflettanza. I fenomeni fisici coinvolti sono legati alle transizioni elettroniche delle molecole colpite dalla luce, per cui gli assorbimenti e/o la riflettanza sono costituiti da molte righe vicine tra loro tanto da apparire come una banda continua.

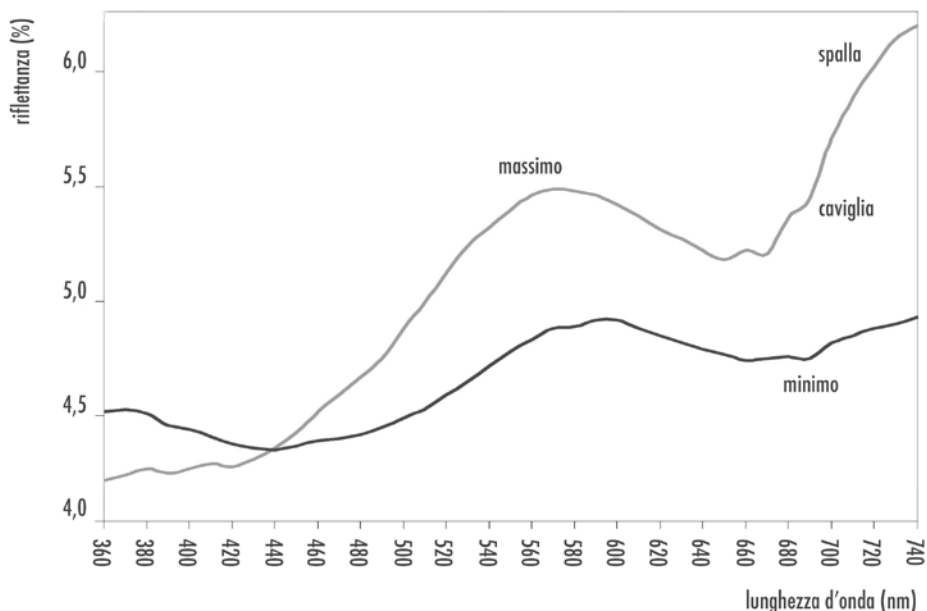
Per rendere le misure indipendenti dallo spettro di emissione della sorgente di illuminazione e dall'eventuale spettro di assorbimento delle componenti ottiche impiegate (filtri, reticoli, lenti, fibra ottica) è necessario procedere con la calibrazione prima di acquisire i dati spettrofotometrici dai campioni. Per fare ciò è necessario misurare uno standard assoluto di riflettanza costante e nota, in genere bianco (cosiddetto bianco assoluto) a cui tutte le successive misure saranno riferite: i valori di radiazione letti in riflessione verranno infatti riferiti allo standard ed espressi in percentuale rispetto a tale riferimento (se misurassimo nuovamente lo standard otterremmo il 100% per ogni lunghezza d'onda). Oltre al riferimento del bianco è buona norma, in fase di calibrazione, eseguire una misura del cosiddetto "nero", cioè di uno standard con riflettanza pari allo 0% per ogni lunghezza d'onda; questa operazione è utile per definire, ed eliminare nelle successive misure, il rumore di fondo dello strumento prodotto, in genere, dai componenti elettronici.

Per poter riconoscere i pigmenti, gli spettri devono essere confrontati con altri noti, acquisiti in laboratorio e associati a materiali conosciuti. Il confronto si basa sulla presenza (o meno) di specifiche caratteristiche che rendono lo spettro unico (si parla infatti anche di firma spettrale di un pigmento): minimi, caviglie e spalle crescenti, caviglie e spalle decrescenti, massimi e flessi.

Gli spettri sono in genere di difficile interpretazione e molti sono i limiti al riconoscimento dei pigmenti: possono insorgere problematiche quando si hanno spettri S-shaped (molti gialli e aranci, alcuni rossi), in caso di mescolanze tra alcuni pigmenti, in presenza di pigmenti molto scuri a causa della scarsa riflettanza che rende lo spettro appiattito verso lo zero percentuale, o con vernici superficiali molto ingiallite che tendono a spostare la posizione dei massimi verso il giallo, a circa 500 nm. È inoltre evidente la necessità di avere banche dati di verifica molto ampie e variegate.

## APPLICAZIONI

L'importanza della tecnica è quella di poter identificare molti pigmenti in maniera del tutto non invasiva presenti nello strato superficiale del dipinto: ampia è la gamma dei materiali riconoscibili, in particolare per quanto concerne quelli di natura organica e i coloranti, sia antichi che moderni. In ambito conservativo la tecnica viene spesso accoppiata a misure quantitative e certificate del colore (*colorimetria*) per valutare puliture e restauri e per lo studio delle alterazioni di pigmenti e vernici. Infine l'uso di questa metodologia integrata con altre, come l'XRF, può portare, in casi semplici, a ipotizzare ricostruzioni stratigrafiche attendibili.



# Fluorescenza X caratteristica

L'analisi della fluorescenza X in dispersione di energia (EDXRF), nota più semplicemente come XRF, è una tecnica spettroscopica elementare non invasiva in grado di identificare la maggior parte degli elementi chimici presenti nel campione.

La tecnica XRF (X-Ray Fluorescence) sfrutta il fenomeno dell'emissione di radiazione X caratteristica di un atomo a seguito di un'interazione con raggi X incidenti prodotti da una specifica sorgente, in genere un tubo radiogeno. I raggi X riemessi dal campione vengono poi raccolti da un rivelatore che, attraverso la conversione in segnale digitale e l'elaborazione software, genera un grafico detto spettro.

Quando un fotone X incide su un campione può interagire in diversi modi: si parla di effetto fotoelettrico, se il fotone incidente viene interamente assorbito, di effetto Compton, o diffusione anelastica, quando il fotone cede solo parte della sua energia e modifica di conseguenza la sua traiettoria iniziale, di effetto Rayleigh, o diffusione elastica, se il fotone modifica la sua traiettoria mantenendo invariata la sua energia. L'analisi della fluorescenza X studia quei fotoni che vengono interamente assorbiti, cedendo la propria energia ad uno degli elettroni degli atomi presenti nel composto. Se l'energia è sufficiente, è possibile estrarre dall'atomo un elettrone delle orbite più interne lasciando quindi l'atomo in uno stato eccitato. Gli elettroni estratti sfuggono all'atomo e rimangono in genere all'interno del materiale, ricombinandosi eventualmente con gli atomi presenti.

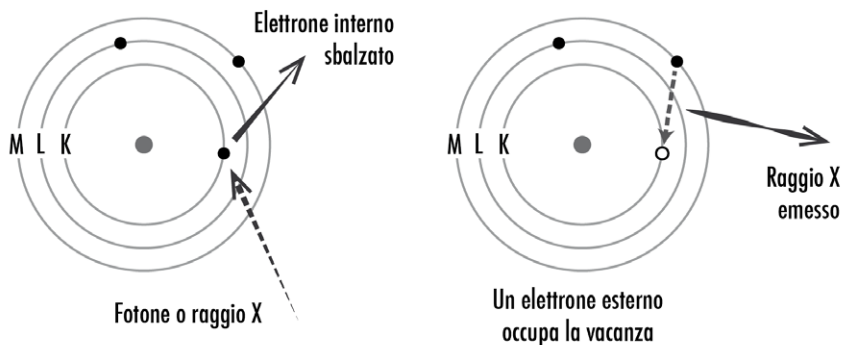
La successiva e immediata caduta di un elettrone delle orbite esterne verso la vacanza che si è creata produce l'emissione di energia sotto forma di radiazione X. Questi raggi X hanno energia corrispondente alla differenza tra il livello di partenza e quello di arrivo e sono caratteristici dell'atomo stesso e vengono detti raggi X di fluorescenza; attraverso lo studio di queste emissioni è possibile riconoscere gli elementi costituenti il campione.

I vari livelli energetici dell'atomo (shell) vengono denominati con le lettere K, L, M, N, O; a seconda del livello energetico da cui l'elettrone viene espulso avremo pertanto emissioni di fluorescenza, o righe, della serie K (righe K) o della serie L (righe L) che sono quelle più comuni, a cui va aggiunta una lettera greca corrispondente al livello di partenza: per esempio potremo avere righe  $K_{\alpha'}$ ,  $K_{\beta'}$ ,  $L_{\alpha'}$  ecc.

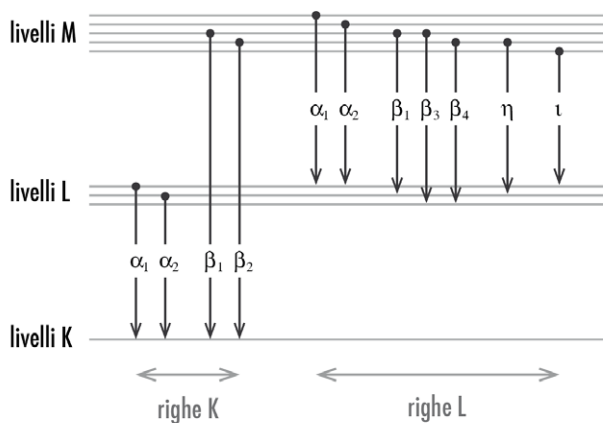
L'identificazione degli elementi (e non dei composti) presenti in un campione, ci permette quindi di dedurre la natura del materiale e, in taluni casi, di riconoscere elementi in traccia utili a fare considerazioni su provenienza e impurità presenti negli strati in esame.

L'effetto Rayleigh e l'effetto Compton, pur non contribuendo direttamente alla generazione di fluorescenza X, non vanno "dimenticati" in quanto, nello spettro di fluorescenza X, è normale trovarne traccia sotto forma di picchi di diffusione ad una precisa energia, dipendente unicamente dall'energia scelta per la radiazione incidente (non cambiano da un campione all'altro se si lascia l'energia della radiazione X di eccitazione invariata durante le diverse misure). Questi picchi vengono talvolta utilizzati per eseguire analisi di tipo quantitativo su alcuni campioni (quasi mai nel caso dei dipinti).

In ultimo è necessario precisare che un limite sostanziale di questo tipo di analisi è quello di non riuscire a rivelare tutti gli elementi con numero atomico  $Z < 15$  in quanto hanno energie di fluorescenza così basse che subiscono effetti di assorbimento interno al campione e non riescono a raggiungere il rivelatore.



Schema dell'interazione fotone-elettrone nell'emissione di radiazione X caratteristica dell'elemento chimico



Schema semplificato dei livelli energetici, delle transizioni elettroniche e loro sigle.

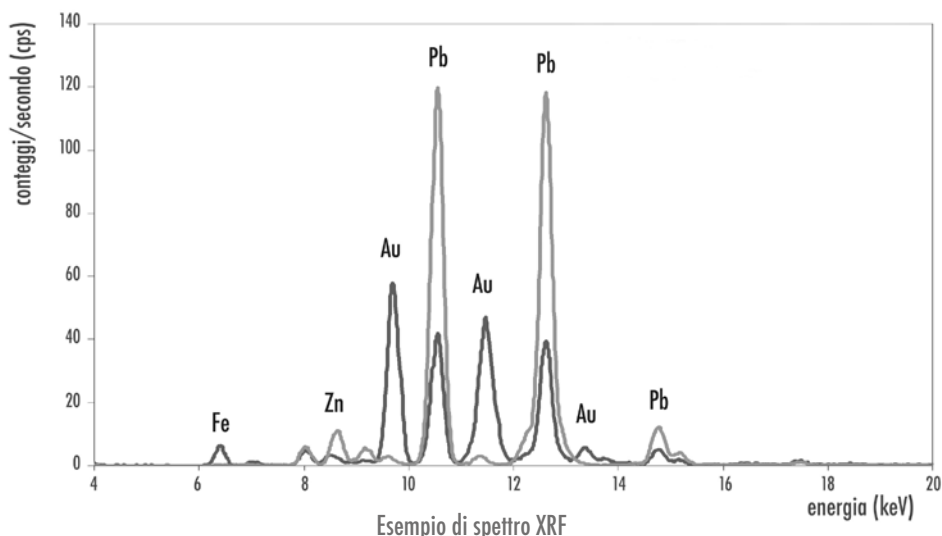
## APPLICAZIONI

La fluorescenza di raggi X fa parte delle analisi non distruttive e, grazie alle strumentazioni portatili, anche non invasive: grazie a queste caratteristiche viene utilizzata in diversi campi, ma trova una perfetta applicazione nell'ambito dello studio dei beni culturali, soprattutto dove la conoscenza composizionale e l'impossibilità di effettuare prelievi sono determinanti.

Nel caso di superfici dipinte, attraverso l'identificazione degli elementi chimici presenti negli strati pittorici, è possibile nella maggior parte dei casi risalire al pigmento utilizzato dall'artista, fornendo informazioni sulla tavolozza impiegata, sullo status economico della committenza e, in alcuni casi, supportando la datazione indiretta e l'identificazione di falsi.

Sussistono comunque alcuni limiti quando la tecnica è applicata ai dipinti:

- impossibilità di rivelare gli elementi chimici con numero atomico basso, quindi di individuare i composti organici (come per esempio le lacche) e i silicati di elementi leggeri (come il blu oltremare);
- la difficoltà ad associare un dato elemento chimico con certezza ai pigmenti presenti, (ad esempio l'individuazione di solo rame può essere riferita a quasi una trentina di pigmenti tra antichi e moderni, sia azzurri che verdi);
- impossibilità di separare le informazioni provenienti dagli strati pittorici superficiali da quelli più profondi, per esempio può risultare difficoltoso distinguere se i pigmenti siano mescolati nello strato superficiale oppure sovrapposti in due o più strati: in questi casi l'ausilio di altre tecniche complementari, quali FORS e Raman, può aiutare a discriminare la natura del composto.



# Presentare i dati

Purtroppo allo stato attuale non esistono normative e protocolli unificati sul modo in cui debbano essere presentati i dati scientifici ottenuti dalle analisi condotte sui beni culturali.

È quindi bene, quando possibile, ovvero quando il tipo di pubblicazione lo permette, indicare con la massima precisione e in modo esaustivo tutte le informazioni disponibili sia sulla strumentazione utilizzata, sia sulle modalità di esecuzione della misura stessa.

Quando si esegue una misura, ma anche quando viene letta e interpretata, è necessario porre l'attenzione su alcuni fattori:

- i limiti propri delle diverse metodologie diagnostiche in base ai principi fisico-chimici su cui si basano;
- i limiti dello strumento e le sue caratteristiche tecniche;
- i limiti dovuti al modo con cui si eseguono le misure.

Inoltre, tenendo presente che ogni misura è soggetta a errore e non esistono misure esatte, si deve considerare come per alcune analisi, in particolare per quelle di tipo quantitativo che indicano le quantità o concentrazioni di elementi e/o molecole, il dato sia affetto da errori che vanno conosciuti prima di poter procedere a confronti.

Poiché l'evoluzione tecnologica delle strumentazioni è sempre in corso, è bene prestare attenzione alle caratteristiche intrinseche degli strumenti impiegati, al loro modo d'uso e ai dati in grado di restituire, così da garantire il più possibile la ripetibilità delle misure e la confrontabilità dei dati provenienti da sistemi differenti. La presentazione dei risultati, indipendentemente dalla particolare tecnica d'analisi, dovrebbe essere accompagnata da una relazione con immagini, grafici e tabelle in cui si precisano le caratteristiche peculiari dello strumento, o almeno marca e modello.

Per essere scientificamente rigorosa, la presentazione dei risultati delle analisi diagnostiche dovrebbe seguire alcuni criteri di base:

- specifica della metodologia di indagine adoperata, dichiarandone se sia non invasiva o invasiva, distruttiva o non distruttiva;
- descrizione della strumentazione impiegata, con le caratteristiche più importanti;
- descrizione delle condizioni operative;
- tabelle, grafici, immagini riassuntivi dei dati ottenuti;
- disamina dei dati che tenga anche in considerazione le diverse possibili interpretazioni, le difficoltà riscontrate e i possibili studi integrativi utili a sciogliere i dubbi o le incertezze rimaste.



# Progettare una campagna d'analisi

La scelta del metodo di analisi dipende da diversi fattori, non ultimi i costi, i tempi di esecuzione e la disponibilità della necessaria strumentazione; la scelta primaria dovrebbe comunque essere dettata dal tipo di informazioni che si vogliono ottenere, dalla capacità di identificare le sostanze costituenti e dalla loro efficacia nella documentazione dello stato conservativo. Ogni tecnica infatti ha la capacità, in base alla radiazione e alla tecnologia impiegata, di indagare differenti parti di un'opera, fornendo informazioni legate proprio agli strati raggiunti. I dati forniti dalle analisi ed elaborati da tecnici e scienziati vanno poi sottoposti alla competenza di storici dell'arte, restauratori e conservatori. La scienza non si sostituisce al lavoro dello storico ma lo integra, talvolta suscitando maggiori, ma più mirate, domande.

L'impiego congiunto di più tecniche diagnostiche va sotto il nome di analisi integrate, ossia che vanno a integrarsi e restituire dati più certi e ampi con lo scopo di trarre il maggior numero possibile di informazioni sull'opera esaminata.

La scelta stessa delle metodologie da impiegare su ogni singola opera va accuratamente discussa, coordinata e programmata tra storici, conservatori e scienziati, così da valutare quali siano le più appropriate, considerando inoltre quali e quanti dati possano trarsi con il minore dispendio di energie e risorse, anche economiche.

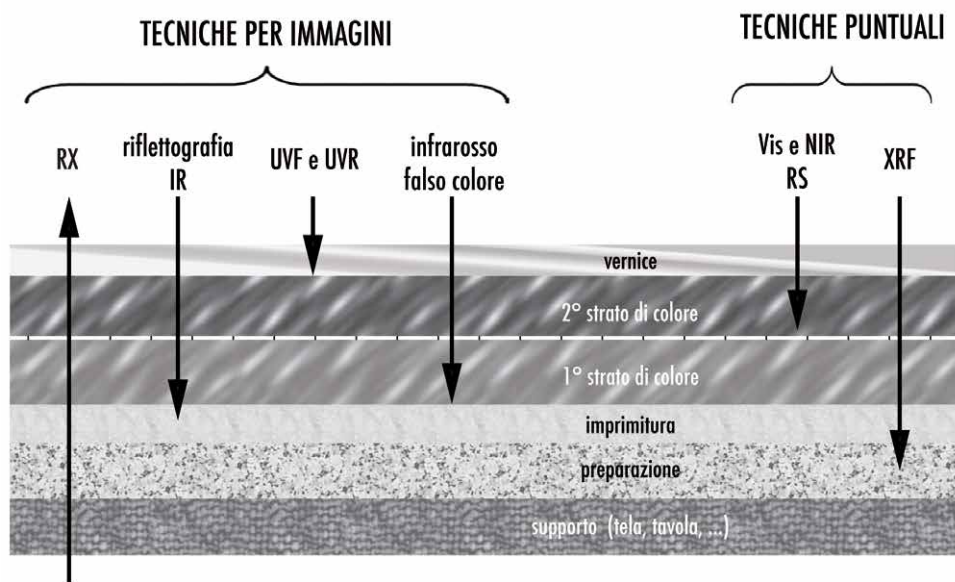
È noto che nell'ambito dello studio dei dipinti, ma non solo, le analisi su microprelievi forniscano informazioni maggiori e più esaustive, anche se limitatamente alla zona campionata, rispetto alle tecniche non invasive; è però l'uso congiunto di diverse tecniche - invasive e non - a garantire la più vasta gamma di dati significativi riducendo al minimo i campionamenti necessari da effettuare sulla superficie pittorica. Le tecniche non invasive, infatti, consentono di estendere a più zone dell'opera i risultati ottenuti in un numero limitato di punti di campionamento, garantendo così un'alta rappresentatività e affidabilità delle informazioni ottenute.

La preventiva progettazione dell'ordine di svolgimento delle analisi su di un dipinto permette, nella maggioranza dei casi, di procedere riducendo tempi e costi.

Il protocollo diagnostico che si sta via via affermando nel tempo prevede di iniziare le analisi dell'opera con le metodologie d'immagine in modo da sfruttare le immagini ottenute per una selezione precisa ed accurata dei punti di misura delle analisi locali, siano esse quelle spettroscopiche non invasive o dove

effettuare i microprelievi. Valutare la presenza di elementi quali eventuali ridipinture, stratificazioni pittoriche e disegno sottostante è essenziale per la scelta dell'area in cui eseguire un campionamento. Inoltre, le analisi d'immagine permettono quasi sempre di estendere le informazioni ottenute dalle misure puntuali a zone più ampie purché caratterizzate da risposte analoghe.

In occasione di operazioni di restauro, poi, le analisi vanno premesse ed alternate alla varie fasi di intervento sull'opera, accompagnando l'evolversi del restauro e potendo fornire, passo passo, informazioni utili al restauratore circa metodi esecutivi e materiali impiegati anche nei precedenti interventi.



Schema esemplificativo di una sezione stratigrafica di un dipinto con l'indicazione della profondità raggiungibile dalle diverse tecniche non invasive



---

 **simone  
caglio**