



INDAGINE E DIAGNOSTICA FOTOGRAFICA  
PER I BENI CULTURALI

Vanja Macovaz



isiaurbino



## INDICE

	Introduzione	9
1	Luce, radiazione, spettro	11
2	Il colore e la sua misurazione	23
3	Filtri ed illuminati	33
4	Immagini in luce visibile	39
5	Immagini derivate da radiazione infrarossa	45
5.1	Termografia	46
5.2	Riflettografia	52
5.3	Falso colore	60
6	Immagini derivate da radiazione ultravioletta	67
6.1	Riflettografia ultravioletta	74
7	Onde ad alta energia, raggi X	77
8	Fotoelasticimetria	81
9	Olografia	83
10	Georadar	85
11	Standard e sicurezza	87
12	Analisi dell'opera	95
	Bibliografia	145

## INTRODUZIONE

Questa relazione, prodotto finale del corso omonimo mira a riassumere gli studi introdotti in classe, finalizzandoli appunto alla diagnosi di un'opera del 1700, depositata per i restauri presso la sede dell'Università di Urbino nell'ex chiesa di San Girolamo. Durante lo svolgimento del corso l'opera è stata presa in esame e fotografata con alcune delle tecniche trattate a lezione, le fotografie infine sono state analizzate per dare una possibile interpretazione dei dati raccolti.

La diagnostica che interessa questo testo è quella legata ad i vari sistemi di imaging, dalle lastre radiografiche alla fotografia digitale e ciò che la contraddistingue è la sua quasi completa assenza di danno apportato all'opera. Sotto questa definizione sta appunto buona parte delle cosiddette tecniche di analisi non invasive, ovvero che non comportano asportazioni o sollecitazioni permanenti dell'opera.

Anche la fotografia, o meglio la luce utilizzata, può però essere portatrice di danno nei confronti del bene culturale e quindi andremo ad analizzare anche quali siano gli standard museali, studiati appositamente per evitare un'accelerazione del processo di degrado. L'atto fotografico in sé sottopone comunque l'opera a sollecitazioni maggiori del normale, la nostra attenzione sarà concentrata dunque nel limitare al minimo l'impatto dell'operatore fotografico.

Particolare attenzione sarà poi posta nel confronto tra le tradizionali metodologie legate alla fotografia analogica e le differenze con i sistemi digitali, oggi in grado di velocizzare i tempi di lavoro ed, in alcuni casi, aprire la strada a nuovi studi o nuove applicazioni di vecchie tecniche, in quanto alcuni dei vantaggi dell'immagine digitale possono portare non poche migliorie e semplificazioni ai procedimenti che verranno analizzati.

Il testo si svilupperà quindi trattando prima la teoria e la pratica studiate durante il corso, approfondirà poi il tema degli standard di conservazione ed infine, nell'ultimo capitolo, si concentrerà su l'opera presa in esame, una Sacra famiglia con tre santi di autore sconosciuto, proveniente da Sant'Angelo in Vado, applicando quindi quanto spiegato nel corso del testo.

## CAPITOLO 1

### Luce, radiazione, spettro

Per comprendere a fondo gli effetti e le potenzialità dell'imaging per i beni culturali, bisogna prima comprendere il funzionamento di una macchina da presa e gli effetti delle onde elettromagnetiche (della quale la luce visibile è unicamente una minima parte) sulla materia, la loro composizione, il loro comportamento e quindi le tecniche di ricezione di questi segnali.

Per arrivare alla definizione di onda elettromagnetica, ovvero l'oggetto di studio di questo testo, dobbiamo comprendere prima i concetti di campo elettrico e campo magnetico.

In fisica il termine campo (come ad esempio quello gravitazionale) è da considerarsi come uno spazio geometrico nel quale ad ogni punto corrisponde un valore quantizzabile, ovvero misurabile, sia esso un valore scalare (ovvero un numero collegato ad una unità di misura) oppure un vettore (ovvero un valore composto da direzione, verso ed intensità).

Come la fiamma di una candela emette un campo luminoso attorno a sé e all'interno di questo campo l'intensità luminosa irradiata è misurabile da un valore scalare, al pari la gravità prodotta dalla massa di un corpo produce un campo gravitazionale, dove per ogni punto di esso, la forza generata sarà misurabile unicamente in forma di vettore, ovvero come una forza definita da un'intensità, una direzione (il centro del corpo di massa maggiore) ed un verso, anch'esso diretto verso il centro del corpo.

Il campo gravitazionale risulta avere un comportamento molto simile a quello del campo elettrico e la sua forza è definita dalla seguente equazione:

$$F_g = G \cdot m_1 \cdot m_2 / d^2$$

In questo caso  $G$  è la costante gravitazionale ed  $m_1$   $m_2$  le masse dei 2 corpi.

Ovviamente per quanto riguarda il confronto tra 2 masse estremamente differenti, come la massa della terra e quella di un essere umano, una delle due masse è da considerarsi come inesistente e quindi la forza gravitazionale sarà, sulla superficie terrestre, sempre la stessa e pari a  $m_1 \cdot g$

dove la  $g$  minuscola indica una costante di circa  $9,81 \text{ m/s}^2$ , =  $9,81 \text{ N/kg}$

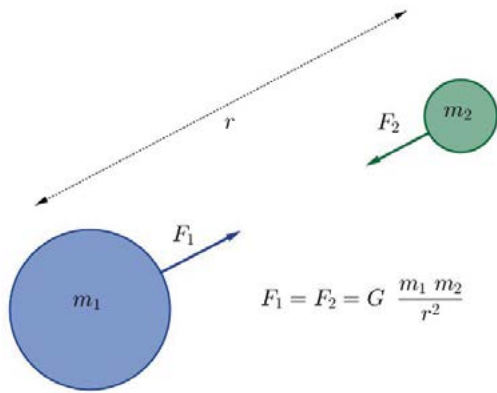


Fig. 1 Rappresentazione grafica delle forze presenti in un campo gravitazionale come quello della terra e della luna.

Come si può vedere (fig. 2), essendo la forza inversamente proporzionale al quadrato della distanza, le linee che vediamo rappresentare i punti con vettore di pari intensità sono tra loro concentriche e formano cerchi perfetti.

Similmente una particella carica elettricamente, poniamo un elettrone, per prendere la struttura di massa minore che disponga di carica od un protone, generano a loro volta un campo elettrico della stessa forma, ovvero circolare attorno al loro centro, proprio in quanto l'intensità anche in questo caso è legata alla distanza.

$$F_c = (1/4 \pi \epsilon_0) \cdot (q_1 \cdot q_2) / d^2$$

Anche in questo caso  $\epsilon_0$  rappresenta una costante, quindi la forza del campo sarà inversamente proporzionale al quadrato della distanza e, nel caso di una sola particella dotata di carica si presenterà con questa formula:

$$F = (1/4 \pi \epsilon_0) q_1 / d^2$$

Il campo magnetico invece si va a formare dal moto di cariche elettriche (elettroni) nello spazio, l'esempio più semplice è il caso del campo magnetico che si va a creare in un cavo attraversato da corrente elettrica o nel caso di un solenoide, ovvero una bobina formata dall'avvolgimento in spire di un trasportatore di elettroni.

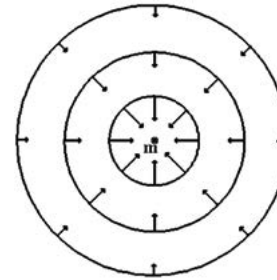


Fig. 2 Le linee non rappresentano aree di intensità esponenziale dei vettori in quanto, sviluppandosi in relazione al quadrato della distanza, il raggio avrà dimensione sempre maggiore tra una linea e quella di intensità dimezzata.

Questi due tipi di campo sono entrambi variabili con la distanza ma stabili nel tempo (escludendo ovviamente variazioni dell'intensità di corrente i), l'interazione fra questi due campi forma invece il campo elettromagnetico, rappresentato non più da forme stabili quanto invece nella forma di onda.

La propagazione nello spazio del campo elettromagnetico genera appunto onde di verso opposto dal centro di propagazione e direzione variabile, mentre l'intensità è determinata dal campo, modificando a sua volta la forma dell'onda. Queste onde non sono chiuse, si spostano nello spazio oscillando ortogonalmente alla direzione di propagazione e sono dette appunto onde elettromagnetiche.

Un'onda elettromagnetica è determinata quindi da una direzione, un verso ed una specifica lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) ovvero la distanza tra due creste della stessa onda, o da due punti di uguale intensità.

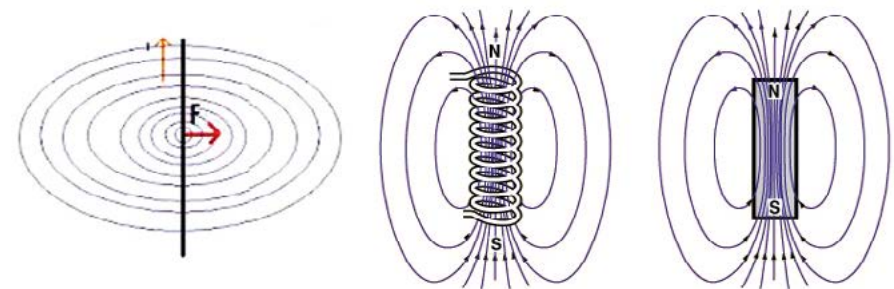


Fig. 3 Campi magnetici generati da un cavo percorso da corrente elettrica, da un solenoide e da un dipolo magnetico.

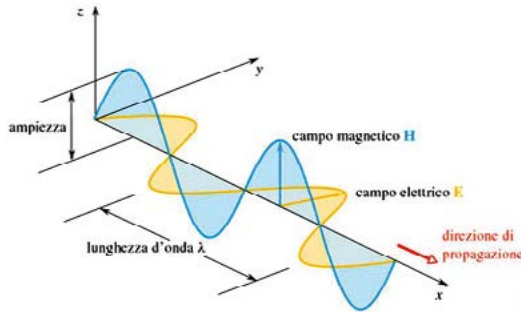


Fig. 4  
Radiazione elettromagnetica polarizzata e coerente nel tempo.

In figura 4 vediamo un esempio semplificato di un'emissione elettromagnetica; in questo caso è la rappresentazione di una radiazione con una lunghezza d'onda singola e polarizzata, ovvero con oscillazione contenuta unicamente su un piano.

Come si vede il campo elettrico varia in intensità durante lo spostamento e ortogonalmente, con moto speculare, varia l'intensità del campo magnetico. Una fonte di emissione di onde elettromagnetiche solitamente non emette radiazioni con una sola lunghezza d'onda, l'emissione non è polarizzata, quindi oscilla a 360° sull'asse di propagazione e nemmeno le onde di uguale frequenza sono emesse alla stessa fase.

Questo comporta che la rappresentazione corretta di un'emissione di onde elettromagnetiche a singola lunghezza d'onda sia più simile a questa che alla precedente.

Secondo la legge sopra citata la lunghezza d'onda è da considerarsi inversamente proporzionale alla frequenza (Hertz, Hz) ovvero il numero di oscillazioni che avvengono in un secondo.

Similmente l'energia portata dalla radiazione elettromagnetica è direttamente proporzionale alla frequenza, quindi lunghezze d'onda maggiore avranno minore frequenza e porteranno meno energia e viceversa.

Considerando quindi tutto lo spettro delle radiazioni elettromagnetiche esistenti avremo un'infinità di onde differenti, con caratteristiche proprie legate alla lunghezza d'onda specifica.



Fig. 5 Onde elettromagnetiche

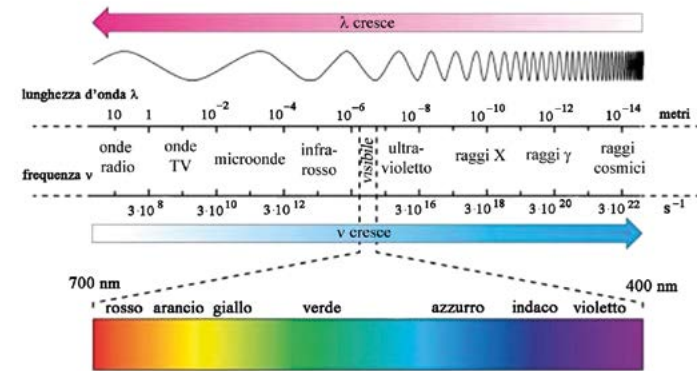


Fig. 6  
Rappresentazione riassuntiva dello spettro delle radiazioni elettromagnetiche.

La parte di spettro che noi consideriamo luce come si vede corrisponde ad una minima parte dello spettro completo ed ogni colore sarà caratterizzato dalla sua lunghezza d'onda specifica.

Solitamente si considera "luce visibile" o meglio "luce" quella serie di lunghezze d'onda che va dai 400 ai 700nm ma questa rappresenta una convenzione statistica in quanto, con variazioni da individuo ad individuo, l'occhio umano può percepire lunghezze d'onda che variano dai 380 ai 750 nm circa.

Questa parte di spettro, detta appunto visibile, può essere anche chiamata luce, ponendo attenzione a non utilizzare questo termine per quanto riguarda invece le radiazioni non visibili. Ad un'estremità dello spettro avremo le lunghezze d'onda che il nostro cervello percepisce come blu, dall'altra quelle percepite come rosse, mentre tra le due estremità sono presenti tutti i colori dell'iride.

Possiamo quindi identificare ogni colore con una serie di lunghezze d'onda, ad esempio il verde come le frequenze attorno ai 500nm, il verde-giallo come una luce composta da frequenze più vicine ai 550 nm e via di seguito.

Le radiazioni di lunghezza d'onda inferiore sono i blu ed a seguire le radiazioni ultraviolette, dall'altra parte dello spettro visibile i rossi e gli infrarossi, questi ultimi portano meno energia rispetto agli UV e compongono uno spettro vastissimo, fino al cosiddetto infrarosso termico.

Per quanto riguarda la trattazione di questo volume dovremo poi distinguere le onde anche in base alla loro propagazione nello spazio, quindi in onde polarizzate o meno ed in base alla loro fase, ovvero la differenza di emissione nell'arco del tempo.

Come detto precedentemente una radiazione elettromagnetica oscilla a  $360^\circ$  sull'asse della propagazione. Quando poniamo un filtro polarizzatore lungo il corso della radiazione andiamo invece ad assorbire tutte quelle radiazioni non parallele alla finestra di polarizzazione o meglio, permettiamo il passaggio solamente alla radiazione parallela ed alla componente su quel piano delle altre onde. Da questo blocco è determinato quindi il calo di luce che la polarizzazione comporta, all'incirca di 2 stop e mezzo. Per quanto riguarda la fase, l'unica distinzione che ci interessa in questa trattazione è quella tra uno spettro comune e quello della luce laser, definita come una radiazione composta da un'unica lunghezza d'onda coerente nello spazio, ovvero oscillante lungo un solo piano, e nel tempo ovvero senza emissioni a fasi differenti.

Fig. 7 Schema di un emettitore di luce laser.

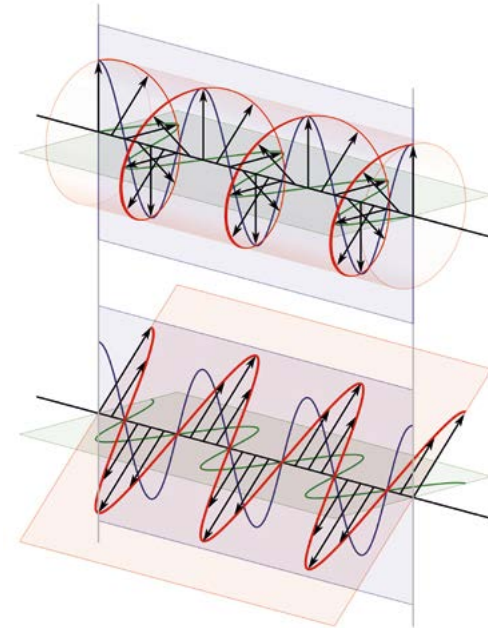
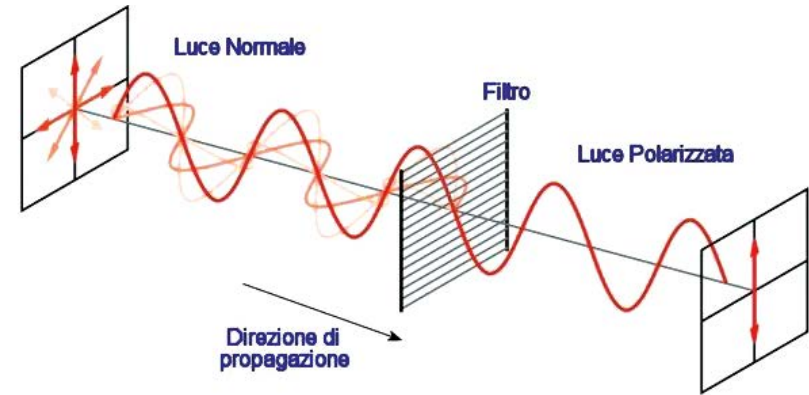
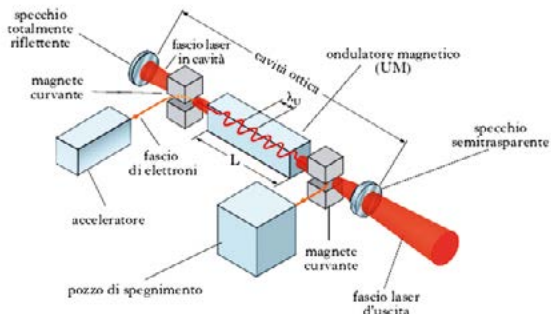


Fig. 8a Effetto di un filtro polarizzatore su un fascio di luce non polarizzata.  
FIG. 8b (pagina seguente) Differenze tra una polarizzazione circolare ed una lineare della luce.



Quando una radiazione elettromagnetica raggiunge una superficie si hanno una serie di interazioni che dipendono dalla qualità della radiazione stessa ed, in buona parte, dalle caratteristiche della superficie.

La riflessione è la prima interazione, l'onda elettromagnetica viene riflessa dalla superficie, procedendo nello spazio in direzione opposta alla superficie. L'angolo di riflessione è misurabile come l'angolo equivalente opposto alla normale della superficie.

Nel grafico a lato la radiazione è rappresentata da una freccia e la superficie è assunta come liscia, quindi la riflessione è perfettamente speculare, nel caso di superfici ruvide, l'irregolarità della superficie provoca invece una diffusione della luce, ovvero la sua riflessione a vari angoli lungo i 180 gradi della superficie. La radiazione che non viene riflessa dalla superficie viene da essa assorbita ed, in alcuni casi, trasmessa. La componente di trasmissione ed assorbimento di un materiale dipendono, oltre che dalla struttura fisica del materiale, anche dal suo spessore. Ovviamente la somma di riflessione, assorbimento e trasmissione darà un risultato pari al valore di intensità del raggio in ingresso.

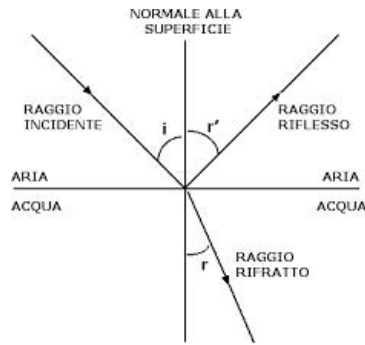


Fig. 9 Schema del comportamento di un'onda elettromagnetica quando incide su una superficie, in questo caso quella tra aria ed acqua.

Queste caratteristiche proprie di un materiale sono determinate per ogni punto dello spettro e quindi, un materiale molto trasparente agli infrarossi potrebbe apparire quasi perfettamente opaco ad altre lunghezze d'onda, quelle del visibile o dell'ultravioletto. Solitamente le radiazioni elettromagnetiche hanno un potere di attraversamento maggiore mano a mano che diminuisce la loro lunghezza d'onda anche se non sono assenti casi differenti, come la trasparenza di molti leganti e pigmenti alla radiazione infrarossa.

Quando una radiazione attraversa un materiale, esce dalla parte opposta del corpo attraversato con un angolo legato all'angolo di ingresso ed alle caratteristiche del materiale. Se la velocità della radiazione elettromagnetica nel vuoto equivale alla velocità della luce (circa 300.000 km/s), tale velocità diminuisce attraversando altri corpi.

$$n=c/v$$

La formula che determina l'indice di rifrazione, esposta a sinistra, sancisce che tale valore sia legato al rapporto tra la velocità della luce nel vuoto (c) divisa per la velocità di propagazione nell'elemento in questione (v) e tale misura determina quindi la relazione di un materiale con la radiazione.

Quando una radiazione passa da un corpo ad un altro aventi diversi indici di rifrazione, si crea una modificazione dell'angolo di propagazione legato al rapporto tra i due indici.

La formula che determina tale deviazione è la seguente:

$$n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2$$

Inoltre tale formula è da considerarsi valida per un'unica frequenza, in quanto, al variare della lunghezza d'onda varia anche l'indice di rifrazione di un determinato corpo.

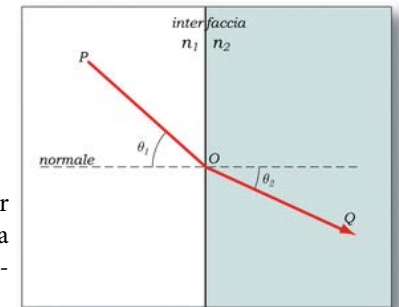


Fig. 10 Angolo di incidenza e di rifrazione di un'onda elettromagnetica.

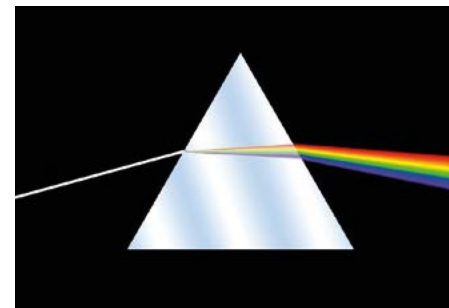


Fig. 11 Tipico esempio di dispersione della luce entrando ed uscendo da un prisma.

Per tale motivo si presenta l'effetto della dispersione della luce, maggiormente visibile quando una luce bianca attraversa un prisma. In questi casi si palesa come il differente angolo di rifrazione porti le varie lunghezze d'onda uscire dal prisma con angoli differenti, le frequenze più alte dei blu con un angolo minore, quelle dei rossi con un angolo maggiore (in fig. 10 si nota come tale deviazione sia duplice, quando la luce entra nel prisma a sinistra e poi quando ne esce).

Proprio questo principio le lenti dei moderni obiettivi vengono trattate in maniera che l'indice di rifrazione sia il più simile possibile tra le varie lunghezze d'onda, onde

evitare il problema rappresentato nella figura sottostante, la differente messa a fuoco delle varie frequenze.

Quando si ragiona unicamente sulle lunghezze d'onda del visibile, l'emissione e la riflessione solo parziali dello spettro (ovvero ogni caso al di fuori dei riflessi speculari), questa irregolarità dello spettro, assieme alla nostra percezione cromatica porta alla definizione del colore, trattato nel capitolo seguente.

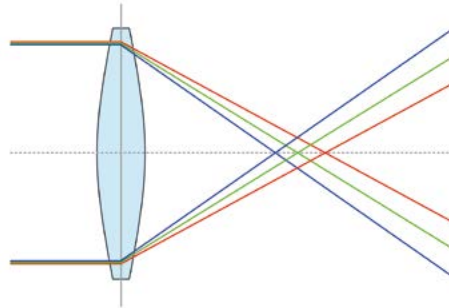


Fig. 12 La differente messa a fuoco per i vari colori e conseguente proprio al diverso indice di rifrazione delle varie lunghezze d'onda dello spettro.

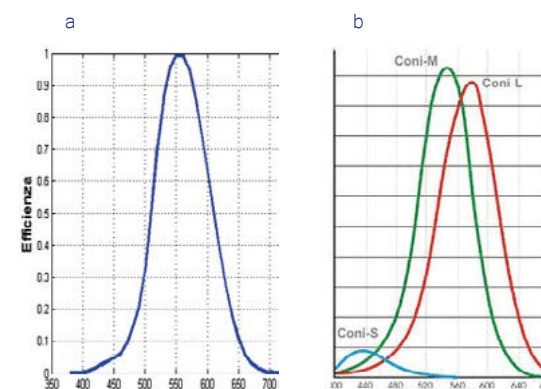
## CAPITOLO 2

### Il colore e la sua misurazione

Il colore, percepito dal nostro cervello come interpolazione degli stimoli trasportati dai coni attraverso il nervo ottico, abbisogna di un sistema di misura standard per poter uniformare i risultati e renderli confrontabili.

Se il nostro occhi è formato da tre tipi differenti di coni (nominati con le sigle S,M,L) aventi picchi di sensibilità alle frequenze corte (short, S), medie (medium, M) e lunghe (long, L) dello spettro visibile, per la precisione a 437nm, 533nm e 564nm. I bastoncelli, molto più sensibili alla luce e quindi in grado di operare anche in situazioni di scarsa luminosità, sono sensibili unicamente alla frequenze attorno ai 498nm ovvero quelle del verde. Si differenzi infatti la visione umana in visione fotopica (monocromatica, influente in scarsa luce) e quella scotopica, a colori ma richiedente maggiore illuminazione. Proprio per questo motivo al buio la nostra percezione dei colori cala e conseguentemente la parvenza di saturazione. Anche nella visione scotopica la presenza dei coni non è equivalente tra i tre ed i coni sensibili maggiormente alle frequenze del blu sono presenti in quantità molto minore, rendendo il nostro occhio meno sensibile a tali frequenza. Sarà poi il nostro cervello a normalizzare gli stimoli e garantire la visione che ci è naturale.

Fig. 1 La differente sensibilità tra la visione fotopica (a) e scotopica (b), È anche visibile la differente sensibilità alle varie frequenze dovuta alla distribuzione e quantità dei coni. Le due curve non sono in scala ma mostrano i valori di efficienza relativa. se posti in scala la prima curva risulterebbe molto più sensibile delle altre tre.



Questa sensibilità al colore legata a tre differenti tipi di cono, porta alla definizione di tristimolo, ovvero della rappresentazione della sensibilità complessiva del nostro occhio al colore.

Al di fuori della sensibilità del nostro occhio, sottoponendo a vari test un grande numero di persone si è potuto tracciare uno schema medio della sensibilità umana, ovvero un grafico standard che sia la media delle singole differenze tra i vari esseri umani (fig. 1). Tale definizione è fondamentale per poter parlare di colorimetria, ovvero di identificazione del colore.

Ottenuta la sensibilità media dell'occhio umano ne si è simulata la resa negli strumenti di misurazione del colore, ovviando al problema della scarsa sensibilità ai blu, identificando il cosiddetto osservatore standard, ovvero un grafico con tre funzioni rappresentanti gli stimoli legati ad una percezione della luce come neutra, ovvero un grafico come in fig. 2.

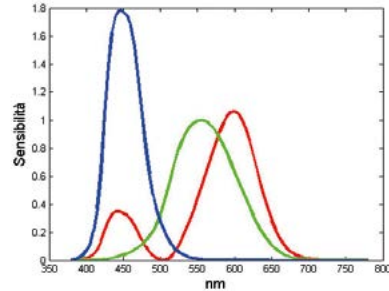


Fig. 2 Color matching function CIE31

Determinato il concetto di osservatore standard, bisogna procedere con l'identificazione delle fonti di luce che andranno a illuminare una superficie e quindi si sono misurate le emissioni di vari corpi radianti, identificati ognuno da un grafico di emissione, in grado di indicare non tanto il colore della luce quanto la distribuzione spettrale di ogni lampada, ovvero quanta energia viene emessa per ogni singola lunghezza d'onda dello spettro.

Partendo dal concetto di corpo neutro radiante, ovvero di un corpo con coefficiente di emissività 1 (il concetto sarà approfondito nel capitolo sulla termografia), ne si misura l'emissione spettrale all'aumentare della temperatura. Raggiunti i circa 2000K tale corpo comincerà ad emettere frequenze nello spettro del visibile. Per standardizzare le misurazioni sono stati presi alcuni valori di emissione da utilizzare come riferimento, andando ad identificare gli illuminanti standard, codificati da una sigla composta da una lettera ed un numero. Il più comune e conosciuto è proprio il D65, ovvero un illuminante simile alla luce di mezzogiorno, del quale si può vedere il grafico in fig. 3.

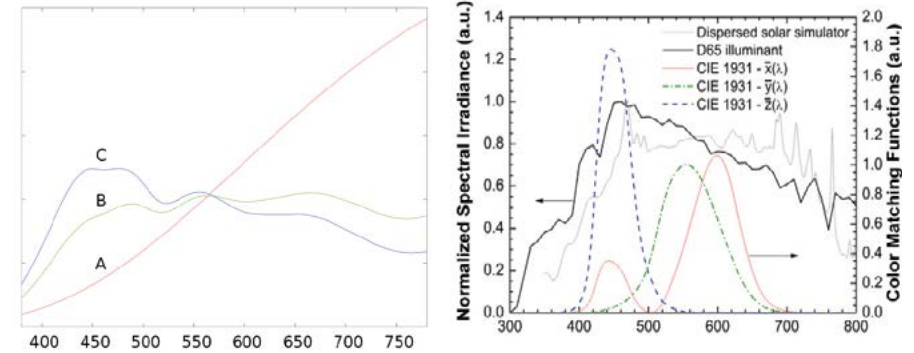


Fig. 3 Grafico di emissione degli illuminanti standard A, B e C, ormai obsoleti ed il più moderno D65, nel grafico a destra, assieme alle funzioni del tristimolo x, y, z.

Determinati questi due standard la definizione del colore ora dipende unicamente dalle caratteristiche dell'oggetto osservato, ovvero dalla sua risposta alla luce che lo colpisce.

In questo caso la risposta può essere rappresentata da tre valori x, y, z oppure, per comprendere più a fondo la tipologia di un materiale da una curva misurata da uno spettrofotometro.

Lo spettrofotometro è uno strumento formato da un sensore con sensibilità standard (in base al concetto di osservatore standard) un illuminante determinato (solitamente il D65) ed un monocromatore.

Tale strumento, evoluzione di un prisma di cristallo, ha lo scopo di scomporre lo spettro prodotto dall'illuminante, inviarne una frequenza alla volta sul soggetto, in modo che il sensore possa misurarne, per ogni frazione di spettro, la percentuale di luce riflessa.

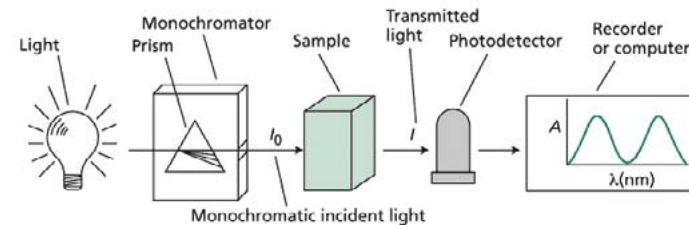


Fig. 4 Un termocolorimetro a luce trasmessa, diverso nella misurazione rispetto allo strumento da noi utilizzato ma identico nel sistema di selezione della luce.

In questo modo è possibile ottenere le curve di riflettanza di ogni superficie, identificandole anche quando possano avere apparenza simile ad occhio nudo.

In classe sono state fatte le misurazioni di alcuni pigmenti coprenti sintetici e di alcune patch da misurazione di pigmenti pittorici storici.

Il grafico risultante ha come ascissa la lunghezza d'onda e per ordinata il valore percentuale di riflettanza. Il nostro macchinario ha misurato bande di 10nm di spettro, risultando più che soddisfacente per tracciare i grafici seguenti. La maggiore precisione degli altri strumenti, risulta particolarmente utile quando, all'interno di un'unità minima di misurazione ci sono picchi e valli molto estesi, altrimenti resi come valori medi (fig. 6).

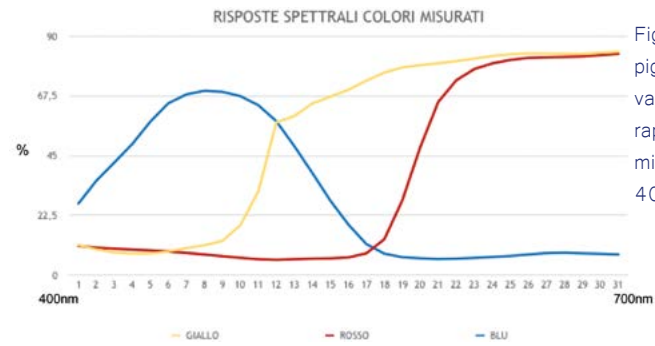


Fig. 5 Grafico di tre dei pigmenti da noi misurati. I valori sull'asse delle ascisse rappresentano gli intervalli di misurazione. 1 rappresenta i 400nm, 31 i 700nm.

La combinazione di questi due valori standard e delle caratteristiche del materiale ci permetterà quindi di identificare un colore con delle coordinate matematiche e quindi determinarne un valore universalmente riconoscibile e riproducibile, coordinate che dipenderanno dal sistema colorimetrico di riferimento.

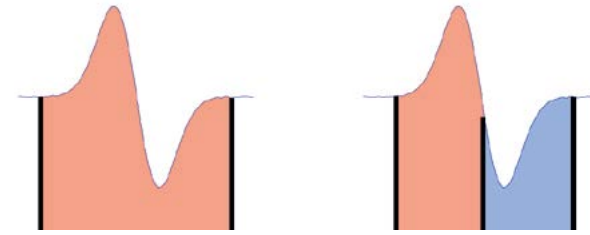
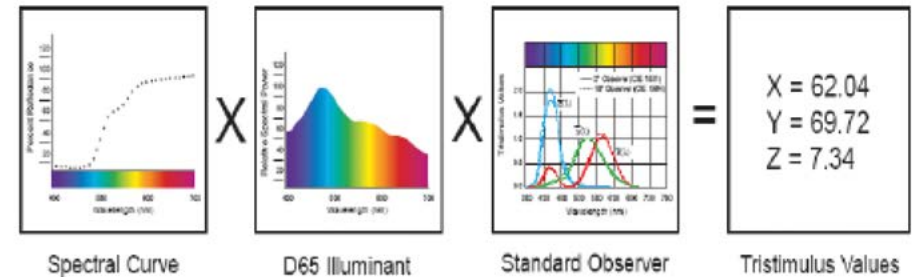


Fig. 6 Due misurazioni effettuate a diversa risoluzione. Nel caso di sinistra il valore ottenuto sarebbe del tutto equivalente ad un settore piano della curva, solo con una misurazione più precisa, i picchi vengono osservati.



Nella ricerca di un metodo per la rappresentazione del colore, nel corso degli ultimi secoli sono stati ideati vari metodi in grado di assegnare ad ogni colore una codificazione standardizzata. Il primo sistema in ordine di tempo fu inventato da Albert Munsell e si basa su una rappresentazione tridimensionale dei vari colori identificandoli per tinta saturazione e luminosità (coordinata verticale, Y), in modo da creare un solido lungo il bordo del quale ci sia la massima saturazione possibile di una determinata tinta. Tale sistema, escludendo la variabile y, ovvero la luminosità (B, Brightness), può essere rappresentato come un cerchio dove sono individuabili unicamente i valori di croma (H, Hue) e saturazione (S, Saturation).

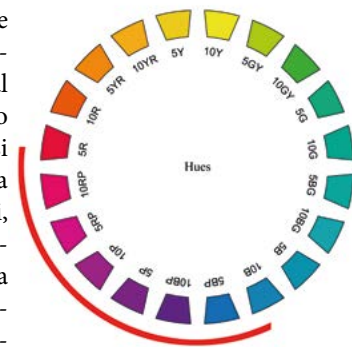
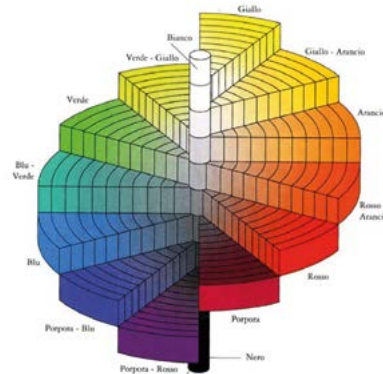


Fig. 7 In alto la rappresentazione tridimensionale del sistema Munsell, in basso sezione orizzontale. In rosso i valori dal rosso al blu, le cosiddette porpore.

Un sistema più moderno e tutt'ora in uso, seppur a seguito di alcune migliorie, è il sistema CIE XYZ, un sistema a tre coordinate x,y,z ognuna legata alla sensibilità spettrale di una componente del tristimolo. Tale sistema, escludendo la componente della luminosità viene rappresentato dal caratteristico ferro di cavallo inserito in un grafico cartesiano. Oltre a poter rappresentare qualsiasi colore mentre il sistema Munsell, comprendeva unicamente un numero determinato di colori, tale metodo rappresenta lungo la parte curva tutte le lunghezze d'onda della luce visibile, mentre la linea inferiore, formata da una combinazione delle frequenze agli estremi dello spettro, rappresenta così le porpore, ovvero i colori non aventi una lunghezza d'onda dominante propria, a differenza dei colori puri.

In questo grafico, tracciando una retta che tocchi il centro ed il luogo di collocazione di un colore dato, la sua intersezione con il perimetro ci indicherà la lunghezza d'onda dominante di tale punto.

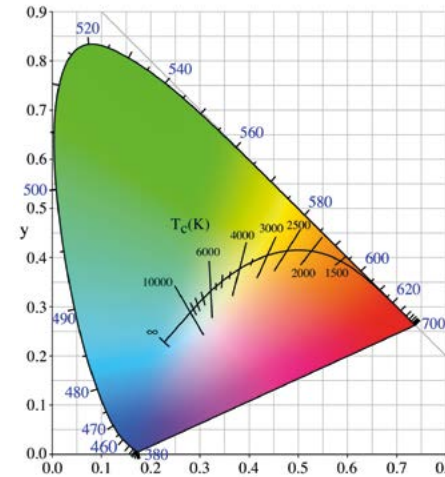


Fig. 8 CIE XYZ e curva di Planck.

La linea che si nota in figura rappresenta la curva di Planck ovvero la collocazione spaziale delle emissioni di un corpo nero riscaldato alle varie temperature, quindi il punto di bianco di ogni temperatura cromatica.

In questo sistema di misurazione  $X+Y+Z$ , ovvero i risultati delle tre funzioni  $x,y,z$  del tristimolo precedentemente trattato, hanno per risultato 1.

In questo modo dalle coordinate X ed Y sarà possibile ottenere anche quella di Z. L'inconveniente di tale sistema di rappresentazione sta nel fatto che valori di pari differenza cromatica, a causa della forma irregolare dello zoccolo e della particolare rappresentazione dei colori puri, appariranno come non equidistanti tra loro, a seconda di dove essi siano collocati sul piano.

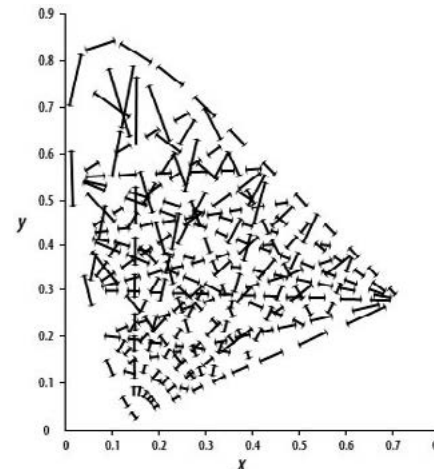


Fig. 9 Punti di uguale differenza cromatica, a seconda della loro collocazione, appaiono come più o meno distanti nel sistema CIE XYZ.

L'ultimo avanzamento nella rappresentazione dei colori è stato il modello CIE Lab, sviluppato a sfera, dove 3 coordinate rappresentano in questo caso i valori di tinta e saturazione contemporaneamente, lasciando alla terza coordinata la rappresentazione dei valori di luminosità. Tale sistema, introdotto come CIE-LAB1976, rappresenta uno dei sistemi ad oggi più diffusi per la definizione di un colore ed il metodo maggiormente utilizzato nel settore tecnico ed industriale.

Per quanto concerne i beni culturali invece, i valori CIE Lab sono utili per definire un colore e riprodurlo in egual maniera, mentre maggiori informazioni sono ottenibili dalla spettrofotometria in quanto, confrontando i risultati ottenuti con le banche dati in possesso a tecnici e ricercatori è possibile identificare non solo la parvenza del colore quanto i composti chimici che lo compongono.

Esempio su tutti la somiglianza tra azzurrite e blu oltremare, i quali, se misurati avrebbero valori Lab molto simili, se sottoposti a misurazioni spettrofotometriche rivelerebbero due spettri di riflessione completamente diversi, rendendo quindi facile l'identificazione.

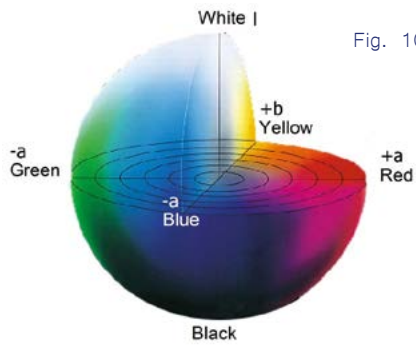


Fig. 10 Rappresentazione grafica del sistema CIE Lab

## CAPITOLO 3

### Filtri ed Illuminanti

Per controllare le radiazioni elettromagnetiche, all'operatore dei beni culturali sono permesse due strade: la selezione della fonte di radiazioni, e l'uso dei filtri.

Per modificare una radiazione elettromagnetica emessa da una qualsiasi fonte, è unicamente possibile porre sul suo tragitto uno o più filtri, ovvero delle barriere, solitamente in vetro o plastica, in grado di assorbire o riflettere una parte delle frequenze dello spettro e trasmetterne un'altra parte.

Idealmente un filtro dovrebbe poter bloccare (tagliare) tutte le frequenze da un determinato punto in poi, in realtà questo processo non è così netto ed il filtro andrà ad assorbire sempre maggiormente delle frequenze fino a farne passare una percentuale ininfluente.

Per rappresentare il funzionamento di un filtro infatti, si usano dei grafici nei quali sono rappresentati, sull'asse delle x e delle y, rispettivamente le lunghezze d'onda ed il relativo assorbimento (o trasmissione).

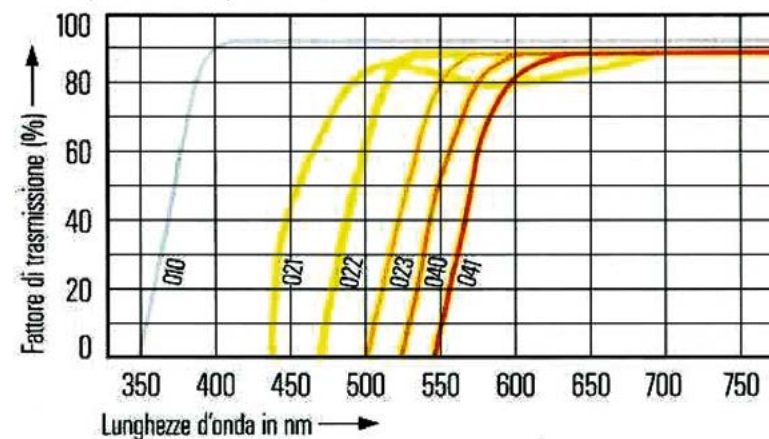


Fig. 1 Tabella con le curve di trasmissione di una serie di filtri B+W. Il primo filtro a sinistra è un comune filtro UV, Ormai utilizzato per proteggere le lenti, un tempo utile a tagliare frequenza invisibili ma registrate dalle pellicole e dai primi sensori CCD.



Ad esempio qui possiamo vedere il grafico di una serie di tipici filtri per la fotografia in bianco e nero, una serie di varie sfumature di giallo utilizzati per rendere con maggiore naturalezza il tono dei cieli.

Come si può vedere il filtro blocca una parte delle frequenze del blu, corrispondenti alle lunghezze d'onda più corte, poi lentamente si presenta meno assorbente fino ad essere quasi trasparente per le frequenze dal verde in poi.

Maggiore è la pendenza della curva, maggiore risulta la qualità del filtro in quanto la selezione delle frequenze tagliate e trasmesse risulta più rapida e con minori imprecisioni.

I filtri ovviamente possono essere posti sulle fonti di emissione oppure sugli strumenti di ricezione, solitamente la fotocamera, al pari di come già succede nella costruzione delle moderne reflex.

Per evitare che il sensore al silicio riceva sollecitazioni anche da frequenze al di fuori dello spettro visibile infatti al di sopra di esso sono posti solitamente due filtri uno per tagliare le radiazioni IR e quelle UV ed uno specializzato a tagliare le radiazioni infrarosse, in modo da accrescere l'effetto del primo, garantendo una sensibilità unicamente allo spettro visibile.

Per quanto riguarda invece le fonti di emissione, quelle che ci riguardano maggiormente sono le radiazioni prodotte dal sole e quelle prodotte dai più comuni sistemi artificiali.

Il sole presenta uno spettro continuo e molto vasto al di fuori dell'atmosfera, mentre al livello della superficie terrestre, buona parte delle radiazioni risultano disperse od assorbite. In particolare lo spettro visibile e quello dell'infrarosso sono abbastanza presenti, a differenza delle radiazioni ultraviolette (soprattutto UV-B ed UV-C) assorbite dall'atmosfera.

Le comuni lampade fotografiche hanno uno spettro di emissione molto più ridotto, le lampade ad incandescenza hanno praticamente una componente nulla di radiazioni ultraviolette, mentre emettono profondamente nell'infrarosso e le lampade flash solitamente hanno uno spettro ancora più ristretto nell'infrarosso, mantenendo una componente molto scarsa nell'UV (in particolare i bulbi flash professionali, schermati ulteriormente da una cupola in vetro UV-Cut).

Le lampade a scarica emettono luce tramite la sollecitazione di un gas attraversato appunto da una scarica elettrica (luminescenza diretta).

I tubi al neon (nome erroneo per i modelli tubolari di lampada fluorescente) invece sono formati da due elettrodi posti all'estremità del tubo che provvedono ad una scarica (alla bassa frequenza di 50Hz o ad alte frequenze, nell'ordine delle decine di kHz). All'interno del tubo, attraversato dalla scarica, vi è un gas a bassa pressione (in origine il neon appunto) il quale, ionizzato dalla grande differenza di potenziale sviluppata, emetterà radiazioni elettromagnetiche non visibili in grado di eccitare le polveri derivate del fosforo depositate sulla parete interna del tubo le quali, per fluorescenza appunto, emetteranno radiazioni nello spettro del visibile (luminescenza indiretta).

In ogni caso il funzionamento fisico è molto simile alle lampade a scarica e questo comporta che anche lo spettro di emissione sia simile, ovvero discontinuo.

Se la luce solare o quella delle lampade a filamento hanno dominanti di colore legate alla maggiore o minore emissione di lunghezze d'onda particolari, avremo ad esempio il caso della luce ad incandescenza (profondamente giallo-rossa) oppure quello della luce solare (tendente all'azzurro) ma in ogni caso l'emissione di una particolare banda di frequenza sarà ininterrotta, ovvero continua (tranne per minuscole interruzioni legate ai gas presenti nell'atmosfera solare ma per questo si rimanda a testi riguardanti l'astronomia).

Nel caso di lampade a scarica ed a fluorescenza invece l'eccitazione di particolari gas o dei fosfori posti sul tubo, produce emissioni unicamente in bande circoscritte dello spettro e spesso non contigue, generando quindi uno spettro simile al terzo della figura 2.

Nel caso di lampade a scarica a luce bianca infatti il colore bianco è dovuto all'effetto della somma delle varie frequenze e non da una reale presenza dei vari colori, creando quindi il problema del cosiddetto metamerismo di illuminante, ovvero la risposta differente di una determinata superficie colorata a due fonti luminose di pari temperatura colore ma di composizione spettrale differente

Diverso invece ad esempio il caso delle lampade al neon per radiazioni ultraviolette, dove le bande di emissione sono ravvicinate le une alle altre fino a formare una specie di spettro ridotto ma continuo, sebbene la transizione tra lunghezze d'onda differenti sia meno graduale.

Con grafici simili a questi si identificano anche gli spettri di emissione di altre fonti, come ad esempio l'infrarosso termico o le radiazioni X e Gamma, che qui verranno trattate solo marginalmente.

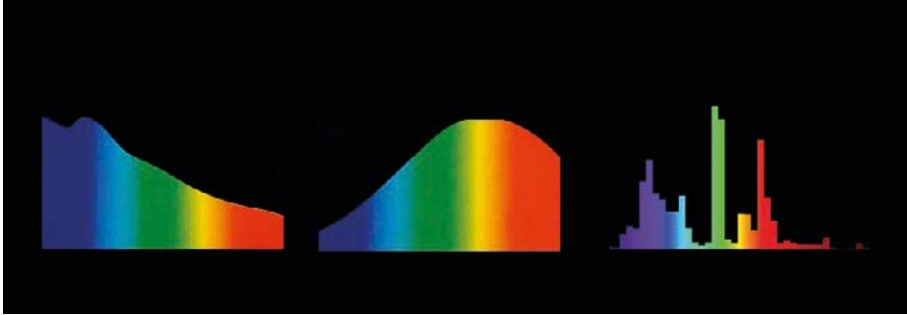


Fig. 2 3 spettri di emissione: luce solare verso mezzogiorno, lampada incandescente e lampada a tubo fluorescente.

## CAPITOLO 4

### Indagini in luce visibile

Per quanto concerne lo spettro della luce visibile, le indagini in questo campo sono quelle che richiedono minor strumentazione, una qualsiasi fotocamera reflex degli ultimi anni è perfettamente schermata dalle altre parti dello spettro e quindi può operare senza ulteriori modifiche.

Nel campo della luce visibile, oltre alle fotografie in luce diffusa in grado di dare la percezione completa dell'opera o delle sue parti, si procede alle indagini macrofotografiche, in grado di evidenziare la struttura superficiale dell'opera. Nel caso di opere pittoriche su tavola o tessuto la prima evidenza sarà il cretto e l'eventuale distacco di parti di pellicola pittorica.

Per attuare le indagini macrofotografiche, l'unica avvertenza è quella di utilizzare ottiche adatte o lenti addizionali in grado di permettere un maggiore fattore d'ingrandimento pur ricordando che qualsiasi aumento dell'ingrandimento, comporta una conseguente e proporzionale perdita di luce, obbligando esposizioni più lunghe o maggiore potenza da parte delle lampade.

La luce diffusa permette di avere quindi dati precisi sul colore delle superfici, evitando ombre marcate e quindi le conseguenti aree di difficile lettura.



Fig. 1 Immagine macrofotografica, il dettaglio della superficie pittorica è perfettamente evidenziato in tutti i suoi dettagli.

Andando invece a posizionare le luci ad un angolo più stretto rispetto all'opera andremo a creare una luce radente che genera ombre marcate e molto lunghe, in misura maggiore con il diminuire l'angolo di incidenza, fino ad arrivare ad una quasi impossibile lettura dell'opera in caso di gradi prossimi allo 0.

Solitamente si utilizzano quindi luci posizionate a 10-15 gradi rispetto all'opera in modo da evidenziare con precisione tutte le difformità della superficie.

Per ottenere questo genere di immagini le uniche accortezze da tenere sono quelle di posizionare le luci ad una buona distanza dall'opera in modo da evitare vistose cadute di luce dovute all'aumentare della distanza dalla fonte di irraggiamento e quella di ma-

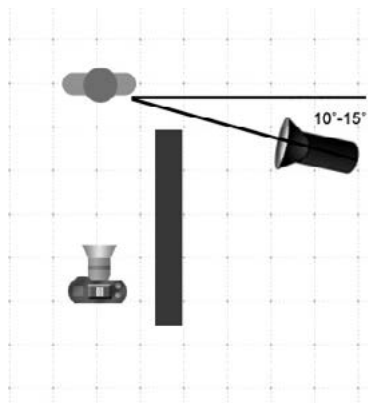
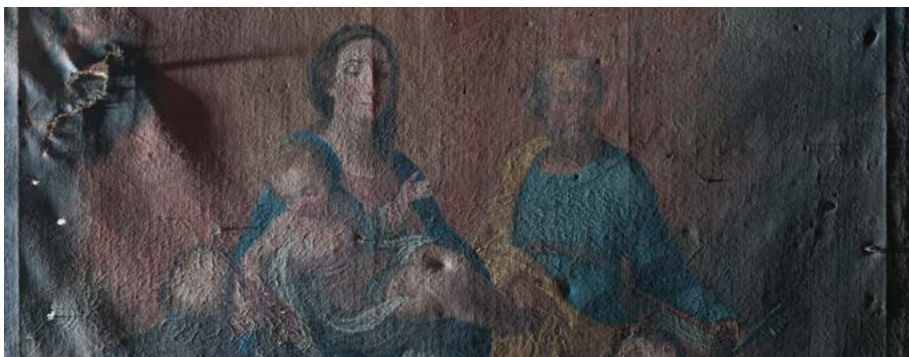


Fig. 2 Schema posizionamento luci di una tipica illuminazione radente.

Fig. 3 Dettaglio di una superficie lapidea in luce radente, le porosità della pietra sono perfettamente evidenziate, perdendo la leggibilità complessiva dell'opera.

Fig. 4 Dettaglio di una superficie pittorica in luce radente. Per quanto vada a perdersi la percezione complessiva, sono identificabili le aree dove la tela presenta allentamenti legati, probabilmente, a modificazioni del telaio.



scherare con precisione la luce che va a colpire l'opera in quanto, qualora la luce non diretta sull'opera venisse riflessa da altre superfici, creerebbe una luce diffusa in grado di ammorbidire le ombre e modificare la lettura dell'opera.



Fig. 5 Luce radente schermata inopportuna, riflessione della luce sui muri dello studio e conseguente schiarimento delle ombre.



Fig. 6 Luce radente troppo vicina al soggetto, caduta di luce eccessiva.

L'ultima indagine in luce visibile esposta in questo libro è la transilluminazione che, qualora svolta con luce infrarossa, prenderà il nome di transirradianza, non potendo appunto parlare di luce ed illuminazione qualora si esca dallo spettro delle radiazioni visibili. In questo caso la fonte di radiazioni dovrà essere posta sul retro dell'opera e sarà efficace quasi unicamente in casi di opere cartacee o tessili, dove cioè la luce possa attraversare facilmente la superficie.

In questo caso l'immagine che otterremo non avrà alcuna illuminazione della superficie pittorica e quindi non saranno riconoscibili i dettagli, salvo il caso di illuminazioni parassite provenienti da davanti l'opera. Sia avrà quindi una mappatura delle zone più o meno trasparenti alla luce, quindi le zone di indebolimento del supporto ed il cretto. Non meno importante risulta invece essere la trasparenza alla luce dovuta al colore ed allo spessore dello strato pittorico, se i colori scuri tendono per loro natura ad assorbire molta luce e contemporaneamente essere opachi all'attraversamento, un ruolo molto importante è dato allo spessore delle stesure, quindi saranno individuabili zone con maggiori stesure di colore, la corporeità della pennellata quando questa sia molto marcata oppure le zone soggette a ridipinture e restauri.

Per tutte queste analisi durante il corso sono state utilizzate lampade alogene, ovvero lampade a filamento riempite di gas appartenenti al gruppo degli alogenuri, in grado

di permettere una maggior temperatura al filamento, con conseguente maggior potenza luminosa ed uno spettro spostato verso i toni più freddi rispetto alla luce molto calda delle lampade ad incandescenza normali.

Per ognuna di queste tecniche sarebbe comunque stato possibile utilizzare la luce flash con la stessa praticità, tranne nell'ultimo caso dove, qualora lo il volume di tela, preparazione e strato pittorico sia molto spesso, la luce flash richiesta sarebbe molto alta. In questi casi, lavorando nel buio più completo si possono far scattare più volte le lampade flash, fino ad ottenere il livello di illuminazione richiesto.



Fig. 7 Esempio di immagine dovuta alla transilluminazione, sono evidenziate le fessurazioni della pellicola pittorica e vengono rese in toni più o meno chiari, le zone di maggiore e minore stesura della pellicola pittorica.

## CAPITOLO 5

### Immagini derivate da radiazione infrarossa

Come scritto precedentemente, si intende radiazione infrarossa, tutta quella serie di emissioni aventi una lunghezza d'onda maggiore del visibile, quindi superiore a 700nm fino ad arrivare a lunghezze d'onda nell'ordine dei millimetri.

All'interno di questo ampio spettro le onde hanno proprietà differenti e ci permettono una prima diversificazione tra quanto è chiamato infrarosso termico (dai 3000nm in su). L'infrarosso lontano (o accettando ulteriori distinzioni lo si può suddividere tra IR lontano ed IR estremo oltre i 15000nm) ovvero quelle radiazioni in grado di trasportare pochissima energia, emesse da qualsiasi corpo avente una temperatura superiore a 0 gradi Fahrenheit.

Nel campo della diagnostica ciò ha una grossa importanza per quanto riguarda i rilevamenti della forma delle strutture, la termografia appunto sfrutta l'infrarosso lontano per ottenere immagini in scala di grigi (oppure in falsi colori) in grado di mappare la temperatura della tessitura muraria, legata, se sottoposta ad un più o meno artificiale ma controllato cambio di temperatura) ai materiali costruttivi ed alla loro umidità interna. In particolare zone riempite in un secondo momento, resti di strutture architettoniche modificate nel tempo od aree sottoposte a stress eccessivi sono i soggetti più semplici di tali misurazioni.



Fig. 1 Spettro IR esteso.

TERMOGRAFIA

Come trattato precedentemente, un corpo nero ideale emette radiazioni con uno spettro via via più ampio con l'aumentare della temperatura ed il picco massimo di emissione si ha ad una determinata lunghezza d'onda proporzionale alla sua temperatura. Superata la temperatura dei circa 2800K parte della radiazione emessa comprende le radiazioni del visibile, sotto tale temperatura invece le radiazioni sono unicamente nell'infrarosso, a lunghezze d'onda sempre maggiori più la temperatura è bassa. Ad esempio un corpo ad una temperatura di 300K ha il picco di emissione attorno ai 10000nm (10 micron), e a temperature ancora più basse tali radiazioni avranno ancora minore frequenza fino agli 0K o zero assoluto (valore ideale), dove la completa staticità della materia corrisponde alla totale assenza di emissione.

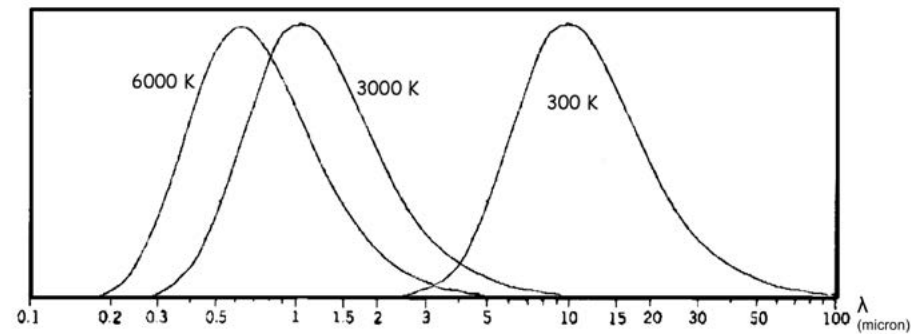


Fig. 2 Spettri di emissione di un corpo ideale a diverse temperature. Il grafico non ha una scala sull'asse delle y in quanto rappresenta una serie di curve normalizzate, portate ad avere lo stesso valore di y nel picco quando, in un grafico in scala, il picco dei 300K sarebbe molto più basso del 3000K, più basso ancora rispetto ai 6000K ecc, in quanto la quantità di radiazione emessa (area sottesa alla curva) è proporzionale alla temperatura.

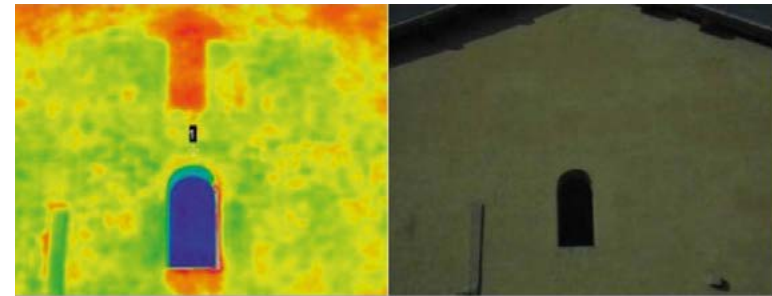


Fig. 3 In questo caso, la differente dispersione termica evidenzia la presenza di un'apertura tamponata ed ora coperta dalle malte.



Fig. 4 Nel caso di immagini termografiche di interni, oltre allo studio degli, eventuali, distacchi, la tessitura muraria sottostante gli intonaci è uno dei dati di maggior rilievo che si possa ottenere.

Secondo la legge di Stefan-Boltzmann, l'energia emessa dai corpi è proporzionale alla loro temperatura elevata alla quarta potenza, quindi anche piccoli aumenti di temperatura generano un importante aumento della radiazione, essendo la lunghezza d'onda a sua volta direttamente proporzionale alla temperatura, è quindi possibile riconoscere anche lievi differenze di temperatura attraverso le riprese termografiche.

$$E = \epsilon \sigma T^4$$

Nella termografia non viene ripresa la radiazione riflessa dai soggetti colpiti da un

illuminate, quanto la radiazione propria emessa dal corpo, il quale diventa un vero e proprio elemento radiante. Tali riprese devono quindi essere effettuate escludendo le fonti di emissione, nel caso delle architetture quindi, unicamente quando il sole non colpisce più la superficie e l'unico segnale ripreso è quello emesso dai materiali precedentemente riscaldati.

Nello stesso modo si opera negli interni, quando si attua un riscaldamento forzato della struttura (stufe o lampade infrarosse solitamente) per poi spegnere gli elementi radianti, riprendendo unicamente la progressione di emissione del corpo precedentemente riscaldato.

Ne consegue che, in particolare negli esterni, il riscaldamento non uniforme (ad esempio per le ombre portate dal sole), l'analisi dei dati deve avvenire tenendo conto del non uniforme riscaldamento.

Se a livello teorico la radiazione emessa da un corpo idealmente nero è legata ad un valore di  $\epsilon$  (costante di emissività)=1, tale valore in natura varia a seconda del materiale e della sua struttura superficiale, sempre compreso tra 0 ed 1 e rappresenta quindi la somiglianza di emissione rispetto ad un corpo nero.

Conoscendo i valori medi di tale costante per ogni materiale è quindi possibile individuarli in una ripresa termografica (qualora in riscaldamento sia stato uniforme) oppure identificarne le anomalie occorrenti.

La termografia ha quindi il vantaggio di essere una tecnica di analisi non distruttiva non a contatto, in grado di rilevare anomalie su aree altrimenti difficilmente raggiungibili o subsuperficiali, in alcuni casi non sondabili altrimenti.

Per riprendere questo spettro vengono utilizzate termocamere dotate di obiettivi con lenti in germanio, opache alla luce e trasparenti alle radiazioni infrarosse, in quanto vetro e quarzo risultano opachi alle lunghezze d'onda superiori ai 2-3 micron, con grafici differenti a seconda del tipo di vetro e del suo spessore.

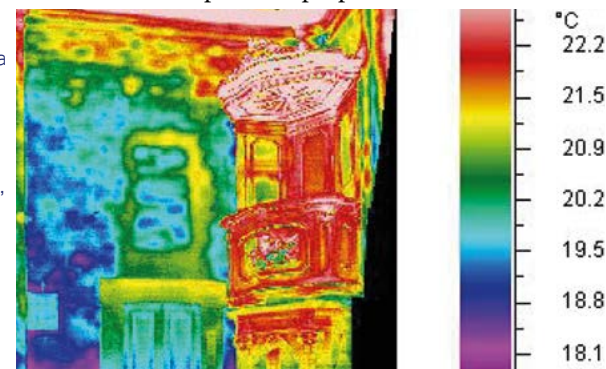
In architettura la termografia può essere utilizzata per riconoscere l'impiego di differenti tessiture murarie ed i restauri, in quanto, al di sotto di malte ed intonaci, differenti materiali costruttivi emettono diversamente, al pari di come sono riconoscibili vari elementi architettonici strutturali, pilastri ed archi poi coperti.

Nello studio dei distacchi invece, nel caso delle malte, degli affreschi, dei mosaici o di qualsiasi struttura che dovrebbe essere coesa alla muratura, l'intercapedine d'aria che si forma qualora si presenti una mancata adesione comporta (essendo l'aria un cattivo conduttore termico) che la superficie esterna non abbia scambi termici con la base, si

riscalerà più rapidamente e si raffredderà altrettanto velocemente rendendosi rapidamente identificabili. Per lo stesso principio, durante le operazioni di consolidamento, qualora si operi con l'inserimento di schiume termoconduttrici, sarà possibile documentare l'avanzamento dei lavori e capire se alcune aree non siano state correttamente sottoposte alla riadesione.

Oltre al coefficiente di emissività è anche la temperatura propria del materiale ad in-

Fig. 5 In questo caso la parete uniforme al di sopra della porta rivela una tamponatura con stipiti ed architrave lapideo (emissione molto simile all'architrave visibile sottostante), al pari la cantoria risulta avere un'emissività maggiore rispetto al muro (circa 0,8), possiamo ipotizzare sia legno (circa 0,93).



fluenzare la resa delle termografie e, come a parità di temperatura e differenti  $\epsilon$  la resa sarà sfalsata e non uniforme, al pari uguali coefficienti e differenti temperature mostrano una differente resa.

Ad esempio il processo di evaporazione dell'acqua contenuta in un materiale igroscopico comporta un raffreddamento dello stesso e quindi, nella ripresa, le aree umide di un elemento architettonico sottoposto prima a irraggiamento e riscaldamento e successivamente ad un raffreddamento risulteranno differenti nella resa.

Il processo evaporativo è un fenomeno superficiale e non interno alla struttura e come tale è una delle varie cause del degrado. Sia nel caso di infiltrazioni, sia quando è presente umidità di risalita, l'evaporazione può minare la coesione delle malte o portare in superficie i sali causando le efflorescenze che spesso si possono vedere nelle parti basse delle murature.

Anche in questo caso le termografie possono indicare le aree soggette ad infiltrazioni o risalite e, qualora si attui un restauro, se le operazioni sono state svolte con successo. In ultima analisi, seppur meno interessante ai fini della diagnostica per i beni culturali, le termografie vengono utilizzate per verificare la coibentazione termica degli edifici



e la struttura dei sistemi di riscaldamento, come per identificare eventuali perdite dei sistemi idraulici.

Non trattando estesamente la questione in questo testo, si vuole unicamente sottolineare un'applicazione relativamente recente, legata a termovideocamere con un frame rate molto elevato.

In base all'assunto che le zone nelle quali siano presenti intercapedini di aria siano sottoposte ad un cambio più rapido di temperatura, la termofotografia è stata utilizzata per riconoscere le aree distaccate delle dorature nei capiletera miniati. In particolare questi vengono sottoposti ad una minima variazione di temperatura tramite il lampo di una flash lamp, non in grado di danneggiare l'opera, filmandone la resa. Un frame rate di qualche centinaio di fotogrammi al secondo evidenzia quindi, nell'analisi rallentata, le aree sottoposte a riscaldamento e raffreddamento più veloci rispetto al resto della scena, indici quindi di aree dove è andata persa la coerenza tra il supporto cartaceo e la doratura.

Il concetto qui elencato, seppur in maniera estremamente riduttiva, è lo stesso applicato anche per analizzare il distacco delle malte degli affreschi.

Per tutte le analisi qui elencate vengono utilizzate termocamere dotate di obiettivi con lenti in germanio, opache alla luce e trasparenti alle radiazioni infrarosse, in quanto vetro e quarzo, risultano opachi alle lunghezze d'onda superiori ai 2-3 micron, con grafici di trasmissione differenti a seconda del tipo di vetro e del suo spessore.

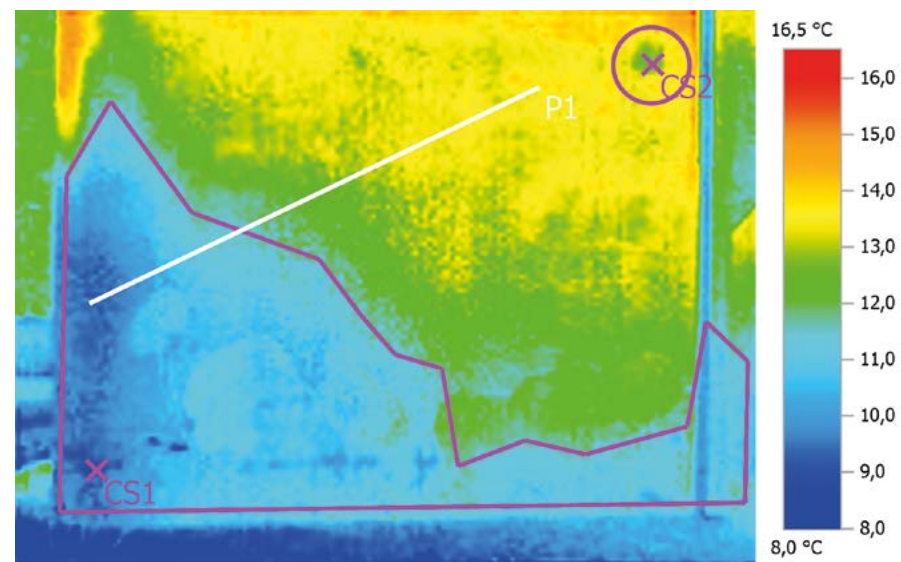


Fig. 6 Evidenziata dal bordo viola, l'umidità di risalita di una sezione di muro.

## RIFLETTOGRAFIA

Al di sotto delle lunghezze d'onda così grandi, dai 3000 nm andiamo ad identificare il cosiddetto infrarosso medio. Queste lunghezze d'onda tendono ad essere assorbite in maniera minore dai materiali ed in molti casi, sono in grado di attraversare a profondità variabile lo strato pittorico.

Al di sotto ancora si trova quella parte dello spettro definita infrarosso vicino che possiamo determinare come le frequenze che vanno da subito dopo le frequenze del rosso a circa i 3000nm. In questo spettro si situa buona parte della ricerca dell'imaging in quanto il compromesso tra risoluzione dei sensori e profondità di penetrazione risulta essere tra i più proficui.

Al pari di come una materia riflette in maniera differente le varie lunghezze d'onda della luce, similmente varia la risposta alle frequenze dell'infrarosso, qualora non risultino ad esse trasparenti. In particolare le preparazioni a base di piombo come la biacca sono altamente riflettenti a tutte le frequenze dell'infrarosso, mentre non lo sono i derivati del carbonio come la grafite ed il carboncino. La sanguigna invece risulta totalmente trasparente a queste frequenze. Si capisce quindi come le riprese effettuate in questa porzione di infrarossi possano facilmente attraversare buona parte dello strato pittorico, rivelando invece la preparazione ed eventuali disegni preparatori.

Per effettuare questo genere di riprese vengono utilizzate fotocamere dotate di un sensore differente rispetto al comune silicio. In particolare vengono utilizzati i sensori InGaAs (Arseniuro di Indio e Gallio) sensibili fino a lunghezze d'onda attorno ai 2500 nm o più. Il problema insito in tali sensori è la scarsissima risoluzione spaziale che porta solitamente alla creazione di sensori puntiformi, lineari, o, recentemente e grazie agli sviluppi della tecnica, piccole matrici che non raggiungono il megapixel, richiedendo quindi una mosaicatura della superficie, procedura lenta e complessa, in particolare per la movimentazione delle apparecchiature.

In particolare, gli scanner appositi movimentano un piccolo sensore attraverso il movimento di due assi tra loro ortogonali fino a coprire superfici nell'ordine di qualche metro quadrato, impiegando



Fig. 7 Uno scanner per le acquisizioni riflettografiche.

Fig. 8 La riflessione 'assorbimento di molti pigmenti alle lunghezze d'onda superiori i 1400nm è praticamente nulla ed essi appaiono trasparenti, il carboncino del disegno preparatorio (molto assorbente) risulta nero, mentre la risposta molto chiara spesso è quella della preparazione. Analisi di questo genere risultano quindi estremamente utili a riconoscere i disegni preparatori (non nel caso della sanguigna che non appare a causa della sua trasparenza) mentre i pentimenti legati alla fase di pittura, possono sparire, risultando più distinguibili a lunghezze d'onda inferiori.



lassi di tempo molto elevati e dimostrandosi poco trasportabili.

Ad oggi tali scanner sono muniti anche di tre sensori per i canali di R, G e B, in modo da ottenere contemporaneamente immagini nello spettro del visibile, per il confronto e per il falso colore.

Scendendo sotto i circa 1800nm, gli InGaAs e gli altri sensori riescono ad avere una risoluzione decisamente superiore ed ingombri minori, permettendo indagini in loco.

Ancora al di sotto di tali lunghezze d'onda, dai 700 ai 1000-1100 nm, adiacente allo spettro visibile, troviamo quella parte di infrarosso al quale sono sensibili i sensori al silicio delle fotocamere digitali e, prima di loro, le pellicole appositamente sensibilizzate. Conviene a questo punto fare una distinzione di comodo all'interno delle frequenze dai 700 ai 3000nm (IR riflettografico) in quanto il grande sviluppo di metodologie diagnostici in questa porzione di spettro ha portato ad una massiccia differenziazione

di macchinari ed approcci.

-NIR Near infrared	700-1000/1100nm estensione della sensibilità del silicio
-MIR Medium Infrared	1000-1800nm matrici a buona risoluzione, attraversamento della materia ben superiore al nir, attraversamento di quasi tutti i pigmenti
-FIR Far Infrared	1800-3000nm matrici puntiformi, scansione infrarossa, opacità alle radiazioni di solamente alcuni composti.

Proprio per evitare che in situazioni normali le radiazioni infrarosse ed ultraviolette alle quali sono sensibili i sensori vadano ad influenzare il risultato finale, davanti ai sensori sono posti due filtri in grado di escludere tali frequenze.

Nella maggioranza dei casi bisogna operare tramite la rimozione meccanica dei filtri, permettendo quindi alla fotocamera di registrare lo spettro compreso circa tra i 300 ed i 1100nm, con variazioni a seconda dei modelli. In altri casi invece, in particolare alcune fotocamere datate, ad esempio le Sony DSC-F828 e DSC-717, dispongono di un sistema meccanico atto a spostare il filtro IR-cut per migliorare la resa delle fotografie notturne. Questa caratteristica permette quindi di acquisire immagini dello spettro visibile e di quello infrarosso con la stessa fotocamera in breve tempo. In questo caso la risoluzione dell'acquisizione non risulta essere un problema, mentre si riduce sensibilmente la profondità di penetrazione.

Di seguito analizzeremo la tecnica tramite la quale sono state ottenute le immagini in scala di grigi legate alla sola radiazione infrarossa e le cosiddetti immagini in falso colore.

Per l'illuminazione delle opere da riprendere nello spettro dell'IR solitamente si utilizzano lampade ad incandescenza in quanto risultano essere la fonte di infrarossi più semplice ed abbondante, anche se, soprattutto per le lunghezze d'onda inferiori ai 1000nm, anche l'emissione delle lampade flash risulta essere spesso sufficiente.

Utilizzare sensori ai quali è stato asportato il filtro apposto in fabbrica, richiede la massima attenzione nella filtratura della luce in ingresso, in quanto il silicio risulta sensibile, anche se debolmente alla radiazione ultravioletta. Per ottenere immagini affidabili è quindi d'obbligo selezionare le radiazioni che raggiungono il sensore tramite l'uso di

filtri apposti, solitamente, davanti alla lente frontale.

In particolare, per le immagini del NIR si è soliti procedere con una serie di scatti differenti a varie lunghezze d'onda, sostituendo i filtri, in modo da poter confrontare la risposta dei pigmenti a varie frequenze.

Nell'uso di lampade ad incandescenza o lampade flash in grado di contenere le emissioni nello spettro UV solitamente si può evitare l'uso di filtri UV-cut, altrimenti è consigliabile l'uso di filtri skylight, ponendo attenzione che la loro curva di assorbimento non blocchi anche una parte dello spettro IR.

Per quanto concerne i filtri IR invece ve ne sono di varie marche e modelli, qui verranno utilizzate le nomenclature Kodak in quanto sono state, per anni, riferimento internazionale. I filtri Hoya invece sono forniti di un preciso catalogo relativamente aggiornato sulle curve di trasmissione. Diversa la questione per molte altre marche di filtri dei quali è molto difficile, se non impossibile, trovare le loro curve caratteristiche e quindi, oltre alla descrizione fornita dal produttore, non possiamo controllarne la trasmittanza.

I filtri utilizzati in questo studio sono stati i 720nm, 760nm, 850nm e 1000nm; ponendoli a turno davanti l'obiettivo si è in grado di ottenere un buon quantitativo di materiale da confrontare con le immagini riprese nello spettro del visibile per poter identificare pentimenti e ridipinture nonché, in alcuni casi, il disegno preparatorio.

Per utilizzare la stessa fotocamera anche per riprendere la scena nello spettro del visibile è stato invece utilizzato un filtro Hoya 486 dalla particolare curva di trasmittanza qui sotto, in grado di sopperire a quasi tutto il lavoro svolto in origine dai filtri IR-cut posti sul sensore.

Infine si deve ricordare come ogni lunghezza d'onda venga messa a fuoco su un piano leggermente diverso, all'interno dello spettro 400-700nm tale differenza risulta essere molto poco percepibile (in buona misura grazie allo sviluppo delle lenti a- ed apocromatiche) mentre la questione cambia spostandosi al di fuori di questo range. Un'immagine ripresa con un filtro 720 risulterà avere un piano di messa a fuoco differente rispetto alla stessa scena ripresa nel visibile, richiedendo quindi una correzione del fuoco. Per tale motivo, ad oggi, sono largamente utilizzati i live view delle macchine fotografiche in quanto, mentre dall'oculare la scena inquadrata risulterà perfettamente nera, dall'immagine catturata dal sensore il soggetto sarà perfettamente riconoscibile e quindi foceggiabile manualmente con precisione.

Ultima accortezza da tenere a mente nell'acquisizione di immagini infrarosse con reflex

ad ottica intercambiabile è come il trattamento antiriflesso proprio delle lenti può in molti casi creare, in particolare a diaframmi molto chiusi e lunghezze d'onda elevate, uno sgradevole alone chiaro al centro dell'immagine. A tal proposito conviene quindi testare e controllare le specifiche tecniche delle lenti che si andranno ad utilizzare per la campagna fotografica

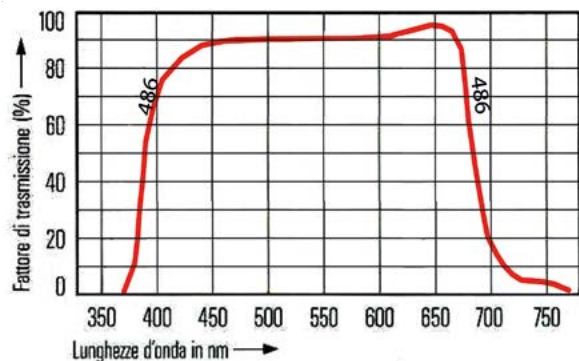


Fig. 9 Curva di trasmissione del filtro IR-UV Cut marca B+W.



Fig. 10 Indicazione della corretta messa a fuoco nelle immagini riflettografiche, la doppia indicazione riguarda la correzione a 24 ed a 35 millimetri di lunghezza focale.

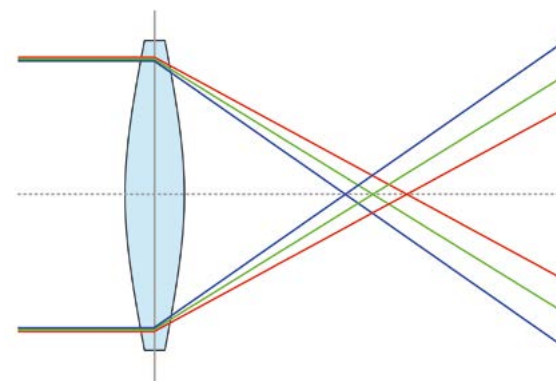


Fig. 11 Come accade nel visibile e viene corretto dalle ottiche a- ed apo- cromatiche, nell'infrarosso, la mancanza di tale trattamento porta l'immagine a formarsi su un altro piano.



Fig. 12 In alcuni casi addirittura il trattamento delle lenti ottimizzate per lo spettro visibile, crea aloni nel centro del fotogramma, via via più intensi con la chiusura del diaframma.



Fig. 13 (pagina seguente) Come appaiono, prima della corretta elaborazione quattro riprese riflettografiche ottenute tramite l'uso di filtri da 720nm, 760nm, 850nm ed 950nm.

## FALSO COLORE

L'acquisizione di immagini in infrarosso falso colore è una tecnica ampiamente sviluppata nella seconda metà del '900 grazie alle pellicole invertibili Kodak Aerochrome Infrared Aero Film Type 2443 (e modelli seguenti), in grado di registrare lo spettro fino a circa i 900nm ma costruite con una struttura tale che i tre strati dell'emulsione siano sensibilizzati, invece che ai normali rosso verde e blu, anche all'IR, e non esclusivamente a quest'ultima radiazione come le classiche pellicole bianconero. Tutti e tre gli strati mantenevano buona sensibilità al blu e quindi veniva richiesto l'uso di filtri gialli (Kodak 11 e Kodak 12) davanti alle lenti.

Il risultato ottenuto era quello di un'immagine con colori sfalsati dove le aree altamente riflettenti l'IR venivano rese con una forte dominante rossa.

Con l'avvento della fotografia digitale e la progressiva riduzione nella produzione di tali pellicole (fino alla completa uscita di produzione nel 2007) questa tecnica è stata replicata in digitale a causa della sua comodità d'uso e dell'ampia diffusione che la fecero diventare uno standard nel campo della diagnostica. Il procedimento alla base di tale forma di imaging si basa sugli stessi presupposti delle pellicole, ovvero creare un'immagine con tre canali rappresentanti gli spettri del verde, del rosso e del vicino infrarosso.

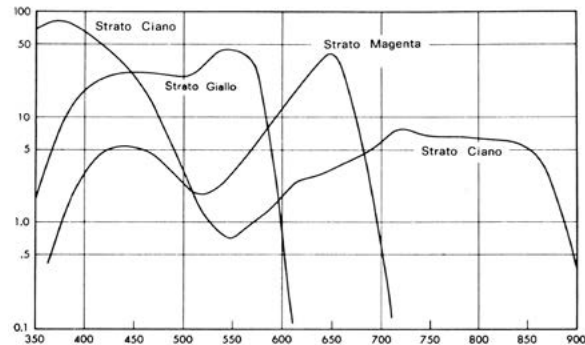


Fig. 14 Sensibilità spettrale di una pellicola Kodak Aero 8443, da notare come tutti gli strati siano sensibilizzati alle frequenze del blu.

Per ottenere questi risultati la procedura richiede l'acquisizione di due immagini, una nello spettro del visibile (ovvero antepoendo un filtro 486 all'obiettivo) ed una (solitamente) nel vicino infrarosso. Dovendo unire assieme i due file è fondamentale che non vi siano spostamenti del cavalletto o della fotocamera tra le esposizioni e quindi la sostituzione dei filtri richiede la massima attenzione, rendendo spesso più comodo l'uso di filtri quadrati con l'apposito portafiltri.

Per replicare la resa delle pellicole Kodak bisogna quindi operare sulla sostituzione dei livelli del file di partenza. Partendo dal file ripreso con il filtro Hoya 486, si vanno

a modificare i canali della tricromia, incollando sul canale del Blu l'immagine proveniente dal canale del Verde per poi incollare nel canale del Verde l'immagine proveniente dal canale del Rosso

Questa procedura va quindi a sostituire l'ordine dei canali scartando quello del Blu (simulando quindi l'effetto di un filtro giallo-arancio, in grado di bloccare queste frequenze) e spostandone gli altri due. Il canale del Rosso a questo punto sarà di troppo e dovrà essere sostituito dall'immagine proveniente dall'immagine infrarossa.

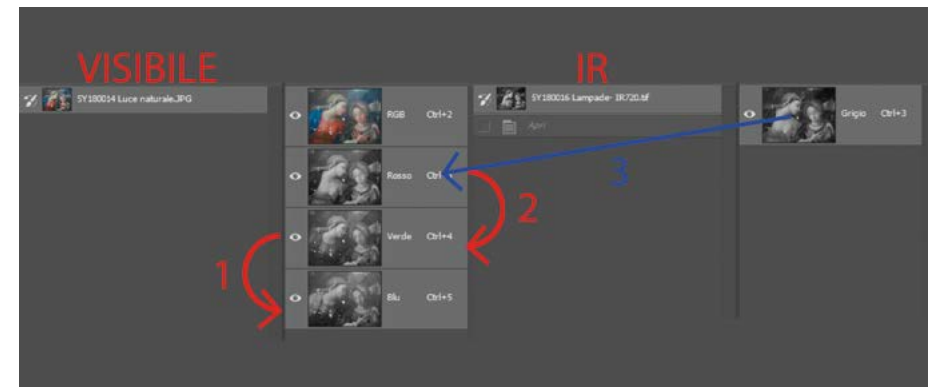


Fig. 15 In alto le due immagini riprese nel visibile e nel vicino infrarosso, in questo caso con un filtro a 720nm, sopra la postproduzione dei canali delle 2 immagini.

Per ottenere l'immagine infrarossa da sostituire al canale solitamente si rende monocromatica desaturando l'immagine ottenuta tramite il filtro infrarosso (il più delle volte un filtro che va a tagliare lo spettro attorno ai 720nm), mentre in altri casi, seppur più rari, soprattutto lavorando con filtrature a lunghezze d'onda maggiori, conviene partire dal canale del Rosso di questa seconda immagine oppure da un'immagine ottenuta tramite il comando Immagine>Calcoli unendo assieme i canali del Rosso e del Blu.

A questo punto la sostituzione di quest'ultima immagine al canale del Rosso della fotografia di partenza porta alla creazione di un file finale simile al seguente.



Fig. 16 Il risultato finale della postproduzione.

In questo caso l'immagine infrarossa si va ad unire ad un'immagine ripresa nello spettro del visibile rendendo meno leggibili i dati propri della ripresa infrarossa, permettendo invece un rapido confronto tra l'immagine del visibile (in falsi colori) e quella prodotta dalla radiazione infrarossa. Va sottolineato come l'uso più vasto di tale tecnica si abbia nel riconoscimento dei pigmenti in quanto molti colori simili come riflessione nello spettro del visibile evidenzino una diversa risposta spettrale nel campo dell'infrarosso. La composizione quindi delle due immagini può permettere il riconoscimento dei pigmenti o l'identificazione dei restauri, in particolare quando, a causa della loro condizione diacronica, spesso per ottenere un colore simile a quello dell'area da integrare, nel corso dei secoli sono stati utilizzati pigmenti sempre differenti, con rese differenti quindi alla radiazione infrarossa. Al di fuori dell'esperienza del singolo restauratore la buona prassi richiederebbe di fotografare sotto le stesse condizioni di illuminazione anche una tavola formata da vari tasselli prodotti con i vari pigmenti, in modo da poter identificare il comportamento dei singoli colori.

La pratica più comune in questo genere di immagini in infrarosso falso colore (IRFC) è quella di riprendere la scena con un filtro VIS-Cut 720nm o 760, anche se la sempre maggior diffusione dell'imaging digitale ha aperto le frontiere a ricerche ed applicazioni sempre più vaste.

Infatti risultati differenti si possono ottenere anche sostituendo ad un canale dell'immagine di partenza file derivanti da filtrature differenti, combinando ad esempio dati provenienti da immagini ottenute tramite illuminanti ad emissione praticamente monocroma.

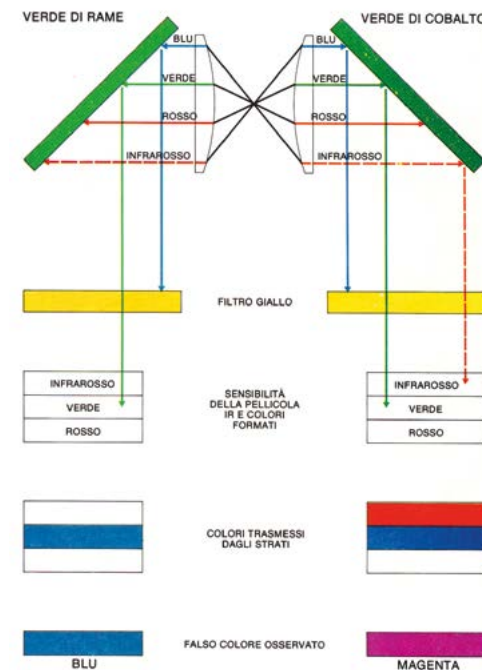


Fig. 17 Differente comportamento di pigmenti apparentemente simili nello spettro visibile.

Risultati in linea con i precedenti si ottengono con immagini IR a lunghezze d'onda maggiori ma sono stati segnalati risultati notevoli anche grazie alla combinazioni di immagini UV o dalla ricombinazione sui tre (o più) canali di immagini provenienti da varie parti dello spettro elettromagnetico.

Essendo però la ricerca ancora in via sperimentale ed esente da pubblicazioni ne si cita unicamente l'esistenza senza approfondirne gli sviluppi.

In chiusura si ricorda unicamente come la sostituzione dei livelli possa essere registrata nell'apposita palette della azioni in Adobe Photoshop, sostituendo quindi la procedura manuale ad una quasi completamente automatizzata per creare rapidamente grosse moli di immagini in falso colore.



Fig. 18 Tasselli di vari pigmenti ripresi con la tecnica del falso colore.



## CAPITOLO 6

### Immagini derivate da radiazione ultravioletta

All'altro estremo dello spettro visibile, verso le radiazioni di maggiore frequenza si trovano le radiazioni ultraviolette, portatrici di maggiore energie e, proprio per questo motivo, dannose per la conservazione ed in alcuni casi per la sicurezza degli operatori. Al di fuori della normale riflessione dello spettro da parte di una superficie, in particolare quando irraggiata da onde ad alto potenziale, l'eccitazione delle molecole può portare ad effetti di fosforescenza e fluorescenza.

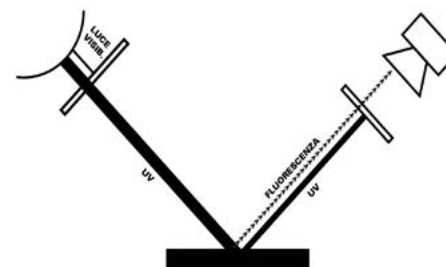
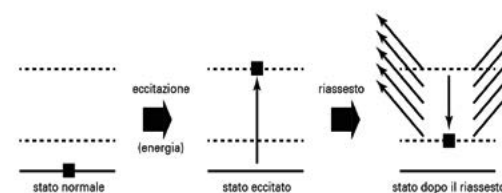


Fig. 1 Schema dell'eccitazione e conseguente fluorescenza.

Fig. 2 Schema standard ripresa della fluorescenza ultravioletta.

Lo stato eccitativo prodotto dalla radiazione incidente può generare quindi un'emissione da parte della materia di una radiazione elettromagnetica non più della lunghezza d'onda della fonte incidente ma di lunghezza d'onda maggiore, quindi di minore energia. Gli elettroni della materia, investiti dalla radiazione elettromagnetica, passano ad uno stato eccitato, ovvero cominciano a ruotare in orbitali che non sarebbero propri, effettuando quello che viene definito come un salto di orbitale. Gli elettroni però tenderanno a ritornare al loro stato originario e per fare ciò dovranno liberarsi dell'energia in eccesso, liberandola appunto sotto forma di un'altra radiazione elettromagnetica di minor frequenza (fig. 1). Questo stato è instabile ed è legato proprio alla continua eccitazione da parte di una fonte luminosa che

investa il soggetto, terminando con la soppressione della fonte luminosa. Questo fenomeno, detto fluorescenza è proprio di molti materiali e dipende da numerosi fattori. La fosforescenza invece, sebbene sia al pari della fluorescenza un'emissione di onde a minor potenziale, si differenzia in quanto lo stato eccitato degli elettroni perdura nel tempo e l'emissione luminosa è presente anche per un periodo di tempo variabile dopo la soppressione della fonte di irraggiamento.

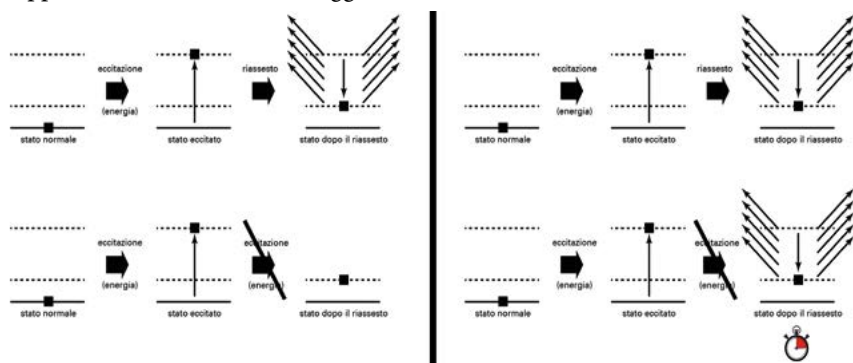


Fig. 3 Fluorescenza

Fig. 4 Fosforescenza

Per quanto concerne la diagnostica dei beni culturali, la fosforescenza risulta avere un'importanza marginale mentre lo studio della fluorescenza UV, datata al 1914 risulta ancora oggi estremamente ricco di informazioni.

La radiazione ultravioletta non penetra in profondità nella materia e si ferma allo strato superficiale della vernice e dello strato pittorico, procurando informazioni principalmente riguardanti lo stato dei restauri. Orientativamente le vernici protettive sviluppano una sempre maggiore fluorescenza con il passare del tempo, risultandone quasi esenti appena poste. Questa caratteristica permette quindi di identificare le aree soggette a decadimenti della vernice protettiva e quelle sottoposte a pulitura durante il restauro, al pari di come, in alcuni casi, la differente fluorescenza può permettere l'identificazione di diversi pigmenti di pari aspetto sotto la luce bianca.

Per questo genere di indagini si sfrutta solitamente lo spettro del vicino ultravioletto (UVA), dai 300nm ai 400nm ovvero quella parte di spettro molto vicina al visibile. Questa radiazione ultravioletta presenta un basso rischio per gli operatori, ai quali è consigliata unicamente la protezione degli occhi, tramite l'uso di semplici occhiali

in plexiglass (questo materiale, anche se privo di droghe e quindi trasparente abbatte buona parte della radiazione del vicino ultravioletto) ed evitando di fissare lo sguardo e l'obiettivo della fotocamera verso la fonte della radiazione.

I beni culturali devono essere invece tutelati al meglio contro le radiazioni ultraviolette in quanto la maggiore energia che esse trasportano velocizzano il processo di invecchiamento, gli standard museali richiedono la totale schermatura dalle radiazioni ultraviolette (anche quelle del sole) e quindi la campagna fotografica deve essere conclusa nel minor tempo possibile, senza mai lasciare l'opera inutilmente esposta ai raggi UV.

Sono definite UVA le radiazioni dai 315nm fino ai 400nm, al di sotto di tale soglia troviamo gli UVB (280-315) e gli UVC (100-280) molto più difficili da produrre e più dannosi. Questo genere di radiazioni sono in grado di ionizzare gli atomi e le molecole sulle quali incidono, provocando danni per la pelle in primis, fino ad arrivare (nel caso degli UVC) ad essere delle vere e proprie radiazioni battericide.

Solitamente nella diagnosi dei beni culturali tali radiazioni non vengono utilizzate e non sono prodotte dagli strumenti utilizzati per la fluorescenza da UVA.

Le lampade in grado di produrre UVA si differenziano in due tipi, dalle differenti qualità e con i rispettivi vantaggi e svantaggi.

Storicamente le fonti più utilizzate di radiazioni ultraviolette sono state le lampade ai vapori di mercurio, ovvero delle lampade a scarica nelle quali la presenza di mercurio a bassa pressione genera una consistente emissione nello spettro ultravioletto ed una ridotta emissione nello spettro del visibile. La scomodità di tali sistemi di illuminazione risiede nel costo elevato delle lampade, dal consistente ingombro e peso generati dal gruppo lampada e trasformatore (in quanto alla tensione normale queste lampade esplodono sonoramente) e, non ultimo, il lungo tempo di accensione, nell'ordine del quarto d'ora, prima di arrivare alla corretta emissione di UV, tempo durante il quale le lampade devono rimanere continuamente accese, richiedendo quindi che l'opera da riprodurre sia schermata dalla luce o posta in un altro ambiente. Purtroppo tali lampade, anche se spente inavvertitamente per un'interruzione della linea o per un errore umano, devono rimanere spente fino al completo raffreddamento prima di poter essere riaperte per poi richiedere nuovamente del tempo per il riscaldamento, pena la veloce usura delle stesse.

Estremamente più comode si rivelano le lampade fluorescenti, meglio note come neon di wood, ovvero delle lampade a scarica dove la radiazione viene prodotta al segui-

to dell'eccitazione e della fluorescenza dei materiali depositi sulla superficie del tubo di contenimento. Tale funzionamento, simile a quello dei comuni neon produce uno spettro discontinuo, ricco di emissioni UV ma con la tendenza a produrre un maggior quantitativo di radiazione visibile. Questo aumento della radiazione visibile è il prezzo da pagare per l'uso di lampade estremamente più leggere, dal prezzo minore ed estremamente più semplici all'uso ed al trasporto.



Fig. 5 Bulbo ai vapori di mercurio e tubo al neon.

In ogni caso la ripresa della fluorescenza UV richiede di illuminare l'opera e registrarne unicamente la fluorescenza nel visibile, quindi operare con un sensore schermato rispetto alle radiazioni UV ed IR. Come già detto, i sensori al silicio delle fotocamere sono commercializzati con dei filtri dall'effetto simile a quello ottenuto tramite i filtri 486 e 489 (rispettivamente IR-UV Cut ed un filtro anticalore, ovvero un IR Cut in grado di rinforzare l'effetto del primo) che operano perfettamente in questo caso anche se non sono sufficienti. La parte, seppur bassa di radiazione nello spettro del visibile riguarda le frequenze dei violetti e dei blu quindi, onde evitare pesanti dominati, bisogna anteporre all'ottica anche dei filtri gialli in grado di ridurre l'assorbimento da parte del sensore.

In particolare esistono dei filtri appositi, differenti dai filtri gialli per la fotografia analogica e sono i B&W 021 (Kodak 2E), 022 (Kodak 8), 415, 420

L'uso di questi filtri permette di ottenere immagini dai toni lievemente diversi tra loro con maggiore e minore influenza delle radiazioni violette sull'opera, in grado quindi di evidenziare in maniera differente gli effetti della fluorescenza.

Non sempre però la fluorescenza porta ad una radiazione secondaria nello spettro del visibile, quindi può risultare utile per un'indagine completa, effettuare anche una ripresa filtrando la fotocamera con un filtro Vis Cut come lo standard 720nm, per poter

confrontare anche la fluorescenza nello spettro dell'infrarosso, in grado, in alcuni casi, di differenziare leganti e pigmenti in base alla loro composizione chimica. In tali casi si consiglia di procedere con filtri non particolarmente selettivi, evitando di registrare unicamente le frequenze superiori ai 1000nm in quanto la scarsa sensibilità dei sensori digitali a queste frequenze richiederebbe un'esposizione estremamente lunga, spesso non giustificata da risultati non ottenibili a minori filtrature. Questa genere di filtratura è da ritenersi quindi utile quando la fluorescenza nell'IR rileva una buona qualità di dati sensibili legittimando quindi l'ulteriore analisi.

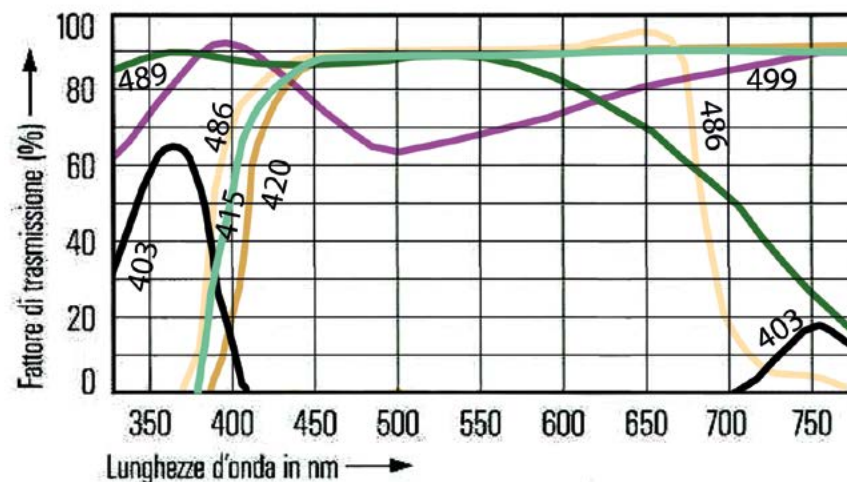


Fig. 6 Serie di filtri IR-Cut ed UV-Cut prodotti dalla B+W.



Fig. 7 L'immagine prodotta dalla fluorescenza ultravioletta evidenzia le aree coperte da gommalacca (fluorescenza arancio), le zone sverniciate (minor fluorescenza) e le zone con resti di colla (fluorescenza blu).

## RIFLETTOGRAFIA UV

Un'altra tecnica dal maggiore impatto sull'opera, per quanto ancora non rientrante nel novero delle diagnosi invasive, in grado di ottenere ulteriori informazioni sulla composizione chimica dei pigmenti è appunto la riflettografia UV, ovvero la ripresa dello spettro UV riflesso dal soggetto.

In questo caso la ripresa riguarda la radiazione primaria che dall'opera giunge al sensore, pulita dalla componente del visibile e conseguentemente dalla fluorescenza. In questo caso verranno utilizzate fotocamere alle quali siano stati tolti i filtri UV-IR Cut e la registrazione si avrà circa fino ai 300nm, limite più che della sensibilità del silicio, della trasparenza dei vetri ottici. Per registrare al di sotto di tali lunghezze d'onda infatti sono d'obbligo le lenti in quarzo (trasparente all'incirca fino ai 200nm), prodotti dal costo molto elevato e dalla scarsa applicazione.

Davanti all'ottica si dovrà porre un filtro Vis Cut, in grado di fermare le radiazioni del visibile e, qualora presenti, dell'infrarosso come ad esempio il filtro B&W 403 (Vis Cut con una piccola trasmissione di ir) accoppiato al già citato 486

In questo caso le esposizioni richieste sono molto lunghe (nell'ordine dei diversi minuti), da qui l'alta influenza sull'opera del procedimento

Anche in questo caso la differente lunghezza d'onda delle radiazioni coinvolte porterà ad una differente foceggiatura. In questo caso però la scarsa intensità luminosa non permette neppure di foceggiare tramite il live view che apparirebbe nero al pari dell'oculare. Come nel caso dell'infrarosso, dove le lunghezze d'onda venivano messe a fuoco dietro il sensore e quindi richiedevano una correzione come se il soggetto fosse più vicino, in questa situazione bisognerà operare al contrario e foceggiare come se il soggetto fosse più distante dalla fotocamera. Solo le prove pratiche e l'esperienza potranno però portare a buoni risultati.

Essendo questo un problema risolto, nello spettro visibile, dalle lenti apocromatiche, al pari esistono lenti, seppur estremamente costose, disegnate per poter mettere a fuoco senza distinzioni sia lo spettro del visibile che quello dell'ultravioletto oppure tutto lo spettro esteso dall'UVA sino al vicino infrarosso (310nm-1100nm).



Fig. 8 2 obiettivi espressamente studiati per l'impiego in riflettografia UV, il Nikon UV-Nikkor 105mm e lo Jena Jenoptik UV-VIS 105mm.

## CAPITOLO 7

### Onde ad alta energia, raggi X

Sempre all'interno dell'imaging per i beni culturali, occorre citare l'acquisizione di immagini nello spettro delle radiazioni X, per quanto queste esulino dalle tecniche prettamente fotografiche, richiedendo altre strumentazioni ed accortezze differenti. Studiati per la prima volta sul finire dell'800 i raggi Röntgen (dal nome dello scopritore, premio Nobel nel 1901) si svilupparono ampiamente in campo medico per passare

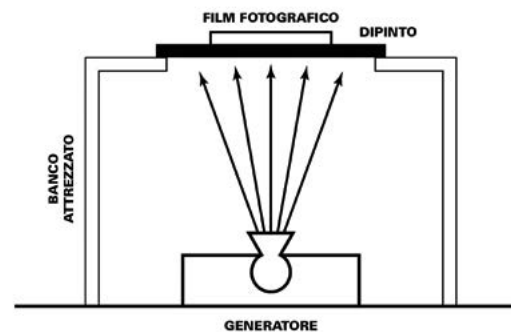


Fig. 1 Schema di posizionamento della fonte di irraggiamento in una radiografia.

successivamente, come quasi tutte le altre tecniche diagnostiche, al campo dei beni culturali grazie a contributi di personaggi multidisciplinari interessati ai beni culturali. In questo caso, i tempi furono estremamente brevi e già due anni dopo la loro scoperta, questa tecnica venne applicata all'università di Monaco su alcuni dipinti nel 1897. Già nel 1914 furono pubblicati studi approfonditi sull'impiego nel campo della diagnosi di opere d'arte e risale invece al 1938 la prima trattazione completa ad opera di Christian Wolters (storico dell'arte) sulla radiologia artistica, la sua interpretazione ed i metodi interpretativi dei risultati ottenuti.

Le radiazioni ad alta energia posseggono una notevole capacità di attraversamento della materia e per tale ragione vengono utilizzate al pari della transirradianza per analizzare la struttura dei materiali.

Con la stessa logica l'opera da analizzare deve essere posizionata tra la fonte irradiante e lo strato sensibile, in questo caso però non si utilizzeranno sistemi ottici per l'acquisizione dei dati quanto la semplice riproduzione a contatto dell'area.

Ponendo al di sotto dell'opera un generatore di raggi X (già dalle prime ricerche furono dei tubi catodici survoltati) e ponendo sulla superficie (nell'esempio pittorica) le lastre sensibili si otterrà, dopo l'esposizione, una serie di negativi.

L'estrema dannosità delle radiazioni richiede l'impiego di sale schermate dalle radiazioni nelle quali porre le opere durante l'irraggiamento, allontanando quindi gli operatori dai rischi connessi. Dovendo lavorare unicamente per contatto la riproduzione si avrà unicamente nel rapporto di 1:1 ma, utilizzando lastre dalle dimensioni contenute (solitamente 30X40 cm), sarà necessario utilizzarne molteplici per coprire tutta la superficie dell'opera, ottenendo svariati negativi da unire poi, al seguito della scansione, in un unico file completo. Le lastre, essendo sensibili anche alla luce sono confezionate all'interno di buste chiuse in materiali opachi alla luce e trasparenti alle radiazioni X. Come nel caso della transirradianza l'esposizione sarà determinata in base alla resistenza all'attraversamento che il manufatto oppone ai raggi X, sebbene in questo caso, oltre allo spessore stesso della materia ed alla sua densità, ad influenzarne l'opacità interverrà anche il peso atomico dei composti chimici che ne fanno parte. Maggiore sarà il peso atomico, maggiore sarà la radiopacità, rendendo quindi legno e tela estremamente trasparenti, i materiali lapidei molto assorbenti ed i materiali ad alto peso atomico, il piombo in primis, come quasi completamente opachi, in grado di assorbire tutte le radiazioni e non trasmetterne alcuna.

Considerando l'immagine come un negativo delle radiazioni che attraversano il manufatto, le aree ad alta radiopacità risulteranno nere (non esposte) e le aree in materiali radiotrasparenti o fessurate come bianche. Le varie sfumature possono permettere di capire la consunzione del supporto, i rinforzi posti sui materiali, fessurazioni o vere e proprie rotture nonché le tipologie di trama ed ordito (il tessuto è totalmente radiotrasparente, il suo calco sulla preparazione invece crea zone di maggiore e minor spessore della stessa, evidenziate queste dalla radiografia).

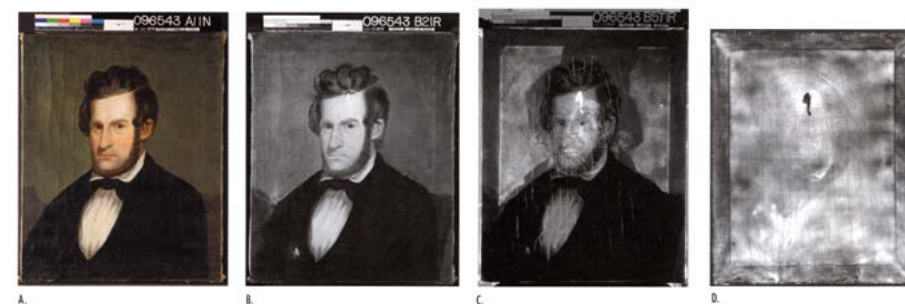
Purtroppo, per quanto riguarda le opere pittoriche, l'abitudine di utilizzare basi preparatorie in biacca (o bianco di piombo, carbonato di piombo) rende molto difficile la penetrazione delle radiazioni, inficiando quindi l'analisi. In questi casi, qualora la preparazione sia posta su tessuto e non su legno o altri supporti di maggiore spessore, la transirradianza infrarossa potrà dare spesso risultati di migliore leggibilità.

Fig. 3 (pagina a fianco, in basso) Il confronto tra un'immagine nello spettro del visibile e nell'infrarosso (A e B). La radiografia (D) rivela unicamente alcuni tratti, mentre buona parte dell'immagine risulta monocroma a causa della grande preparazione in biacca. La transirradianza IR invece (C), nonostante la minore pulizia, attraversa la preparazione ed evidenzia la presenza di un altro disegno sottostante.



Fig. 4 In alto: Immagine in luce diffusa.

In basso: Radiografia dello stesso particolare, solo evidenti i chiodi, la trabeatura ed i rinforzi della cornice, una doppia stesura della mitra vescovile di sinistra, nonché l'uso di pigmenti a base di elementi molto pesanti (forse piombo) per la mitra di destra e parte dei paramenti vescovili. Ad un maggiore ingrandimento è anche individuabile la corposità delle stesure pittoriche dalle lievi sfumature all'interno di aree quasi monocromatiche.



## CAPITOLO 8

### Fotoelasticimetria

Avendo trattato tale tecnica solo marginalmente a lezione ed essendo applicabile solo in casi controllati e, molto difficilmente su beni culturali, ne si cita brevemente l'esistenza per dovere di completezza.

Ponendo un filtro polarizzatore (lineare) su una fonte luminosa ed uno sulla fotocamera (che prenderà il nome di analizzatore per differenziarlo dal primo), qualora il soggetto sia trasparente alla radiazione visibile, otterremo un'immagine dai colori vivissimi disposti ad onde sulla superficie.

Il primo polarizzatore non ha altra funzione se non quella di garantire che la luce diretta verso il soggetto sia polarizzata e quindi vibri in una sola direzione, il secondo invece deve essere posto in maniera tale che l'angolo di polarizzazione sia perpendicolare al primo ottenendo la quasi totale ostruzione della radiazione (su tale principio si basano infatti i filtri neutri a densità variabile, due polarizzatori dei quali uno ruota possono fermare da uno a circa 8 stop di luminosità).

Un materiale trasparente infatti verrebbe attraversato semplicemente dalla luce la quale potrebbe cambiare composizione spettrale (materiali colorati in grado di assorbire maggiormente alcune frequenze) ma verrebbero comunque schermati dalla doppia polarizzazione.

La velocità all'interno di un corpo risulta essere sempre proporzionale all'indice di rifrazione del materiale stesso ma, qualora una qualsiasi forza (elastica o meno) causi una differenza di pressione nel materiale, l'indice di rifrazione varierà e, conseguentemente la radiazione cambierà lievemente di fase creando bande colorate che circoscrivono le aree di pari deformazione.



## CAPITOLO 9

### Olografia

Come detto precedentemente si intende per luce laser una radiazione coerente nel tempo (ovvero nella fase) e monocromatica, in grado quindi di essere soggetta ad una bassissima dispersione.

Il processo olografico consiste proprio nel misurare le differenze di fase della radiazione elettromagnetica dopo che esse sono state riflesse dal soggetto.

All'atto pratico un fascio di luce laser dopo l'attraversamento di lenti preposte a diffonderne il fascio attraversa uno specchio semitrasparente in grado di deflettere una parte della radiazione sul soggetto mentre un'altra parte andrà ad impressionare direttamente una lastra sensibile. Anche la radiazione diretta verso il soggetto andrà poi a riflettersi sulla stessa lastra dove verrà registrata la differenza nella fase della radiazione elettromagnetica.

Illuminando questa lastra con una luce laser nuovamente diffusa si otterrà la proiezione tridimensionale del soggetto.

Oltre a questo uso prettamente documentario, l'olografia a doppia esposizione o ad intervallo di tempo, permette di ottenere ulteriori informazioni sullo stato dell'oggetto. Impressionando due volte la stessa lastra, la prima con il soggetto nelle condizioni ambientali standard, la seconda modificandone lo stato (sottoponendolo ad un riscaldamento o ad una pressione ad esempio) verranno registrati ambo le radiazioni riflesse e si creerà uno schema dove input di fase uguale in ambo le situazioni daranno luogo a frange dette isodeformate. Tramite questo sistema quindi si è in grado non solo di rappresentare un manufatto quanto anche di identificarne le aree sottoposte a stress ed a modificazioni, come ad esempio le aree di maggior carico di una struttura, dove il peso steso provoca le maggiori spinte o dove, nel caso di movimentazione, andranno a crearsi aree eccessivamente sollecitate.

## CAPITOLO 10

### Georadar

L'ultima strumentazione analizzata durante il corso, seppure in via puramente teorica è stata quella propria del georadar e delle sue possibili applicazioni in diagnostica.

Il georadar opera secondo gli stessi principi di riflessione e rifrazione propri di qualsiasi onda elettromagnetica. Lo strumento emette radiazioni elettromagnetiche dette ad alta frequenza (bassa rispetto a quelle dello spettro del visibile), all'incirca attorno al GHz, quindi al pari delle frequenze emesse dai telefoni cellulari, le quali, procedendo all'interno di un oggetto, interagiscono con le superfici di differente densità.

Per le leggi dell'elettromagnetismo, queste onde, al pari della luce, vengono riflesse quando incontrano superfici con differenti coefficienti, un'antenna sempre all'interno del macchinario, misurerà l'intensità delle radiazioni riflesse e, misurandone la fase, sarà in grado di definire la profondità della superficie di discontinuità.

Il procedimento infatti è identico a quello di qualsiasi radar, unicamente in questo caso il macchinario ha potenze utili ad attraversare solidi come possono essere il terreno e la muratura.

La lunghezza d'onda di emissione determinano la progressione in profondità e la capacità di riconoscere difformità nel volume, in quanto maggiori lunghezze d'onda, seppure più penetranti, hanno minore capacità risolutiva nell'individuare elementi celati alla vista.

Nel caso preso in esame durante il corso, lo scanner StructureScan Mini è stato utilizzato per analizzare difformità su un mosaico pavimentale per il quale la termografia non ha garantito risultati soddisfacenti.

Lo strumento di questo studio, emettendo una radiazione all'incirca attorno ai 1600MHz (1,6GHz), ripetendo l'emissione ad intervalli regolari di tempo prestabiliti è stato in grado, durante lo spostamento lungo la superficie, di tracciare un grafico bidimensionale della sezione della struttura sottostante il mosaico, identificandone le difformità.

## CAPITOLO 11

### Standard e sicurezza

Nell'operare su un bene culturale, a priori dalla sua rilevanza bisogna ricordare che, come prescritto dal Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio (d.lgs 42 del 22.01.2004 e successive modifiche), la priorità sopra ogni altra esigenza è quella della conservazione, quindi del mantenimento dello stato materiale ed immateriale del bene. Per tale ragione, già con gli impianti normativi precedenti al 2004 tale priorità è stata regolamentata da normative e direttive ad hoc pensate a preservare nel tempo i materiali contro incuria e danni dovuti, in primis alle condizioni ambientali.

Considerando la prevenzione il primo strumento per la conservazione, citeremo gli standard emanati nel d.lgs 112/98 "Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei" ed, in particolare i sottoambiti I e IV del VI ambito "Gestione e cura delle collezioni".

Senza dilungarsi in un'approfondita trattazione per la quale si rimanda al testo recuperabile in Gazzetta Ufficiale del Ministero dell'Interno o nel sito del MIBACT, citiamo unicamente gli intenti e le definizioni generali.

Ogni bene culturale, a seconda delle sue caratteristiche fisiche e dello stato di conservazione richiede ambienti conservativi differenti, definiti in valori minimi e massimi dei vari fattori concorrenti. In primis sono la temperatura e l'umidità relativa i valori da mantenere sotto controllo, nonché i più soggetti a sbalzi durante la campagna di documentazione.

Si cita di seguito una parte del decreto riferita alle relazioni ed alle valutazioni da effettuarsi sui beni, per indicare quindi una via procedurale da considerarsi la più corretta nell'affrontare l'analisi di un bene.

#### 1. Documentazione per la conservazione

##### 1.1. Scheda conservativa

Nella gestione delle collezioni museali è richiesta l'adozione di una scheda conservativa per l'organizzazione

sistematica delle conoscenze tecnico-scientifiche relative a materiali costitutivi, pro-

cedimenti esecutivi e

stato di conservazione dei manufatti. Tale organizzazione è finalizzata alla:

- programmazione degli interventi di manutenzione, conservazione e restauro;
- corretta manipolazione, esposizione, immagazzinaggio dei manufatti;
- regolamentazione della movimentazione (prestiti, spostamenti all'interno della struttura, ecc.).

Per il conseguimento di tali obiettivi è indispensabile:

- la messa a punto di un modello di scheda articolato su più livelli di informazione, ma comunque tale da garantire,

nel suo livello base, conoscenze sufficienti a soddisfare le finalità sopra indicate;

- la raccolta e l'archiviazione in allegato del materiale documentario (riprese fotografiche, relazioni tecniche,

scientifiche, rilievi grafici, ecc.) relativo ai singoli manufatti;

- l'utilizzo di un supporto informatico che consenta l'elaborazione, l'aggiornamento e la correlazione dei dati

rilevati, nonché la loro diffusione e fruibilità in rete;

- l'adozione di una terminologia tecnica normalizzata e possibilmente validata a livello centrale (ICR) al fine

di rendere esaurienti le interrogazioni sulle banche dati;

- il rilevamento e l'organizzazione dei dati a cura di personale tecnico specializzato, ovvero conservatori/

restauratori professionisti;

- la programmazione di una procedura di controllo periodico dello stato di conservazione dei manufatti per

l'aggiornamento dei dati.

1.2. Linee guida per la definizione di un tracciato di scheda

Il tracciato di scheda, indipendentemente dal tipo di manufatto preso in esame, dovrebbe contenere informazioni

strutturate nelle seguenti sezioni:

- dati identificativi dell'opera: sarà adottato come schema quello mutuato dalla scheda di catalogazione

ICCD;

- dati identificativi della scheda: riporterà il numero di identificazione interno all'archivio delle schede

conservative, i nomi e le qualifiche dei redattori, le date di compilazione, revisione o aggiornamento; le modalità

di ispezione del manufatto;

- documentazione: archiverà il materiale documentario pertinente alle vicende conservative del manufatto,

organizzato per tipologie (grafico, fotografico, scientifico, ecc.), o in alternativa riporterà i riferimenti ad altri

archivi pertinenti (laboratori scientifici, fototeca, ecc.);

- caratteristiche della collocazione: illustrerà sinteticamente sia le attuali caratteristiche di collocazione del manufatto che gli spostamenti subiti nell'ambito della struttura museale (sale, depositi, ecc.). Verranno

inoltre riportate informazioni relative al tipo di vincolo alle pareti, ai sistemi di protezione e sicurezza, nonché

ai fattori ambientali di rischio da esposizione pertinenti al singolo manufatto. Tale voce andrà ad integrare i

dati riportati in schede ambientali a carattere generale relative ai diversi spazi della struttura museale;

- descrizione tecnica del manufatto e dello stato di conservazione: riporterà le informazioni riguardanti

le tecniche di esecuzione (materiali costitutivi e procedimenti) e lo stato di conservazione (alterazioni fisiche,

chimiche e biologiche, e interventi di restauro), rilevate secondo un ordine logico "stratigrafico", relative sia

al manufatto che a eventuali elementi accessori, quali cornici, contenitori, ecc. (a titolo di esempio per un dipinto

su tela andranno considerati: struttura di sostegno, supporto, supporto ausiliario, strati preparatori, pellicola

pittorica);

- indicazioni per la conservazione: in base all'analisi e alla correlazione dei dati rilevati verranno segnalati

sia il grado di urgenza degli interventi di manutenzione, conservazione e restauro da effettuare, sia

i criteri da adottare per l'esposizione, l'immagazzinaggio e il prestito.

In attesa dell'elaborazione dei tracciati di scheda conservativa per le diverse tipologie

di materiali, valida a livello nazionale, si può utilmente fare riferimento alle numerose esperienze maturate in questi anni e in buona parte pubblicate. Oltre a quelle già segnalate in bibliografia si ricordano le rilevazioni condotte sulle collezioni della Pinacoteca di Brera (Milano), del museo civico Correr (Venezia), della Galleria Doria Pamphili (Roma), nonché le sperimentazioni della “Carta del rischio del patrimonio culturale”.

## 2. Parametri ambientali

### Premessa

La complessità e la varietà degli oggetti che costituiscono i beni culturali rendono particolarmente difficile

l'individuazione e la definizione assoluta degli intervalli e dei limiti dei parametri ambientali, intesi come valori critici e ottimali, per la buona conservazione delle opere.

Pertanto la corretta utilizzazione delle tabelle relative a tali intervalli e limiti riportate in appendice deve essere sempre e necessariamente accompagnata da una specifica metodologia di interpretazione basata sui seguenti

punti:

- valutazione dello stato di conservazione del manufatto;
- studio degli andamenti dei parametri microclimatici, di illuminazione e della qualità dell'aria dell'ambiente in cui il manufatto si trova;
- studio dei parametri microclimatici, di illuminazione e della qualità dell'aria dell'ambiente in cui il manufatto si troverà;
- giudizio complessivo di valutazione “stato di conservazione/ambiente”;
- conoscenza dell'interazione del manufatto con l'ambiente.

### 2.1. Obiettivi di qualità

Gli obiettivi di qualità si prefiggono di:

- indicare valori soglia e intervalli di riferimento per quanto riguarda il microclima, le

condizioni di illuminazione

e la qualità dell'aria;

– sintetizzare le raccomandazioni (standard procedure) e le linee guida (criteri generali) per programmare e garantire una corretta conservazione. Tali linee guida e raccomandazioni hanno anche la funzione di consentire una soddisfacente conservazione dei manufatti, là dove non siano pienamente garantite le condizioni ottimali di conservazione per le opere.

### 2.2. Standard procedurali

Sono rappresentati da una serie di raccomandazioni con la funzione di organizzare le attività di gestione dei manufatti nel museo; comprendono quindi l'esposizione, la conservazione in deposito e il trasporto delle opere.

Gli standard procedurali devono:

- definire il procedimento o l'operazione tecnica essenziale;
- esporre sinteticamente la serie di attività connesse;
- indicare le modalità di espletamento.

### 2.3. Le linee guida

Queste devono:

- indicare a vari livelli gli standard ambientali da perseguire per una corretta conservazione;
- fornire conseguentemente gli orientamenti e i provvedimenti gestionali da adottare.

[...]

Le due schede sopraindicate non prevedono analisi e misure biologiche, chimiche e fisiche. Il rapporto tecnico dettagliato deve invece richiedere procedure scientifiche di analisi e controllo finalizzate a evidenziare

l'influenza dell'ambiente sullo stato di conservazione dei manufatti.

Andranno misurati in concreto i seguenti parametri:

T aria (°C)  $\theta_{min}$   $\theta_{max}$   $\theta_{med}$

T sup. (°C)  $\theta_{min}$   $\theta_{max}$   $\theta_{med}$

UR (%) URmin URmax URmed  
 Illuminamento (lux) Emax Emed  
 Radianza UV (watt/mq)  
 Radianza totale (watt/mq)  
 Luminanza (cd/mq)  
 Temperatura di colore (°K)  
 Velocità/aria (m/sec)

Carica microbica totale nell'aria (UFC/m3)  
 Concentrazione batterica (UFC/m3)  
 Concentrazione fungina (UFC/m3)  
 Concentrazione del PTS (µg/m3)  
 Concentrazione del PM10 (µg/m3)  
 Ioni solubili nel particolato (%)  
 Concentrazione di O3, SO2, NO2, CO2 (µg/m3)

Tali procedure comprenderanno anche la definizione, sulla base dei problemi emergenti, delle modalità spaziali e temporali di prelievo e di acquisizione dei dati sperimentali.

Questa sintetica citazione vuole indicare come la procedura di identificazione dei corretti standard conservativi esoneri ampiamente dalla formazione del fotografo e sia unicamente in mano a personale qualificato al quale l'operatore-fotografo dovrà sottostare per ridurre al minimo il suo impatto sul microclima dell'opera. Si citano ad esempio, i casi più comuni; oltre all'aumento di temperatura e quindi l'abbassamento dell'umidità relativa causato dai sistemi di illuminazione, l'aumento di umidità e di CO2 legato ad un'analisi eccessivamente ravvicinata che porti l'operatore a respirare per lunghi periodi vicino al manufatto, la variazione di velocità dell'aria al seguito di un riscaldamento localizzato di un ambiente ed infine gli stress fisici legati direttamente alla manipolazione dell'opera.

Categoria fotosensibilità		Illuminamento massimo (lux)
1 Molto bassa	<i>Reperti e manufatti relativamente insensibili alla luce:</i> metalli, materiali lapidei e stucchi senza strato di finitura, ceramiche, gioielleria, smalti, vetri, vetrate policrome, reperti fossili.	Superiore a 300 ma con limitazioni sugli effetti termici in particolare per stucchi, smalti, vetrate e fossili.
2 Media	<i>Reperti e manufatti moderatamente sensibili alla luce:</i> pitture ad olio ed a tempera verniciate, affreschi – materiali organici non compresi nei gruppi 3 e 4 quali quelli in corno, osso, avorio, legno	150
3 Alta	<i>Reperti e manufatti altamente sensibili alla luce</i> Tessili, costumi, arazzi, tappeti, tappezzeria; acquerelli, pastelli, stampe, libri, cuoio tinto; pitture e tempere non verniciate, pittura a guazzo, pitture realizzate con tecniche miste o "moderne" con materiali instabili, disegni a pennarello; piume, pelli e reperti botanici, materiali etnografici e di storia naturale di origine organica o tinti con prodotti vegetali; carta, pergamena, legni bagnati	50
4 Molto alta	<i>Reperti e manufatti estremamente sensibili alla luce:</i> mummie; sete, inchiostri, coloranti e pigmenti a maggior rischio di scoloritura come lacche, ecc.	50

Categoria fotosensibilità	Componente ultravioletta		Densità di energia totale Radianza totale Max (banda di misura 400÷4000 nm)
	Componente UV max associata al flusso luminoso	Radianza UV max (valore assoluto)	
2 Media	75µW/lm	<1,2µW/cm²	10 W/m²
3 Alta	75µW/lm	<0,4µW/cm²	3 W/m²
4 Molto alta	10µW/lm	<0,05µW/cm²	1 W/m²

Fig. 1 Indicazioni riguardanti l'illuminamento massimo dei manufatti, divisione in base alla fotosensibilità degli stessi e parametri di controllo dell'irraggiamento ultravioletto.

## CAPITOLO 12

### ANALISI DELL'OPERA

<b>N° Inventario Facoltà</b>	
<b>N° Inv. Luogo di provenienza</b>	
<b>Provincia</b>	Pesaro-Urbino
<b>Comune</b>	Pergola
<b>Provenienza</b>	Palazzo Giannini
<b>Luogo di collocazione</b>	Cappella privata
<b>Oggetto</b>	Dipinto su tela
<b>Soggetto</b>	Sacra famiglia con tre santi e una beata
<b>Tecnica esecutiva</b>	Olio su tela
<b>Formato/Dimensioni</b>	Rettangolo centinato h. 262,3 cm; l. 135,4 cm
<b>Autore</b>	Ignoto
<b>Secolo o frazione di secolo</b>	XVIII sec.
<b>Anno</b>	1700
<b>Condizione giuridica</b>	Collezione privata
<b>Data ingresso laboratorio di restauro</b> <b>Data riconsegna</b>	Giugno 2012
<b>Note</b>	

Acquisendo il materiale prodotto dagli studenti del corso di Restauro dell'Università degli studi di Urbino Carlo BO, è possibile avere coscienza dei lavori svolti sull'opera, della sua storia e del suo stato precedente i restauri, in modo da avere materiale ulteriore da confrontare con i dati ottenuti durante l'analisi delle immagini.

Il telaio, non originale già prima dell'intervento di restauro è stato rimosso a seguito della velinatura dell'opera, in modo da poter pulire la tela di rinfodero presente, abbondantemente segnata da resti di colla pasta. Dopo la rimozione il retro del dipinto è stato consolidato tramite apposizione di una soluzione di paraloid B72 ed Aquazol. Dopo l'inserimento di inserti in tela, il dipinto è stato spianato per riconsegnare una certa planarità e la tela è stata sostituita con materiale nuovo di uguale fattura.

Terminate le operazioni di rinfodero, si è proceduto con la pulitura, il consolidamento della pellicola pittorica dove mostrasse distacchi, stuccature nelle zone completamente abrase ed infine, con operazioni di reintegro tramite tratteggio o tramite tecnica mimetica rispettivamente per le aree di maggiore e minore dimensione.

Come segnalato dalla documentazione fotografica della scheda tecnica, l'area superiore occupata dalla colomba è stata oggetto dei reintegri più cospicui, come dimostrano le immagini della fluorescenza ultravioletta.

Le seguenti analisi, prese singolarmente non possono avere un vero valore informativo, in quanto non certe nell'identificazione dei pigmenti come potrebbe essere un'analisi dello spettro tramite spettrofotometro.

Queste tecniche, qui divise per comodità, se analizzate assieme possono invece, unendo i dati provenienti dalle varie immagini, dare un'interpretazione abbastanza affidabile della storia dell'opera ed identificare buona parte delle tecniche esecutive. L'analisi dei dati, se effettuata assieme ad un restauratore e se integrata alle analisi chimiche e microscopiche può dare una visione complessiva del manufatto.

In ogni caso tali indagini non hanno la presunzione di essere complete, quanto l'intenzione di indicare quali vie non distruttive e di facile esecuzione possano garantire una conoscenza preliminare.

Le indagini nello spettro del visibile, essendo state effettuate in occasioni differenti, durante lo svolgersi del corso, sono state riprese con diverse fotocamere ed illuminanti, condizioni altrimenti non consigliabile per garantire una maggiore uniformità del lavoro ed una minore postproduzione.

In generale, le luci utilizzate sono state delle lampade survoltate della potenza di 400W, oppure dei flash Bowens da 1500W/s posti ad angoli compresi tra i 30 ed i 45 gradi rispetto il piano dell'opera, eccezion fatta, per le immagini in luce radente.



**Set fotografico alla Chiesa di S.Girolamo di Urbino**

- OPERA: Sacra Famiglia, Olio su tela, 262,3x135,4cm
- LAMPADE ALOGENE: Leonardo Virgola 400w 50Hz (x2)
- STATIVI LUCI: Manfrotto 004B (x2)
- TREPPIEDE CAMERA: Manfrotto 055XPro con testa micrometrica

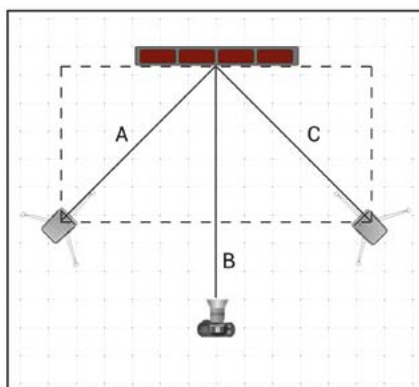


Fig. 1 (pagine a fronte)  
 Vista generale, luce visibile.  
 Nikon D90 modificata, 18-55mm a 40mm,  
 filtri B+W 486 e 480  
 2 Lampade alogene 400W  
 distanza A e C 370cm  
 distanza B 460cm  
 altezza fotocamera 460cm





Fig. 2 Luce diffusa macrofotografia,  
particolare del volto del Bambino.  
Canon EOS1000D modificata, Sigma  
50mm f2.8, filtri B+W 486 e 489  
macro.  
2 Lampade alogene 400W



Fig. 3 Luce diffusa macrofotografia,  
particolare, viso del S. Giuseppe.  
Canon EOS1000D modificata, Sigma  
50mm 2.8, filtri B+W 486 e 489  
macro.  
2 Lampade alogene 400W

Attrezzatura utilizzata: Canon EOS 5D Mark II;  
 Obiettivo 50 mm;  
 1 Flash Bowens 1500 W;  
 Scatto remoto wireless;  
 treppiede Manfrotto 055XPro con testa micrometrica;  
 pannello nero;

Distanza opera/macchina: 4,20 m (per le riprese generali);

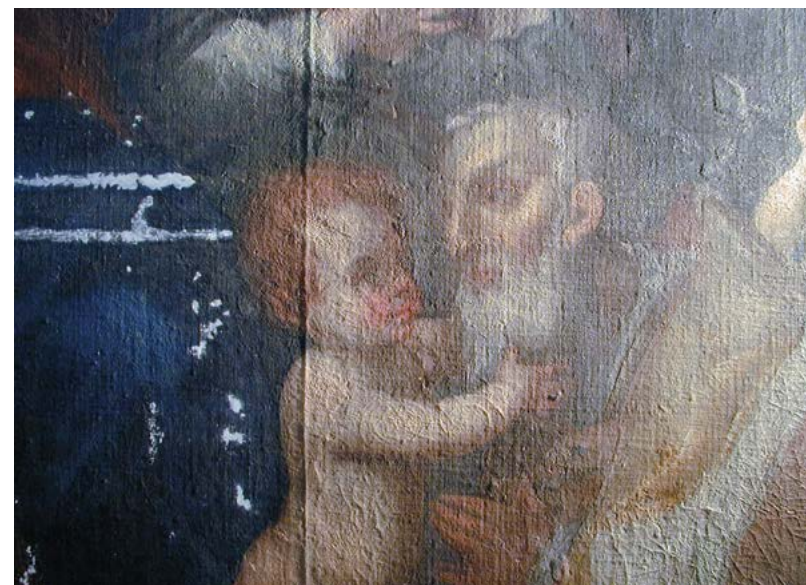
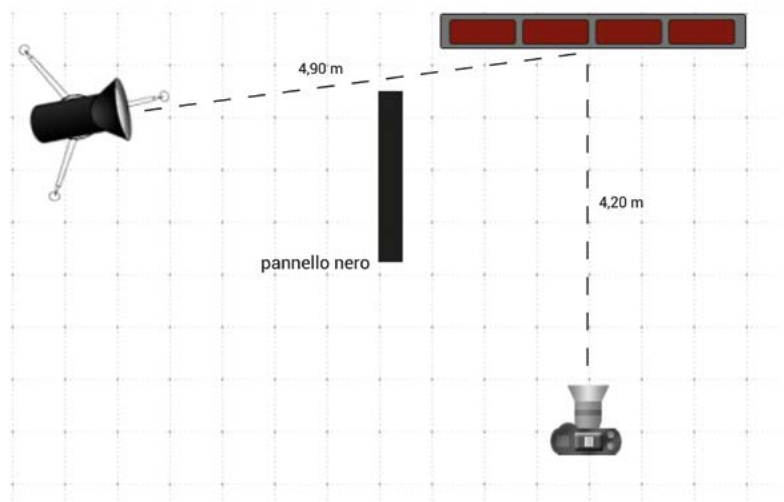


Fig. 4 Luce radente, provenienza destra,  
 particolare Bambino e Santo.  
 PhotoPC 850Z 6,6mm  
 1 Lampada alogena 400W



Fig. 5 Luce radente, provenienza da sinistra.  
 Particolare volto della santa  
 Canon EOS 5D mk2, 50mm compact  
 macro f2.5  
 1 lampada flash 500W/s



Fig. 7 Luce radente, provenienza dall'alto



Fig. 8 Luce radente, provenienza da destra.



Fig. 6 Transirradianza, Nikon D4, fotomosaico di 8 immagini, 105mm



Fig. 9 Retro, Canon 5D mk2, 50mm.

Quanto si può inferire dall'analisi del materiale fotografico prodotto nello spettro del visibile può essere schematizzato come segue:

-In fig. 1 sono riconoscibili le aree soggette ad una stuccatura in tempi recenti, riconoscibili in bianco.

-La struttura presenta un cretto diffuso ma non onnipresente, alcune superfici, probabilmente a causa di stesure differenti, patiscono meno.

-Legata ai cambiamenti microclimatici dell'ambiente conservativo, il cretto in fig. 1, estremamente superficiale può forse essere identificato come cretto da asciugatura, ovvero sincronico alla produzione dell'opera, non derivante dall'invecchiamento.

-La luce radente evidenzia, oltre alle caratteristiche superficiali della stesura, le aree di cucitura della tela, in particolare, confrontando le 2 immagini intere, il dipinto è formato dall'unione di due tessuti uniti lungo una linea verticale centrale.

-L'immagine derivata dalla transirradianza, essendo seguente alle operazioni di rinforzo evidenzia non le aree indebolite del tessuto quanto le aree soggette a distacchi o indebolimenti della preparazione/pellicola pittorica.

-Le abrasioni sono diffuse su tutta l'opera, non sono presenti grandi aree soggette a distacchi mentre, in particolare nel viso della santa e nel vestito della vergine, si nota uno strato preparatorio molto sottile (ulteriori dati si otterranno confrontando la fig. 6 con l'omologa ripresa nello spettro dell'infrarosso).

Le indagini nello spettro dell'infrarosso sono state ottenute con vari modelli di fotocamera, una Epson Photo PC 850Z, comoda per la sua capacità di rimuovere il filtro IR-Cut tramite comando elettronico, senza aprire la fotocamera, una Canon 1000D ed una Nikon D90 entrambe modificate tramite la rimozione dei filtri IR-Cut di fabbrica. Ampliando quindi lo spettro di ricezione, per ottenere le immagini di confronto nel visibile, sono stati utilizzati quindi i filtri B+W486 e 489 per riportare la risposta spettrale unicamente alla radiazione visibile.

Per ottenere una cospicua radiazione nelle lunghezze dell'infrarosso si è preferito utilizzare lampade a filamento, ponendo la massima attenzione nel ridurre al minimo la permanenza sotto il fascio luminoso (e conseguente riscaldamento). Ulteriore precauzione è stata quella di misurare, tramite un luxometro l'intensità dell'irraggiamento, mantenendola entro valori contenuti.

Le immagini sono state poi unite nella creazione dei falsi colori oppure convertiti in scala di grigi per favorire la lettura della sola resa nell'infrarosso; in quest'ultimo caso una lieve postproduzione ha portato l'esposizione delle immagini a valori medi simili, in modo da facilitare ulteriormente il confronto tra le diverse frequenze di taglio (720, 760, 850, 900 e 1000 nanometri).

Il falso colore invece, in particolare nelle riprese di alcuni dettagli, ha evidenziato aree di passati restauri dove l'impiego di pigmenti differenti, a portato a differenti rese cromatiche all'interno di campiture di colore altrimenti uniformi.

La transirradianza infrarossa in particolare ha rilevato alcune caratteristiche del cretto ed è stata in grado di rendere maggiormente individuabili le aree interessate da distacchi dove i depositi di sporco od i restauri hanno ridotto la leggibilità) ed ha evidenziato anche la struttura della tela di rinfodero.

Non sono stati trovati disegni preparatori sottostanti lo strato pittorico ed anche scarsi sono stati i ritrovamenti di pentimenti dell'autore, a parte la maggiore leggibilità di una mano poi coperta ma comunque riconoscibile anche nella riflettografia del visibile.

La scarsa differenza tra le immagini della riflettografia IR nei primi 1000nm non è rara, ed esclude la presenza di pigmenti che abbiano una risposta spettrale non uniforme nello spettro infrarosso, altrimenti si evidenzerebbero dei cambi di tonalità

nell'arco della serie. In ultima analisi, risultano con una maggiore riflessione nell'IR le aree sottoposte agli ultimi restauri, si noti in particolare l'area attorno alla colomba, non distinguibile nel visibile.

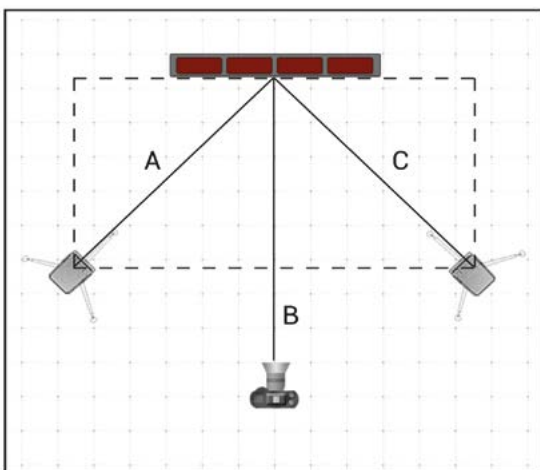


Fig. 1 (pagine a fronte)

Sacra famiglia, confronto tra l'immagine a colori derivante dalle filtrature a 720nm (A), 760nm (B), 850nm (C), 950 (D)

L'esposizione delle singole immagini varia a causa della riduzione della sensibilità del CCD alle lunghezze d'onda maggiori. Per indicare a sommi capi le differenze, l'immagine A è stata scattata ad 1/6" f.13, la D ad 1" f.8







Fig. 2 Sacra famiglia. Riflettografia IR, filtro Massa 720nm



Fig. 3 Sacra famiglia. Riflettografia IR, filtro Massa 760nm



Fig. 4 Sacra famiglia. Riflettografia IR, filtro Massa 850nm



Fig. 5 Sacra famiglia. Riflettografia IR, filtro Massa 950nm



Fig. 6,7,8 Sacra famiglia, particolare

Camera Epson 850Z filtro Massa 720nm

Confronto tra immagini ottenute nel visibile, IR 720 nm ed IR Falso colore.

Anche in questo caso non sono presenti pentimenti, unicamente appaiono le aree sottoposte a restauro (manto della vergine e palma della santa) con pigmenti aventi uguale spettro di riflessione nel visibile e differente nell'IR.

Camera Epson 850Z

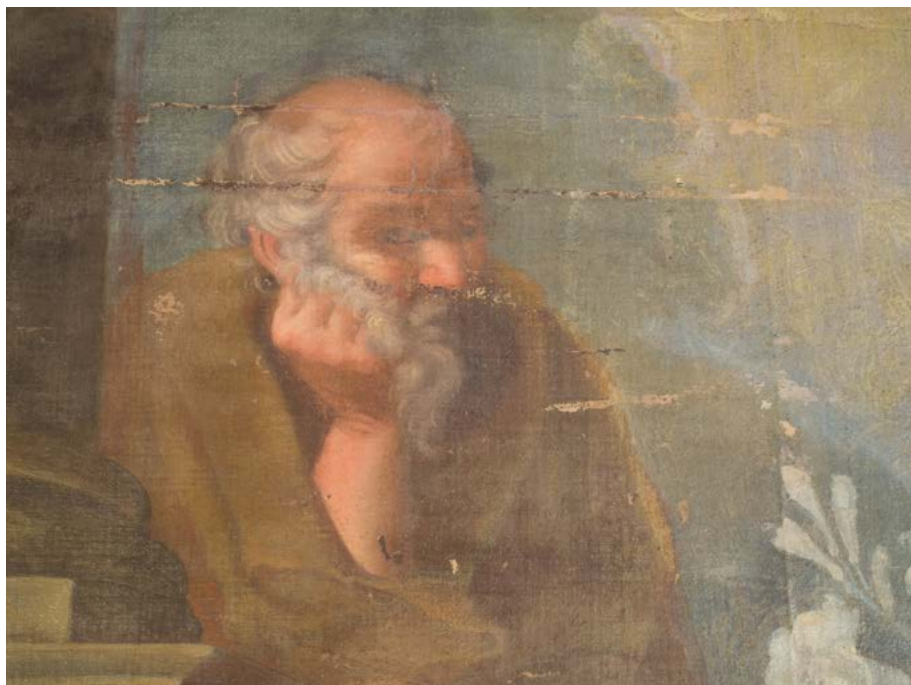


Fig. 9 Immagine in luce diffusa, Sacra famiglia, particolare  
Nikon D90 modificata e filtri B+W 486 e 489



Fig. 10 Immagine in luce diffusa, Sacra famiglia, particolare  
Nikon D90 modificata e filtro Massa 950

In questo caso la rifotografia ha evidenziato il particolare disegno degli occhi del San Giuseppe, la presenza di campiture più scure sul manto, in particolare all'altezza del polso. Inoltre appare più riconoscibile una struttura architettonica a destra della colonna, nel visibile coperta in buona parte dal cielo.



Fig. 11 Immagine in luce diffusa, Sacra famiglia, particolare  
Nikon D90 modificata e filtri B+W 486 e 489.



Fig. 12 Immagine in luce diffusa, Sacra famiglia, particolare  
Nikon D90 modificata e filtro Massa 950.

In questo altro caso, oltre alle aree sottoposte agli ultimi restauri, appare una differente foggia del manto all'estrema sinistra, appartenente al vestito della Vergine.

**Set fotografico alla Chiesa di S.Girolamo di Urbino**

- OPERA: Sacra Famiglia, Olio su tela, 262,3x135,4cm
- LAMPADE ALOGENE: Leonardo Virgola 400w 50Hz (x2)
- STATIVI LUCI: Manfrotto 004B (x2)
- TREPIEDE CAMERA: Manfrotto 055XPro con testa micrometrica

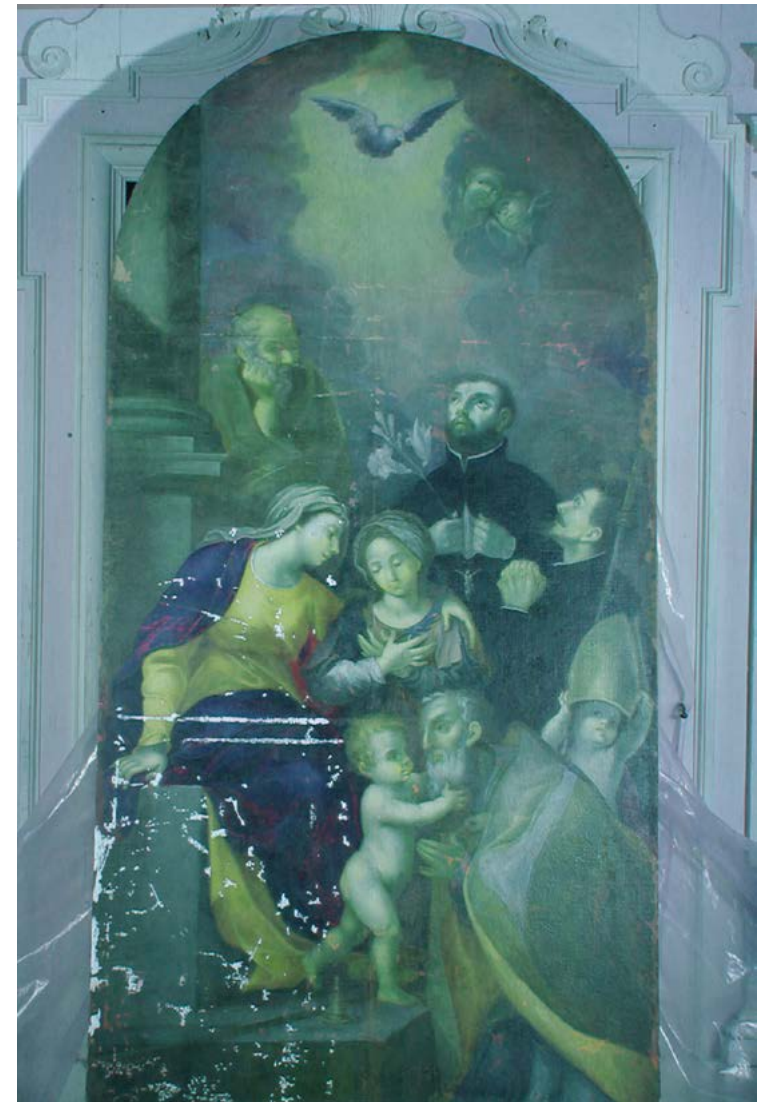
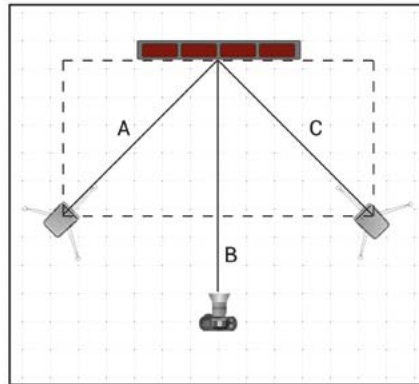


Fig. 13 (pagina a fronte) Sacra famiglia  
Infrarosso falso colore (IRFC),  
Camera: Epson 850Z, filtro Massa 720.



Fig. 14 Immagine in luce diffusa, Sacra famiglia, particolare  
Camera: Epson 850Z, filtro B+W 486

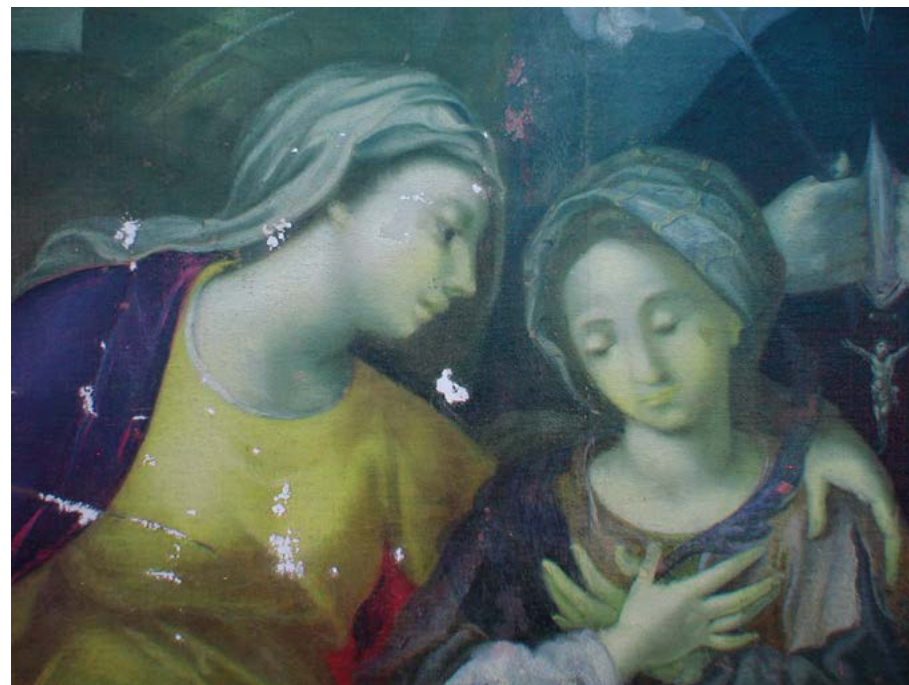


Fig. 15 Immagine in IRFC, Sacra famiglia, particolare  
Camera: Epson 850Z, filtro Massa 720

In questo caso, come nelle riflettografie infrarosse, le aree sottoposte a restauro, più riflettenti nell'infrarosso vicino rispetto alle aree non restaurate appaiono con una dominante rossastra. In particolare viene evidenziato il manto della vergine (la parte sotto la spalla sinistra appare influenzata ancora più della parte sinistra dalla dominante). In pari grado si evidenzia un'area con pigmenti differenti nella palma della santa.



Fig. 16 Immagine in luce diffusa, Sacra famiglia, particolare  
Camera: Epson 850Z, filtro B+W 486

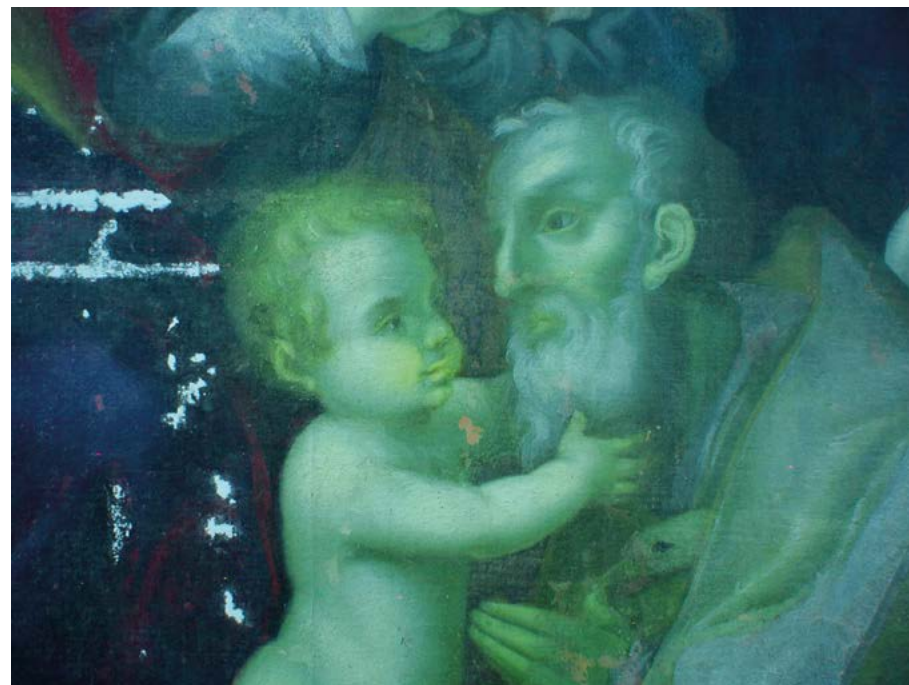


Fig. 17 Immagine in luce diffusa, Sacra famiglia, particolare  
Camera: Epson 850Z, filtro Massa 720.

Anche nel falso colore si evidenzia una parte del manto della Vergine con una differente riflettanza nell'IR, altrimenti non visibile, una piccola area di restauro sul braccio destro del Bambino e nella mano sinistra del Santo



### Set fotografico alla Chiesa di S.Girolamo di Urbino

- OPERA: Sacra Famiglia, Olio su tela, 262,3x135,4cm
- LAMPADE ALOGENE: Leonardo Virgola 400w 50Hz (x2)
- STATIVI LUCI: Manfrotto 004B (x2)
- TREPIEDE CAMERA: Manfrotto 055XPro con testa micrometrica

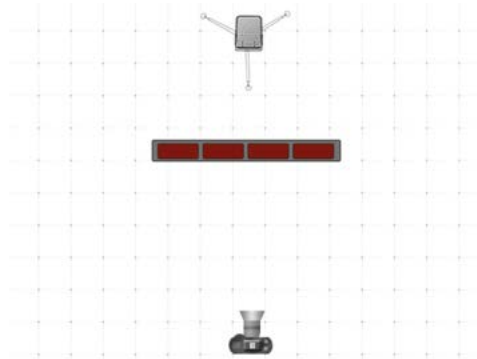


Fig. 18 Sacra famiglia, particolare

Nikon D90 modificata e filtro Massa 850.

È stato utilizzato un filtro da 850nm che rappresenta un buon compromesso tra la filtratura dell'infrarosso ed una ancora accettabile sensibilità del sensore, evitando di allungare eccessivamente i tempi di scatto. In questa immagine, oltre alla traversa (non perfettamente nera in quanto c'è una componente di luce diffusa frontale, legata alla luce del sole e la scarsa potenza delle lampade) evidenzia la trasparenza agli infrarossi del vestito della vergine, assieme alla forma del cretto.

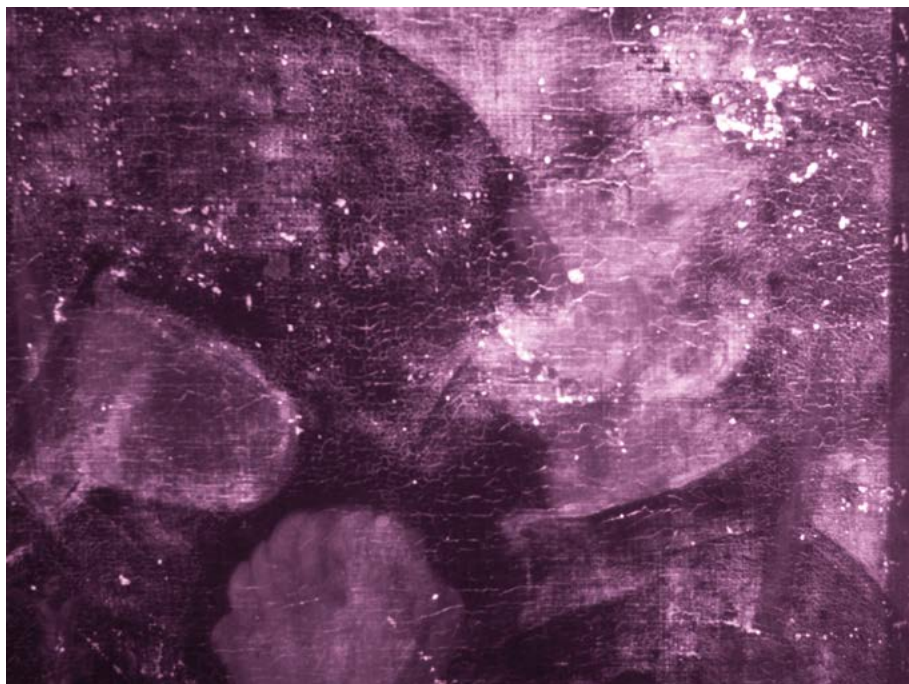


Fig. 19 Sacra famiglia, particolare  
Nikon D90 modificata e filtro Massa 850.

In questo particolare del santo orante si può notare come la figura del santo sia parzialmente giustapposta al mantello dell'altra figura, come dimostrato dalla minore trasparenza del volto in corrispondenza del naso. Similmente si può pensare che anche le mani, aventi un tono simile a quello del naso, siano giustapposte alla figura di fondo, a causa della particolare tecnica esecutiva oppure ad un'aggiunta non preventivata in fase di preparazione.

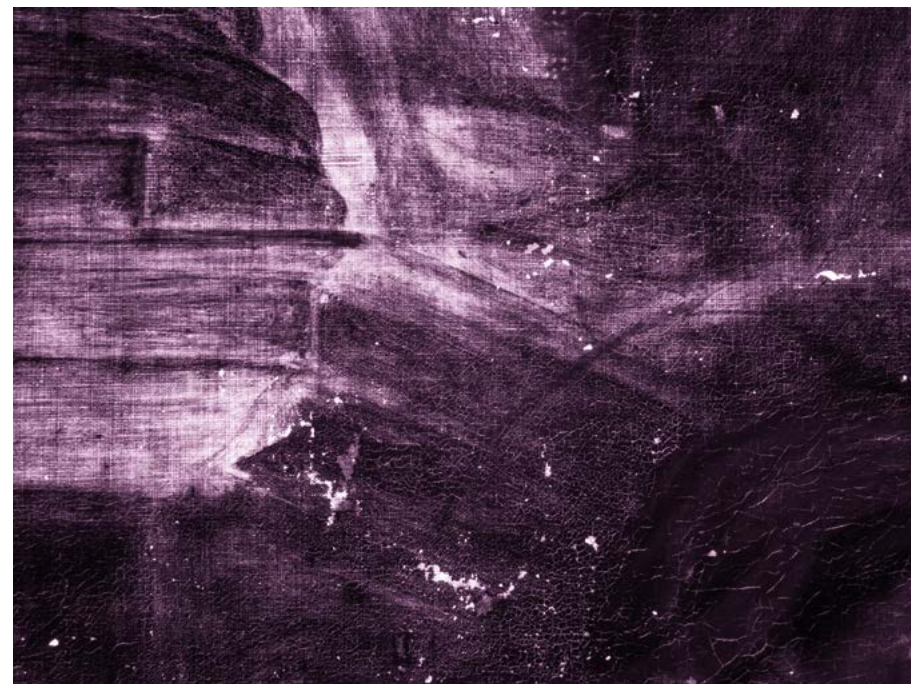


Fig. 21 Sacra famiglia, particolare  
Nikon D90 modificata e filtro Massa 850.

Questo dettaglio della struttura architettonica sulla quale si appoggia San Giuseppe, se confrontata all'immagine dello spettro visibile, mostra una foggia lievemente diversa della mensola, nonché una probabile scarsità della preparazione nella parte inferiore, quasi uniforme nel visibile ma caratterizzata da una grande trasparenza nel prospetto frontale. In ultimo risulta come l'aureola della vergine, tracciata in bianco risulti qui molto scura a causa dell'opacità del pigmento bianco agli IR.



Fig. 22 Sacra famiglia, particolare  
Nikon D90 modificata e filtri B+W 486 e 489

Per effettuare le indagini della fluorescenza le lampade utilizzate sono state due bulbi ai vapori di mercurio, il loro spettro di emissione si concentra nell'ultravioletto ma la produzione di radiazioni nello spettro del visibile richiede l'uso di filtri giallo chiari per schermarne l'effetto. Per la riflettografia ultravioletta invece la radiazione diretta alla fotocamera è stata schermata da un filtro VIS-Cut (B+W 403) in grado di schermare la fluorescenza nel visibile ed evidenziare unicamente la riflessione della radiazione ultravioletta.

L'indagine della fluorescenza UV e della riflettografia (fig. 27) identifica in maniera puntuale le zone soggette agli interventi di reintegrazione. Non vi è la presenza di una forte fluorescenza diffusa, al seguito, si presume, della pulizia svolta durante questi interventi di restauro. Per potere avere dati certi, oltre alla mappatura delle aree pulite, occorrerebbe disporre di immagini della fluorescenza pre restauro, in modo da poter confrontare le differenti intensità della fluorescenza. Una notevole fluorescenza proviene dalle stucature moderne all'altezza del bacino della Vergine e sul suo abito (ulteriormente evidenziata dalla riflettografia ultravioletta). Significativa risulta essere anche la totale assenza di fluorescenza al di sopra della colomba, area che nelle immagini riprese in luce visibile non mostra discordanze cromatiche particolari con le aree circostanti, indice quindi o di una totale abrasione della pellicola protettiva oppure, come documentato nella scheda dei restauri, delle aree soggette a reintegro.

Alla luce di questa informazione è possibile inferire come anche le altre aree caratterizzate da una bassissima fluorescenza ed uniformi nella ripresa visibile, siano proprio le zone soggette alle operazioni di reintegro legate all'ultimo restauro, permettendo quindi di avere una mappatura dei lavori.

**Attrezzatura utilizzata:** Canon EOS 5D Mark II;  
 Obiettivo 70-200 mm e 50 mm (cambio obiettivo dovuto a diametro filtri);  
 2 Lampade UV  
 Scatto remoto wireless;  
 treppiede Manfrotto 055XPro con testa micrometrica;  
 filtro HOYA X.O.;  
 filtro HOYA SEPIA A;  
 filtro 022 B+W;  
 filtro 415 B+W;  
 filtro 403;  
 teli e pannelli neri;

**Distanza opera/macchina:** 5,70 m;  
**Altezza macchina:** ca 1,25 m;  
**Altezza lampade UV:** ca 1,35 m.

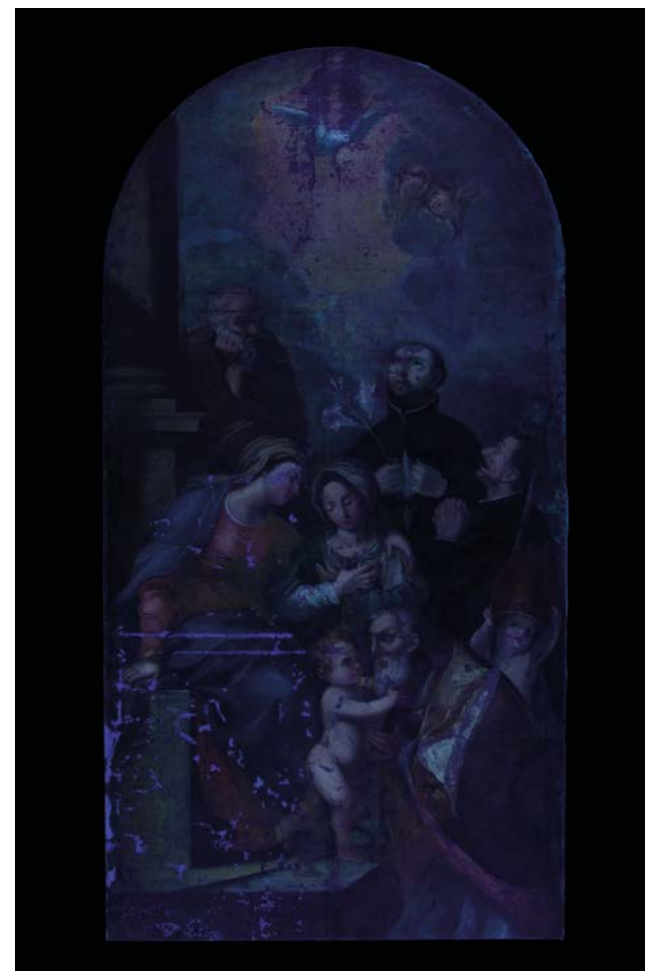
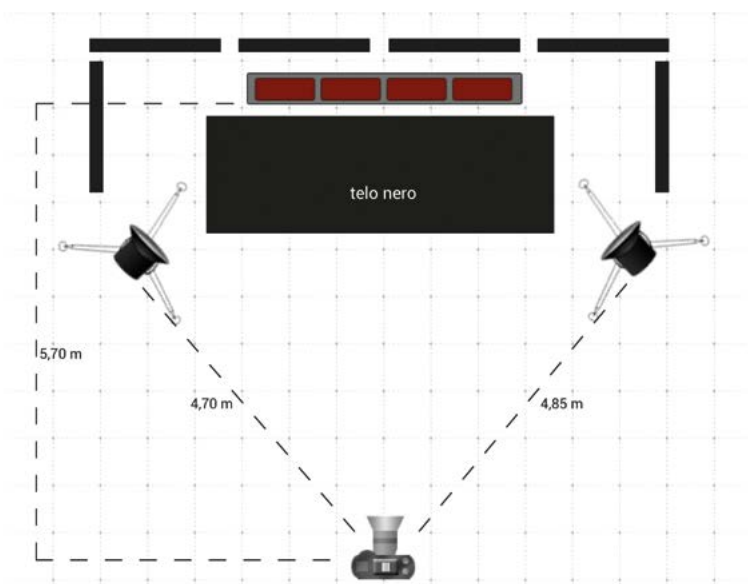


Fig. 24 Sacra famiglia, filtro B+W 415



Fig. 25 Sacra famiglia, Sacra famiglia, filtro B+W 022



Fig. 26 Sacra famiglia, filtro Hoya X0

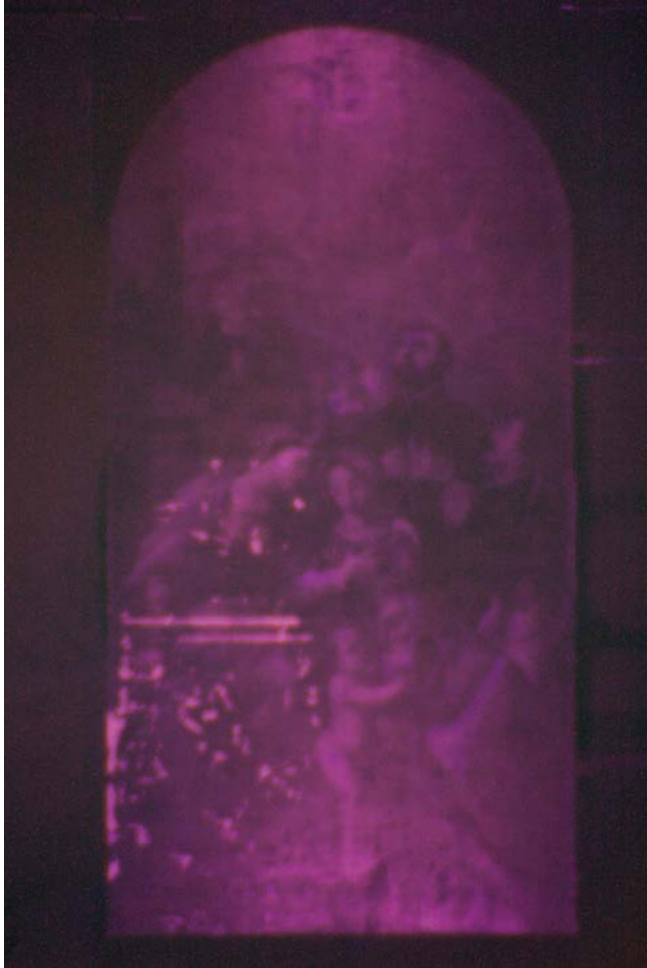


Fig. 27 Sacra famiglia, filtro B+W 403

## BIBLIOGRAFIA

AA. vv. *The AIC Guide to digital photography and conservation documentation*, Jeffrey Warda, Washington, 2011.

Canevari C. Marconi M. *Fotografia di strumenti musicali*, Il Prato, Padova, 2010.

Cardinali M. De Ruggieri M. B. Falcucci C. *Diagnostica Artistica, Tracce materiali per la storia dell'arte e per la conservazione*, Palombi, Roma, 2007.

Carpiceci M., *Fotografia digitale e architettura*, Aracne editrice, Roma, 2011

ICCD, *Normativa per la documentazione fotografica delle schede di catalogo*, ICCD, Roma 1998.

Ludwig N. *Dispense corso termografia*, UniMi.

Matteini M. Moles A. *Scienza e restauro, Metodi di indagine*, Nardini, Fiesole, 2003.

MIBAC, *Atti di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei*, D. Lgs. 112/98.

Myers D. *SpectraShop 5, Operation guide*, 2015.

Oleari C. (a cura di), *Colorimetria e beni culturali, Atti dei convegni Firenze 1999 e Venezia 2000*, Società di ottica e fotonica, Firenze, 2000.

Palazzi S. *Colorimetria, la scienza del colore nell'arte e nella tecnica*, Nardini, Fiesole, 1995.

Torre M. *Dispense corso diagnostica*, ISIA Urbino.

Wagner G. *Fotografia con l'infrarosso*, Cesco Ciapanna editore, Roma, 1980.



Trieste, febbraio 2016