

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Scuola di Scienze  
Corso di Laurea Quadriennale in Fisica

Le onde elettromagnetiche  
per la diagnostica non distruttiva  
sui Beni Culturali

Relatore:  
Prof. Maria Pia Morigi

Presentata da:  
Maria Pia Viselli

Sessione III  
Anno Accademico 2013/2014



## **Abstract**

La mole di reperti e manufatti definiti, al momento, dalla legge come “bene culturale” è immensa e in continua espansione.

La definizione di bene culturale copre un'infinità di oggetti, di variabili datazioni, materiali e dimensioni ed è ovvio immaginare che la quantità di manufatti da conservare e restaurare andrà, col tempo, ampliandosi essendo logico supporre che, con l'evolversi del genere umano, gli oggetti attualmente di uso e consumo andranno ad aggiungersi a quanto già viene conservato e tutelato diventando anch'essi reperti storici.

La necessità di conoscere quanto più possibile del bene e di massimizzarne la durata mantenendo al contempo la sua integrità e una sua accessibilità al pubblico ha portato alla ricerca di soluzioni sempre più efficaci per adempiere allo scopo.

Il fortunato evolversi della tecnologia ha ben risposto a questa richiesta permettendo l'utilizzo di una grande quantità di strumenti per far fronte alle più varie necessità del restauratore, dello studioso e del conservatore che cercano risposte sull'oggetto in esame volendo al contempo incidere il meno possibile sul bene stesso.

Al momento di questa trattazione ci troviamo di fronte ad un'enorme quantità di dati ottenibili dalle più svariate forme di indagine.

Ciò che tuttavia accomuna molti degli strumenti di indagine non distruttiva utilizzati da chi lavora nel campo dello studio, della conservazione e del restauro è il basarsi sull'impiego delle onde elettromagnetiche nelle diverse bande spettrali.

Questa trattazione ha quindi lo scopo di fare il punto su quali tipologie, con quali metodi e con quali risultati le onde elettromagnetiche rispondono alle esigenze della conservazione e dello studio dei beni culturali.



# Indice

<b>Introduzione</b>	1
<b>1 Cenni preliminari</b>	3
1.1 Lo spettro elettromagnetico	3
1.2 Interazione fra radiazione e materia	6
1.2.1 Riflessione, rifrazione, diffusione	7
1.2.2 Irraggiamento	8
1.2.3 Grandezze associate all'energia radiante	8
<b>2 Microonde</b>	11
2.1 Il GPR	12
<b>3 Infrarossi (IR)</b>	19
3.1 Termografia	19
3.2 Riflettografia IR	25
3.3 Infrarosso in falso-colore	29
<b>4 Luce visibile</b>	33
4.1 La fotografia	34
4.1.1 La fotografia in luce diffusa	34
4.1.2 La fotografia a luce radente	35
4.1.3 La macro e microfotografia	36
4.1.4 Transilluminazione	39
4.2 La spettrofotometria di riflettanza nel visibile	41
4.2.1 Telefotometria	42
4.3 Il laser	45

<b>5</b>	<b>Ultravioletti</b>	49
5.1	La fluorescenza UV	50
<b>6</b>	<b>Raggi X</b>	55
6.1	Componente di Bremsstrahlung	56
6.2	Radiazione caratteristica	57
6.3	Interazione con la materia	60
6.3.1	Rayleigh scattering	60
6.3.2	Effetto fotoelettrico	60
6.3.3	Compton scattering	62
6.4	Fluorescenza X	63
6.5	Radiografia a raggi X	69
6.6	Tomografia a raggi X	76
	<b>Conclusioni</b>	81
	<b>Bibliografia</b>	85

## Introduzione

L'attuale legislazione italiana all'art.2 c.2 D. Lgs. n. 42 del 2004 Codice dei beni culturali e del paesaggio dà la seguente definizione di bene culturale: “Sono beni culturali le cose immobili e mobili che, ai sensi degli articoli 10 e 11, presentano interesse artistico, storico, archeologico, etnoantropologico, archivistico e bibliografico e le altre cose individuate dalla legge o in base alla legge quali testimonianze aventi valore di civiltà”.

In un così ampia definizione si collocano un gran numero di manufatti di ogni tipo per materiale, datazione e dimensione. Se si pensa ai più celebri reperti storici noti al grande pubblico come la Grande Sfinge di Giza, un colosso di pietra in cui solo la testa misura quattro metri di larghezza, risalente al 2500 a.C. circa, a prodotti estremamente più piccoli come le ceramiche greche passando per tutti i manufatti bellici, sino ad arrivare ad espressioni artistiche straordinarie di cui il David di Michelangelo e la Gioconda di Leonardo rappresentano solo la punta dell'iceberg, ci si rende conto che si copre una varietà pressoché infinita di casi.

Prendendo in esame solo il territorio italiano ci si trova davanti a manufatti che possono avere datazioni che vanno dalla preistoria ai giorni nostri, possono essere di enormi dimensioni, come le città di Ercolano e Pompei, o avere uno spessore di qualche micron come una scritta.

Essendo manufatti possono essere di un qualsivoglia materiale che l'essere umano è stato in grado di manipolare: dalle pietre, ai metalli, ai materiali organici e, come se non bastasse, anche lo stato di conservazione può essere di una variabilità quasi infinita: dal bene arrivato integro ai giorni nostri, a quello che ha subito manomissioni e riutilizzi impropri (un esempio celebre è il Colosseo), senza contare il degrado dato dal tempo e dalle condizioni ambientali.

Sia lo studioso, che si accinge allo studio del manufatto, che il restauratore/conservatore, chiamato al difficile compito di ripristinare per quanto possibile il bene, ma soprattutto di salvaguardarne il più possibile la durata, si trovano davanti alla necessità di raccogliere preventivamente il maggior numero possibile di informazioni sul bene in oggetto, senza variarne la struttura.

Disporre di validi strumenti di diagnostica e intervento il più possibili non lesivi, ovvero non distruttivi, diventa un'esigenza importante, per non dire essenziale.

La Fisica nel corso di tutta la sua evoluzione si è trovata a rispondere alle più svariate necessità del genere umano comprendendo e per quanto possibile modellando e sfruttando tutte quelle infinite “abilità” che l'universo sfrutta da sempre.

Le onde elettromagnetiche, che usiamo ampiamente nella vita di tutti i giorni, nelle frequenze che vanno dalle microonde ai raggi X, possono dare un valido contributo alla conoscenza del manufatto con una diagnostica puntuale e soprattutto non distruttiva.

Lo scopo di questa trattazione è quello di fare un punto su tutti quegli strumenti e sui metodi, basati sulle onde elettromagnetiche, che, fino ad oggi, vengono utilizzati nell'ambito dello studio e della conservazione dei beni culturali.

Il capitolo 1 ha lo scopo di offrire una serie di cenni preliminari relativi all'elettromagnetismo e all'interazione fra radiazione e materia, che serviranno come base teorica per il resto della trattazione.

I capitoli dal 2 al 6, suddivisi in base alle bande dello spettro elettromagnetico hanno lo scopo di illustrare quali strumentazioni, basate su quella specifica banda dello spettro, sono disponibili al momento, il loro funzionamento e i risultati ottenibili nella loro applicazione nel campo dei beni culturali.

Infine vengono trattate alcune conclusioni sull'utilizzo attuale che queste strumentazioni hanno nell'ambito dei beni culturali sul territorio italiano.



# Capitolo 1

## Cenni preliminari

### 1.1 Lo spettro elettromagnetico

Le onde hanno origine da una sorgente, in cui si produce la perturbazione; questa può consistere in una vibrazione di un corpo materiale che mette in movimento le molecole di un mezzo o in un movimento di cariche elettriche (onde elettromagnetiche).

Nel caso delle onde elettromagnetiche la sorgente è un sistema di cariche opportunamente accelerate che producono un campo elettrico  $E(x, y, z, t)$  e un campo magnetico  $B(x, y, z, t)$  correlati tra loro, i cui effetti si manifestano in tempi successivi a distanze sempre maggiori dalla sorgente.

Il campo elettrico e il campo magnetico sono mutuamente perpendicolari e oscillano in fase fra loro perpendicolarmente alla direzione di propagazione.

$E(x, y, z, t)$  e  $B(x, y, z, t)$  costituiscono le funzioni d'onda che descrivono l'onda elettromagnetica.

I parametri che caratterizzano un'onda elettromagnetica sono:

- la *lunghezza d'onda* (indicata con la lettera  $\lambda$ ), la distanza fra due picchi o valli consecutivi dell'onda;
- la *frequenza* (indicata con la lettera  $\nu$ ), definita come il numero di cicli che per ogni secondo passano attraverso un dato punto nello spazio;
- l'*ampiezza* (indicata con la lettera  $A$ ) che rappresenta il massimo valore che viene raggiunto dall'oscillazione;
- la *velocità di propagazione* (indicata con la lettera  $v$ ), che dipende soltanto dal mezzo in cui si propaga la radiazione. Nel vuoto, per esempio, è pari alla velocità della luce, tale velocità si indica con la lettera  $c$  ed è uguale a 299792,458 km/s.

Le onde elettromagnetiche sono classificate secondo la lunghezza d'onda o in base ai valori della frequenza; lunghezza d'onda e frequenza sono inversamente proporzionali e fra loro e legati dalla relazione

$$\lambda \cdot \nu = c$$

L'intera gamma delle lunghezze d'onda/frequenze costituisce lo spettro elettromagnetico.

Lo spettro elettromagnetico, se pur senza soluzione di continuità, è convenzionalmente diviso in bande in base alla frequenza.

Il nome di ogni banda identifica quindi in modo univoco le caratteristiche dell'onda elettromagnetica in quell'intervallo.

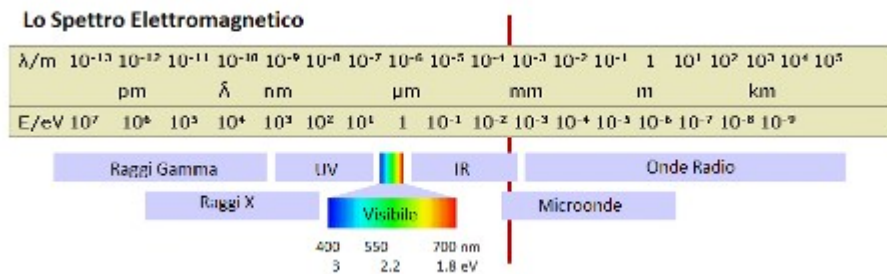


Fig. 1.1: Suddivisione dello spettro elettromagnetico.

Tipo di radiazione elettromagnetica	Frequenza	Lunghezza d'onda
Onde radio	$\leq 300\text{MHz}$	$\geq 1\text{m}$
Microonde	$300\text{MHz} \div 300\text{GHz}$	$1\text{m} \div 1\text{mm}$
Infrarossi	$300\text{GHz} \div 428\text{THz}$	$1\text{mm} \div 700\text{nm}$
Luce visibile	$428\text{THz} \div 749\text{THz}$	$700\text{nm} \div 400\text{nm}$
Ultravioletti	$749\text{THz} \div 30\text{PHz}$	$400\text{nm} \div 10\text{nm}$
Raggi X	$30\text{PHz} \div 300\text{EHz}$	$10\text{nm} \div 1\text{pm}$
Raggi gamma	$\geq 300\text{EHz}$	$\leq 1\text{pm}$

Tutti i fenomeni elettrici e magnetici (spettro elettromagnetico) sono descritti dalle equazioni di Maxwell.

Un'onda elettromagnetica che si propaga in un *mezzo semplice* è legata a

parametri costituenti il mezzo di propagazione che sono: la *permettività* (indicata con la lettera  $\epsilon$ ), la *permeabilità* (indicata con la lettera  $\mu$ ) e la *conduttività del mezzo* (indicata con la lettera  $\sigma$ ).

L'unità di misura di  $\epsilon$  è F/m, equivalente ad una capacità per unità di lunghezza.

L'unità di misura di  $\mu$  è H/m, equivalente ad un'induttanza per unità di lunghezza.

L'unità di misura di  $\sigma$  è S/m, equivalente a una conduttività per unità di lunghezza.

I parametri sopra descritti sono relativi a un'onda elettromagnetica che si propaga in un unico mezzo con proprietà costanti.

La radiazione elettromagnetica possiede la peculiarità di comportarsi anche come un fascio di particelle.

Per la maggior parte dei fenomeni, il comportamento della radiazione elettromagnetica può essere spiegato sia tramite la teoria ondulatoria che tramite la teoria corpuscolare, ma in alcuni casi solo una delle due teorie può spiegare il fenomeno. In tal caso, fisicamente si devono comunque mantenere entrambi i modelli, per cui si parla di dualismo onda-particella.

E' possibile quindi pensare alla radiazione come costituita da fasci di particelle dette fotoni, aventi un'energia E:

$$E = h \cdot \nu$$

dove  $h$  rappresenta la costante di Planck e vale  $6,626196 \cdot 10^{-34}$  J·s.

L'energia viene solitamente misurata in elettronvolt (eV).

Nel campo del visibile, diversi valori di energia corrispondono a diversi colori e l'intensità della radiazione identifica la luminosità dell'immagine.

Il numero di fotoni che costituiscono il fascio determina l'intensità della radiazione.

A seconda che si faccia riferimento al modello ondulatorio o corpuscolare il colore e l'intensità sono correlati a diverse entità fisiche: nel modello ondulatorio, il colore è legato alla lunghezza d'onda e l'intensità (luminosità) all'ampiezza dell'onda; mentre nel modello corpuscolare, il colore è legato all'energia e l'intensità (luminosità) al numero di fotoni.

Quando un'onda, lungo il suo percorso, attraversa mezzi diversi o interferisce con altre onde subisce delle perturbazioni.

Ogni materiale dà risposte specifiche in base all'onda con cui interagisce, per cui, conoscendo le caratteristiche dell'onda elettromagnetica alla sorgente e analizzando l'onda risultante a seguito dell'interazione con il materiale in esame, è possibile determinare, in modo non distruttivo, le caratteristiche fisiche del materiale attraversato dall'onda.

## 1.2 Interazione fra radiazione e materia

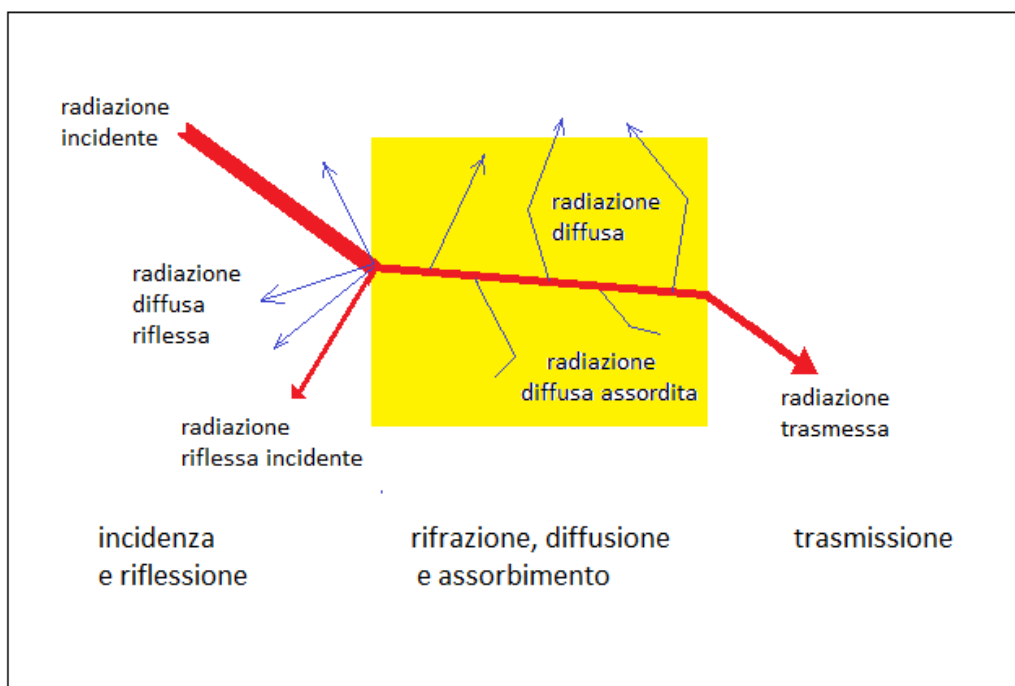


Fig. 1.2: Schema esplicativo delle interazioni che può subire un'onda elettromagnetica al suo passaggio attraverso un materiale.

Quando una radiazione elettromagnetica attraversa la materia può interagire con essa secondo varie modalità.

L'interazione avviene essenzialmente mediante scambio di energia.

Gli effetti di questo scambio dipendono sia dall'energia della radiazione che dal mezzo considerato.

In termini macroscopici, l'interazione fra radiazione elettromagnetica e materia è ciò che avviene di un fascio di radiazioni di intensità/energia nota incidente sulla

materia oggetto di indagine.

Lo studio consiste nell'analizzare la riemessa sotto forma di quantità, di frequenza e di direzione e verso.

Si può quindi affermare che quando la radiazione incidente viene impiegata nei vari processi può andare incontro a fenomeni quali: la *rifrazione*, la *riflessione*, la *diffusione*, l'*assorbimento* e la *trasmissione*.

Questi fenomeni dipendono dai materiali su cui incide la radiazione e dal loro stato fisico.

### ***1.2.1 Riflessione, rifrazione, diffusione***

La *radiazione riflessa incidente* è il fenomeno per cui la radiazione incidente, che si propaga lungo l'interfaccia tra differenti mezzi, cambia di direzione a causa di un impatto con un materiale riflettente.

La *radiazione riflessa* consiste nella riflessione osservata quando una singola radiazione incidente, che forma un angolo  $\theta_i$  con la normale, produce una singola radiazione riflessa con angolo  $\theta_r$  rispetto alla normale con il verificarsi dell'uguaglianza  $\theta_i = \theta_r$ , in accordo con la legge di riflessione.

Radiazione incidente, normale e radiazione emergente giacciono sullo stesso piano.

La *rifrazione diffusa riflessa* da parte di una superficie è una riflessione non speculare, in cui cioè un raggio che incide sulla superficie non viene rimandato indietro con un angolo determinato, ma viene diffuso su molte direzioni che possiamo descrivere come casuali.

La diffusione (dispersione) in inglese *scattering*, si riferisce a un'ampia classe di fenomeni in cui la radiazione viene deflessa cambiando traiettoria a causa della collisione con altre particelle o onde. La deflessione avviene in maniera disordinata e in buona misura casuale (il significato letterale di scattering è "sparpagliamento") e per questo la diffusione si distingue dalla riflessione e dalla rifrazione, che invece cambiano le traiettorie in maniera regolare e determinata.

### 1.2.2 Irraggiamento

Per *irraggiamento* si intende il trasferimento di energia tra due corpi a mezzo di onde elettromagnetiche.

Fisicamente l'irraggiamento consiste nell'emissione di radiazioni elettromagnetiche generate dagli atomi eccitati dall'agitazione termica, che si diseccitano emettendo fotoni di frequenza proporzionale alla loro temperatura.

Per esempio, i corpi a temperatura ambiente emettono in prevalenza fotoni nella gamma degli infrarossi, corpi molto freddi irradiano microonde (quelli vicini allo zero assoluto semplici onde radio), mentre i corpi molto caldi arrivano ad emettere luce visibile, dapprima rossa (la temperatura del cosiddetto *calor rosso* è circa 700°C) poi sempre più bianca (la temperatura del *calor bianco* è circa 1200°C). Man mano che la temperatura aumenta, la frequenza della luce emessa aumenta fino al bianco-azzurro, per poi passare ai raggi ultravioletti e ai raggi X.

### 1.2.3 Grandezze associate all'energia radiante

L'*energia radiante incidente* su una superficie è misurata dalla grandezza nota come irraggiamento; essa si scompone in tre termini: una parte viene *riflessa*, una parte viene *assorbita* e una terza parte riesce, eventualmente, a passare attraverso la superficie e viene definita *trasmessa*.

Per questo motivo si stabiliscono tre coefficienti:

- coefficiente di riflessione o *riflettanza*:  $\rho$  = energia riflessa/energia incidente;
- coefficiente di assorbimento o *assorbanza*:  $\alpha$  = energia assorbita/energia incidente;
- coefficiente di trasparenza o *trasmittanza*:  $\tau$  = energia uscente/energia incidente. La  $\tau$  è anche funzione dello spessore del materiale.

Per la legge della conservazione dell'energia, considerando *energia radiante incidente* = 1 si ha:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Poiché le quantità  $\rho$ ,  $\alpha$  e  $\tau$  sono funzioni della lunghezza d'onda, oltre che della temperatura, vengono definite *riflettanza*, *assorbanza* e *trasmissione spettrale*.

A seconda dei casi, può essere utile tenere conto della loro dipendenza angolare dalla direzione della radiazione incidente rispetto alla superficie, tipico esempio limite è la riflessione speculare.

Quindi per analizzare in maniera completa una sorgente di energia raggiante possiamo definire tre grandezze:

1. *l'emittanza globale* che caratterizza l'irraggiamento in modo globale;
2. *l'emittanza monocromatica* che tiene conto della lunghezza d'onda  $\lambda$ ;
3. *l'emittanza angolare spettrale* che descrive la distribuzione spaziale della radiazione.

Si possono quindi definire i seguenti coefficienti:

1.  $J = dP / dS$  potenza irradiata per unità di superficie;
2.  $\epsilon = dP / d\lambda \cdot dS$  considerando la lunghezza d'onda;
3.  $j = dP / d\Omega \cdot d\lambda \cdot dS$  considerando l'angolo solido  $\Omega$  a tra la sorgente e la superficie irradiata.

I coefficienti definiti sopra dipendono quindi: dalla temperatura,  $T$ , dalla lunghezza d'onda e dagli angoli di incidenza della radiazione.





## Capitolo 2

### Microonde

Nel capitolo precedente è stata introdotta la definizione di spettro elettromagnetico sia dal punto di vista della teoria ondulatoria che da quella corpuscolare. Si è inoltre analizzata l'interazione tra radiazione e materia.

La diagnostica non distruttiva dei beni culturali utilizza solo una parte dello spettro ed è l'intervallo che comprende come estremi le microonde e i raggi X. La capacità di penetrazione o meglio di superamento degli ostacoli è direttamente proporzionale alla lunghezza d'onda. Questo limite è superato dai raggi X in quanto hanno un'enorme energia e una lunghezza d'onda paragonabile alla distanza interatomica.

La figura sottostante mostra la sezione di un dipinto su supporto ligneo in cui le radiazioni raggiungono strati diversi in base alla propria lunghezza d'onda.

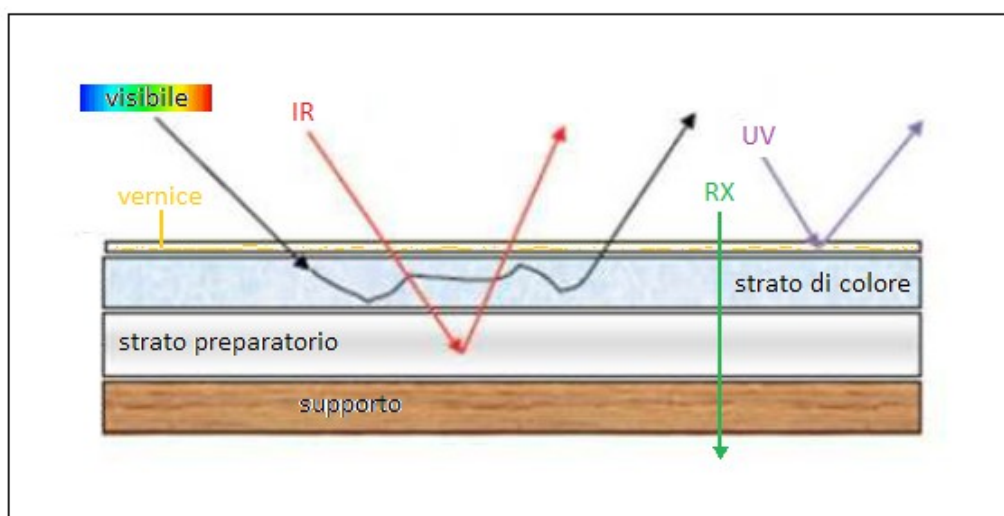


Fig. 2.1: Interazione delle onde elettromagnetiche con la superficie pittorica da analizzare in base alla loro tipologia.

Le microonde, comunemente note a tutti per il forno presente nelle nostre cucine, sono onde elettromagnetiche con lunghezza d'onda intermedia tra

l'infrarosso e l'onda radio.

La loro lunghezza d'onda varia nell'intervallo da circa 1 m (300 MHz) a 1 mm (300 GHz); tuttavia, i confini tra l'infrarosso (IR) lontano, le microonde e le onde radio (UHF) sono alquanto arbitrari e variano in base al campo di studio.

Il campo di utilizzo prevalente delle microonde sono le trasmissioni radio (ponti radio, cellulari GSM, Radar) e rivestono una notevole importanza per le comunicazioni con i satelliti non subendo interferenze dall'atmosfera terrestre. Sono inoltre utilizzate in geofisica per lo studio del sottosuolo.

## 2.1 Il GPR

Il GPR (Radar-Ground Penetrating), comunemente noto come georadar, è un metodo non distruttivo che, come i radar, opera nel campo elettromagnetico delle microonde e rileva i segnali riflessi dalle strutture del sottosuolo.

Il GPR può avere applicazioni su una gran varietà di supporti, tra cui rocce, suolo, ghiaccio, acqua e strutture edilizie.

Nelle giuste condizioni, gli operatori possono utilizzare il GPR per rilevare gli oggetti inglobati nel sottosuolo, cambiamenti nelle proprietà dei materiali, vuoti e fessure non visibili dall'esterno.

Il GPR utilizza l'alta frequenza (normalmente polarizzata) nella gamma da 10 MHz a 1 GHz.

Un trasmettitore GPR trasmette energia elettromagnetica nel terreno.

Quando l'onda incontra un oggetto interrato o un confine tra materiali aventi differenti permittività, essa viene riflessa, rifratta o dispersa.

Una antenna di ricezione può quindi registrare le variazioni del segnale di ritorno o l'eventuale assenza.

La conducibilità elettrica del terreno, la frequenza di trasmissione e la potenza irradiata possono limitare l'intervallo di profondità effettiva di investigazione del GPR.

Incrementi di conducibilità elettrica attenuano l'onda elettromagnetica trasmessa e quindi la profondità di penetrazione diminuisce.

A causa di meccanismi di attenuazione dipendenti dalla frequenza, le frequenze superiori non penetrano quanto le frequenze più basse; tuttavia, le frequenze più elevate possono fornire una migliore risoluzione.

La frequenza di funzionamento utilizzata è sempre un compromesso tra

risoluzione e profondità di penetrazione del suolo desiderate. Con un GPR a bassa frequenza, per esempio, si è raggiunta la profondità di migliaia di metri in un ghiacciaio della Groenlandia.

In materiali secchi o massicci (per esempio: granito, cemento o pietra calcarea), che tendono ad essere resistivi, la profondità di indagine può raggiungere in media 15 m. Al contrario in materiali umidi o argillosi, che sono conduttivi, la profondità di penetrazione del segnale può essere solo di pochi centimetri.

Nell'ambito dei beni culturali la possibilità di rivelare la presenza di strutture e manufatti sepolti prima di eseguire lo scavo è di grande interesse per il lavoro dell'archeologo, per questo il GPR è molto diffuso nel campo archeologico.

La strumentazione è altamente versatile e si adatta facilmente all'esecuzione di rilievi in ambienti diversi per tipologia e dimensione.

Un sistema speditivo dell'utilizzo del GPR è l'acquisizione di profili bidimensionali a reticolo ortogonale, con questa tecnica l'interpretazione dei risultati è altamente soggettiva e porta al rischio di ottenere risultati falsati.

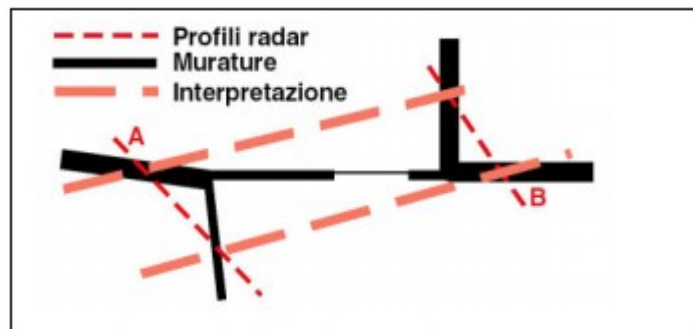


Fig. 2.2: Schema esemplificativo di un'errata interpretazione dei dati.

La microonda percorrendo una linea del reticolo viene deviata o dispersa in base alle diverse permittività del sottosuolo che incontra nelle differenti profondità. Quindi su ogni singola linea del reticolo si può ricostruire una sezione verticale bidimensionale del suolo indagato.

Il rilievo tridimensionale si realizza con una serie di profili bidimensionali paralleli, che “ricoprono” tutta la superficie del sito di indagine con una maglia opportunamente densa e regolare.

Le immagini GPR risultanti da ciascuno di questi profili vengono affiancate

nella direzione dell'asse  $y$ , costruendo un'immagine nello spazio  $(x, y, z, t)$ . In questo modo si individuano non solo i manufatti sepolti ma anche la loro dimensione spaziale.

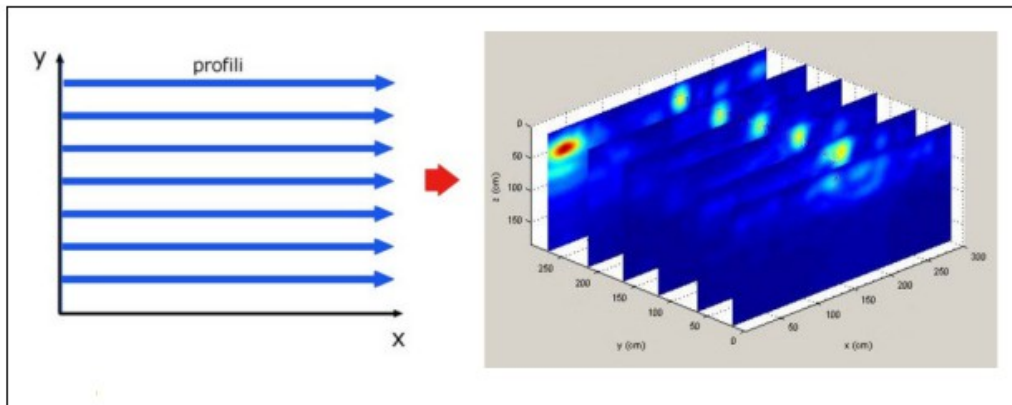


Fig. 2.3: Costruzione di un GPRgramma tridimensionale.

La figura 2.3 mostra come si ottiene un GPRgramma tridimensionale partendo dalle singole scansioni, ogni sezione parallela della rappresentazione a destra corrisponde ad un profilo a sinistra.

Al fine di ottenere l'ottimale costruzione tridimensionale del sito indagato è necessario effettuare il maggior numero di profili paralleli senza incorrere nell'*aliasing* del segnale.

L'*aliasing* è quel fenomeno per cui due o più segnali analogici possono diventare indistinguibili una volta campionati, questo perché l'insieme dei punti digitali ottenuti potrebbe non permettere di identificare univocamente un'unica funzione, passante per tutti i punti.

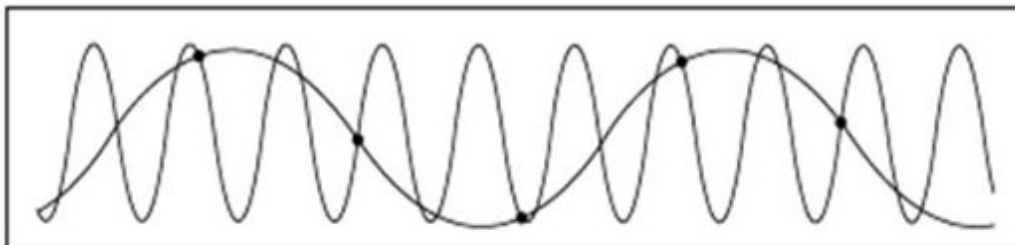


Fig. 2.4: Esempio di un'interpretazione non univoca di una sinusoida in base ai punti a disposizione, causa aliasing.

L'onda riflessa è un segnale continuo che attraverso il campionamento viene trasformato in un segnale discreto.

Se nell'elaborazione del segnale si crea un'interferenza con il profilo adiacente si verifica una situazione di *aliasing spaziale* dei dati acquisiti e la loro interpretazione potrebbe facilmente essere falsata. Per cui la distanza dei profili non deve essere inferiore ad un quanto della lunghezza d'onda  $\lambda$  associata alla frequenza massima del segnale.

Il segnale registrato dal GPR dipende sia dalla posizione di un oggetto sia dal suo orientamento relativo alle antenne.

L'angolo azimutale della riflessione fa sì che, a causa del loro orientamento sfavorevole, alcuni oggetti possano non essere individuati da un rilievo GPR.

Tuttavia non è necessario prevedere a priori le caratteristiche geometriche dei manufatti da indagare nel sito.

Il rischio di incorrere in “angoli ciechi”, con conseguente non individuazione di alcuni oggetti, viene superato con la realizzazione di due serie di profili con direzioni tra loro perpendicolari, coprendo la medesima area di indagine e mantenendo un'accurata referenziazione delle misure.

In questo modo si ottengono due immagini 3D dello stesso volume che rappresentano gli oggetti con polarizzazioni tra loro complementari e che possono essere confrontate per ottenere una ricostruzione completa.

La regolarità dei dati e la loro accurata referenziazione sono due elementi fondamentali anche per ridurre la mole di dati da analizzare; un aumento della densità trasversale si tradurrebbe in un maggior numero di profili, e quindi comporterebbe più tempo e maggiori difficoltà di materializzazione e di acquisizione.

In un rilievo tridimensionale, i punti di misura del rilievo devono essere disposti ai vertici di una maglia di rette parallele in modo tale che le tracce siano tra loro allineate ed equidistanti.

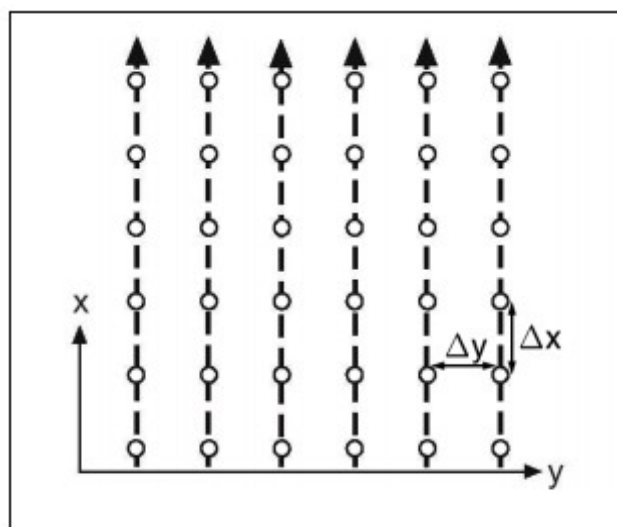


Fig. 2.5: Maglia regolare di rette.

Per rispettare la regolarità dei dati su superfici ampie e sconnesse è stato elaborato il sistema a guida laser.

La realizzazione di tracce sul terreno di uno dei profili da seguire è la tecnica comunemente adottata per la guida delle antenne su larga scala.

La regolarità dell'acquisizione dipende quindi, in assenza di ostacoli, dall'attenzione ed accuratezza dell'operatore che guida l'antenna GPR, ma anche dall'accuratezza con cui sono state posizionate le tracce di riferimento.

La realizzazione delle tracce a terra, anche per piccole aree, implica un'enorme mole di lavoro con un alto rischio di errore nel posizionamento.

Poiché il reticolo è irrinunciabile per una materializzazione completa e corretta dei profili, è stato sviluppato un metodo che non ricorresse a nessun tipo di materializzazione tradizionale al suolo, affidando ad un livello laser rotativo la proiezione di un piano verticale per tracciare il profilo al suolo.

Per facilitare l'inseguimento del fascio proiettato dal livello laser si è fatto ricorso ad un ricevitore, ovvero ad un fotodiodo sensibile alla lunghezza d'onda del laser, che segnala la ricezione del raggio indicandone la traiettoria.

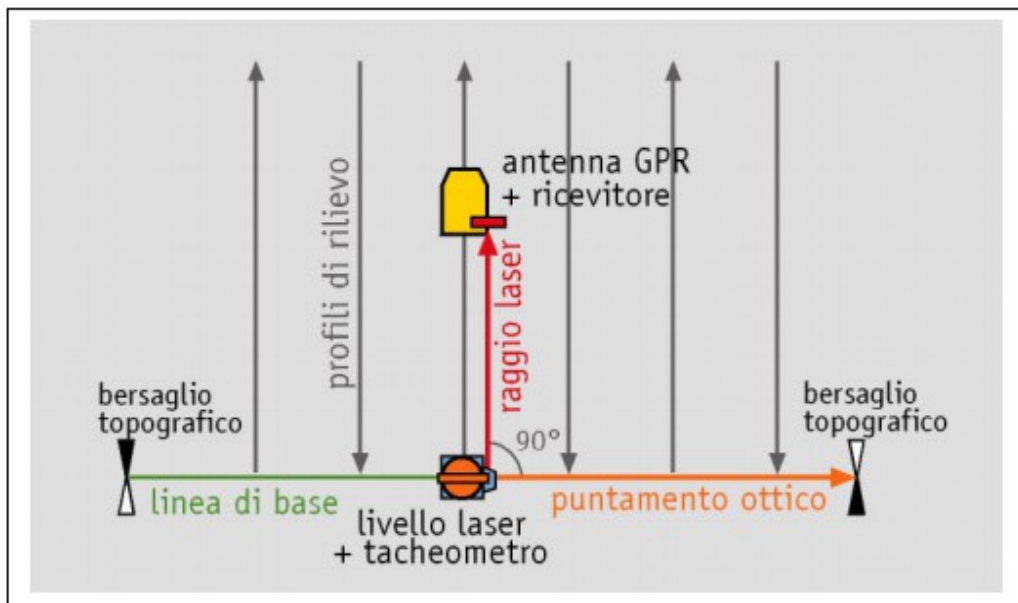


Fig. 2.6: Schema di funzionamento del sistema a guida laser.

L'intera fase di messa in stazione (posizionamento, orientamento ed assetto del laser in testa ad ogni profilo) deve essere sufficientemente accurata da garantire la regolarità dei dati acquisiti, ma allo stesso tempo abbastanza spedita da poter essere eseguita in tempi molto ridotti da un solo operatore.

Dall'orientamento e assetto del livello laser dipende infatti la costanza della direzione seguita dal GPR e perciò la regolarità spaziale dei dati.

Il sistema è già stato testato in ambito archeologico dal Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano.

L'occasione del rilievo è stato lo sprofondamento presso Cuasso al Monte (VA) di un'estesa area (circa 1200 m<sup>2</sup>).

La vicinanza di strutture militari appartenenti alla Linea Cadorna (1916-17) faceva sospettare l'esistenza di cavità sotterranee, responsabili del cedimento.

Le acquisizioni sono state condotte in due diverse occasioni (maggio e luglio 2004), per coprire l'area di indagine secondo due direzioni ortogonali.

Sono stati acquisiti complessivamente 63 profili, per un totale di 2,4 km lineari.

Il rilievo dell'intera area è stato portato a termine in circa tre ore per ogni sessione.

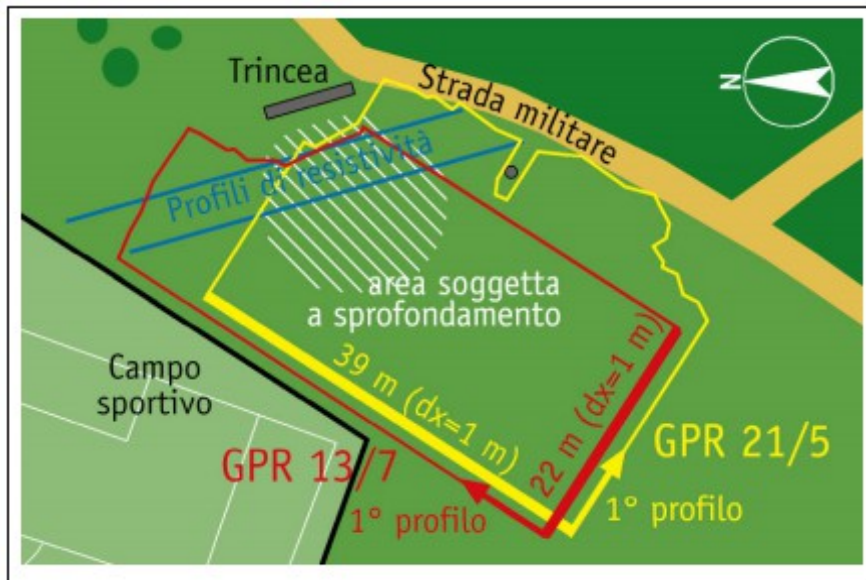


Fig. 2.7: Referenziazione delle indagini geofisiche sulla Linea Cadorna.

L'operatore che manovrava l'antenna GPR non ha avuto difficoltà a seguire il profilo tracciato dal laser e gli scarti dalla traiettoria sono stati contenuti entro il margine di errore più stretto segnalato dal ricevitore laser, limitandosi quindi a circa 12 cm.

Nel campo dei beni culturali le microonde hanno un impiego ottimale nelle indagini GPR soprattutto con lo sviluppo della tecnologia tridimensionale abbinata alla guida laser, che permette di indagare in modo spedito ampie aree di interesse archeologico di cui è ricco il territorio italiano.



## Capitolo 3

### Infrarossi (IR)

La radiazione infrarossa (IR) è una radiazione elettromagnetica con una lunghezza d'onda maggiore di quella della luce visibile ma minore delle microonde.

Il nome significa "sotto il rosso" (dal latino *infra* = "basso").

La lunghezza d'onda degli infrarossi è compresa tra circa 0,7  $\mu\text{m}$  (campo del visibile) e 1 mm (campo delle microonde).

Nella concezione comune viene spesso associata con i concetti di "calore" e "radiazione termica", poiché ogni oggetto con temperatura superiore allo zero assoluto (in pratica qualsiasi oggetto reale) emette spontaneamente radiazione in questa banda, viene intuitivamente percepita quando nel buio ci si avvicina ad una sorgente di calore.

L'esistenza della radiazione IR fu dimostrata dall'astronomo William Herschel nel 1800.

L'astronomo voleva determinare il calore specifico di ogni colore della banda del visibile utilizzando un prisma per la rifrazione della luce e un termometro. Egli scoprì che nella zona "buia" oltre il rosso visibile il termometro indicava la presenza di calore.

L'uso di apparecchiature e di tecniche che utilizzano la banda della radiazione infrarossa è ampio: visori notturni, termografia, sensori di spostamento, telecomandi IR, spettroscopia IR, fotografia IR, infrarosso in falso colore, riflettografia IR, comunicazioni e meteorologia.

Nel campo dei beni culturali la radiazione infrarossa viene utilizzata principalmente nella termografia, nella fotografia IR e nella riflettografia IR.

### 3.1 Termografia

La termografia è una tecnica diagnostica non distruttiva consistente nel rilevamento, tramite termocamera, delle radiazioni infrarosse emesse da un corpo.

Tutti i corpi con temperatura superiore allo zero assoluto ( $-273,15^{\circ}\text{C}$ ) emettono

energia elettromagnetica con una distribuzione spettrale che dipende principalmente dalla temperatura, dalla struttura del corpo e dalla sua emissività,  $\epsilon$ .

L'intensità dell'emissione dipende sia dalla temperatura del corpo che dalla sua natura (stato e composizione chimica). Mentre nei gas e nei solidi semi-trasparenti alle alte temperature l'emissione avviene da tutto il volume, per solidi e liquidi l'emissione è un fenomeno superficiale, che coinvolge uno strato di pochi micron.

L'emissione è in direzione della superficie.

Ciò che consente di legare l'energia emessa da un corpo alla sua temperatura è una legge scoperta dal fisico Max Planck nel 1900.

Planck, studiando il corpo nero, ipotizzò che la radiazione elettromagnetica fosse emessa e assorbita solo in pacchetti discreti, o *quanti*, e che l'energia fosse legata alla frequenza secondo una costante, detta *costante di Planck*. L'espressione è:

$$E = h \cdot \nu$$

dove  $h$  rappresenta la costante di Planck e vale  $6,626196 \cdot 10^{-34}$  J·s.

Prima di Planck, Stefan-Boltzmann avevano stabilito che la quantità totale di energia emessa da un corpo nero ad una determinata temperatura è proporzionale alla quarta potenza della temperatura stessa espressa in gradi Kelvin:

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

dove  $\sigma = 5.671 \cdot 10^{-8}$  W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-4</sup> è la *costante di Stefan-Boltzmann*.

Sempre precedentemente a Max Planck il fisico Wilhelm Wien, nel 1893, aveva trovato il legame fra temperatura del corpo nero e lunghezza d'onda determinandone il picco.

La legge di Wien:

$$\lambda_{peak} = \frac{b}{T}$$

lega la *lunghezza d'onda di picco* dello spettro elettromagnetico irraggiato,  $\lambda_{peak}$

[ $\mu\text{m}$ ], alla temperatura assoluta  $T$  del corpo.

Dove  $b$  è la *costante di Wien*, con  $b = 2897 \text{ K}/\mu\text{m}$ .

Per un corpo reale, che è “non nero”, l'emissività sarà inferiore, come pure la curva di emissione, rispetto a quella del corpo nero sottoposto alla stessa temperatura.

Per conoscere l'emissività  $\epsilon$  del corpo “non nero” sarà sufficiente moltiplicare la *radianza* ad una determinata lunghezza d'onda per la corrispondente emissività spettrale.

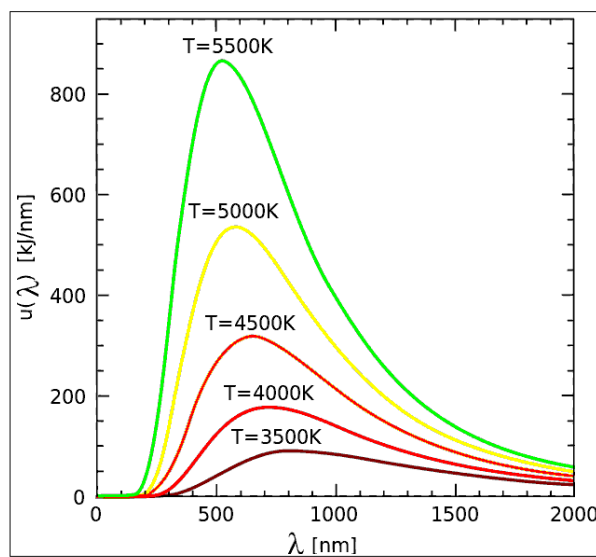


Fig. 3.1: Caratteristica di radiazione del corpo nero.

Misurando l'energia radiante emessa dall'oggetto in rapporto alla superficie ed applicando la legge di Stefan-Boltzmann è possibile tarare le termocamere con l'esatto valore medio dell'emissività dell'oggetto da indagare.

La termocamera, come strumento di analisi, si basa sulle differenti capacità dei materiali di emettere energia.

Usando le camere di ripresa con tecnologia allo stato solido, la mappa della temperatura superficiale risulta essere un'immagine a falsi colori o a gradazioni di grigio.

Ad ogni pixel è associata una misura della temperatura corrispondente in quel punto del corpo.

Attualmente la tecnologia offre strumentazioni capaci di rilevare differenze di temperature dell'ordine del centesimo di grado. E' quindi possibile ottenere informazioni preziose sia per la conoscenza di un manufatto architettonico che per determinare la morfologia di una struttura non vista e il suo stato di degrado.

La termografia può mettere in evidenza nelle strutture:

- elementi celati e incorporati in fasi successive;
- elementi in pietra (archi, capitelli, portali,...);
- tamponature (finestre e porte);
- tessiture murali;
- ammorsamenti tra edifici;
- tipo di muratura e materiali costituenti;
- fratture interne;
- elementi metallici (staffe, chiavi, grappe, chiodi);
- tubazioni e canne non in vista.

Sulle superfici e sugli intonaci:

- anomalie termiche correlate a cicli idrodinamici;
- ponti termici;
- condensazione/evaporazione;
- risalita capillare;
- infiltrazioni di acqua;
- distacchi e controllo di adesione dopo restauro.

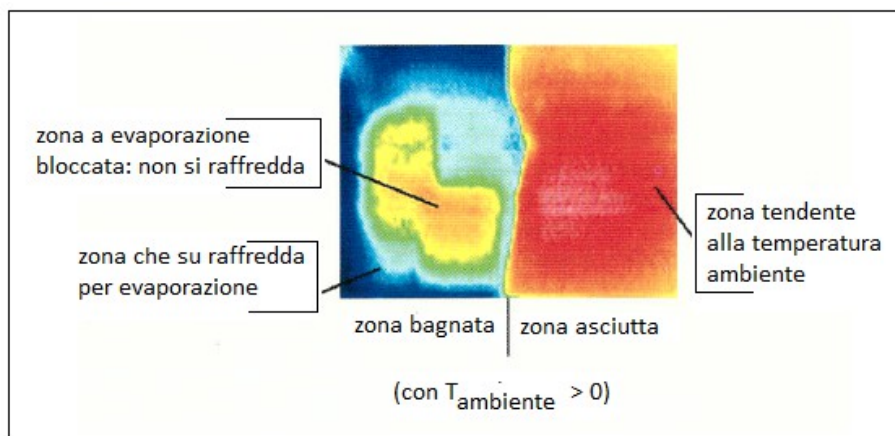


Fig. 3.2: Termografia di una superficie intonacata parzialmente umida.

Dal punto di vista applicativo per effettuare delle termografie non sono necessari ponteggi e le rilevazioni possono essere effettuate in condizioni e tempistiche diverse.

La termografia a infrarossi può essere classificata secondo due differenti approcci che differiscono, in sostanza, nella modalità in cui viene effettuata la rilevazione.

Nella *termografia passiva* si osservano i campioni sottoposti a misura esattamente nelle condizioni termiche in cui si trovano, che potranno essere caratterizzati da temperature più o meno elevate rispetto a quella ambientale.

Nella *termografia attiva*, invece, al fine di indurre contrasti termici significativi e meglio rilevabili, i campioni vengono sottoposti allo stimolo di una fonte energetica esterna.

Le tecniche riconducibili a questo approccio hanno il vantaggio di riuscire a rilevare meglio le caratteristiche dell'oggetto ispezionato (proprietà termiche e presenza/assenza di anomalie/difetti) localizzate al di sotto della superficie.

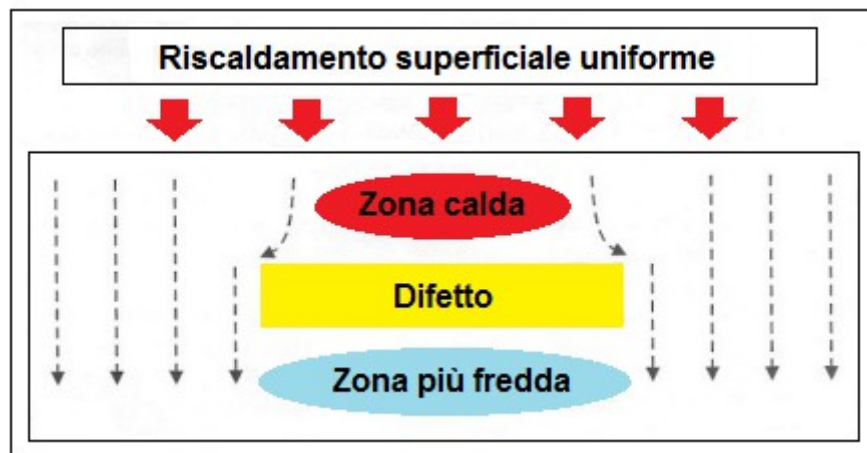


Fig. 3.3: Termografia attiva. Schema della propagazione del calore in un mezzo contenente un difetto a bassa conduttività (es.: aria o isolante).

Nello schema sovrastante si illustra il flusso di calore nel caso della termografia attiva. Quando il calore trova un ostacolo alla sua propagazione (nel caso in figura un difetto a bassa conduttività) tende ad accumularsi, mentre sul lato opposto il corpo manifesta un'area più fredda per l'assenza del flusso di calore in

prossimità del difetto.

La scelta tra uso della termografia attiva o passiva avviene a seconda del campione da studiare, delle sue dimensioni e dell'obiettivo dell'indagine.

In generale, la termografia attiva permette di indagare ad una profondità di circa 10-20 cm, mentre la termografia passiva raggiunge solo gli strati più superficiali ad una profondità di pochi centimetri.

Inoltre l'indagine in modalità attiva permette di ottenere un risultato apprezzabile a livello quantitativo, poiché si hanno informazioni precise sull'ampiezza e la durata dell'onda termica irradiata.

La modalità passiva invece, dà buoni risultati, ma solo qualitativi, a causa di tutte le variabili ambientali. La termografia passiva è in genere applicata a immobili o a superfici di grandi dimensioni.

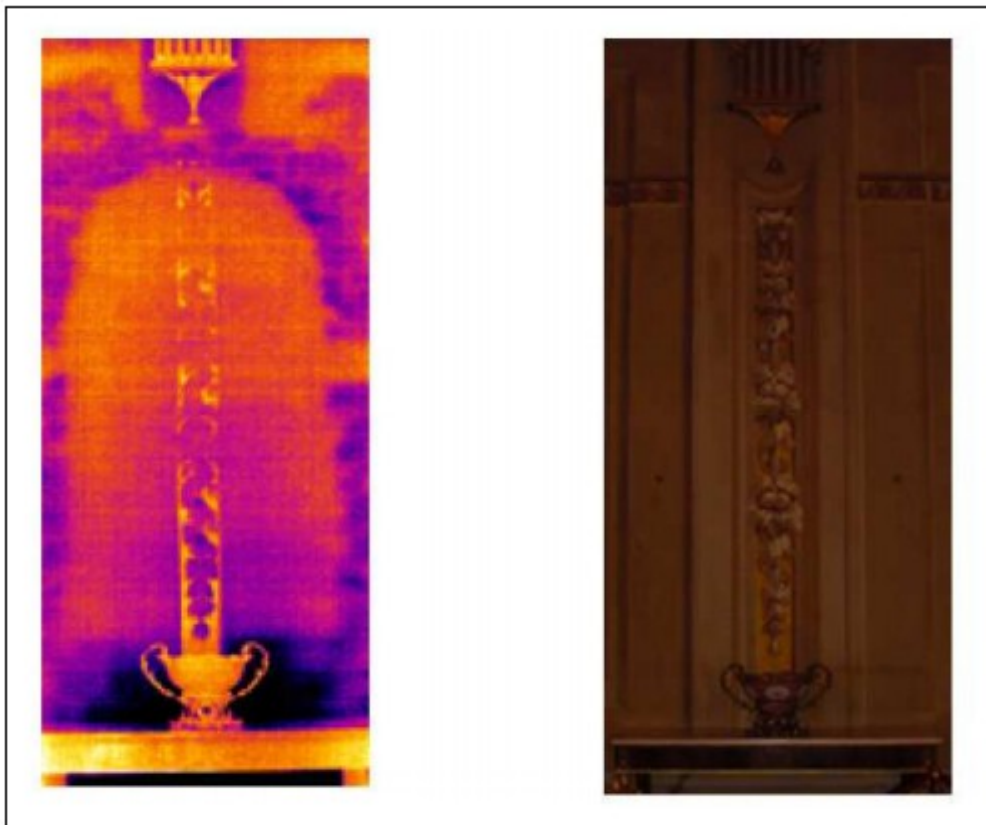


Fig. 3.4: Firenze - Palazzo Pitti- Sala delle nicchie.

Nella figura 3.4 si può notare come la termografia abbia permesso di rilevare, grazie alla differenza di colore, una nicchia presente nelle piante del '700, che era stata in seguito tamponata. La differenza tra il materiale costituente la parete e quello costituente la tamponatura causa una differente distribuzione del calore che viene evidenziata con colori differenti nel risultato della termografia.

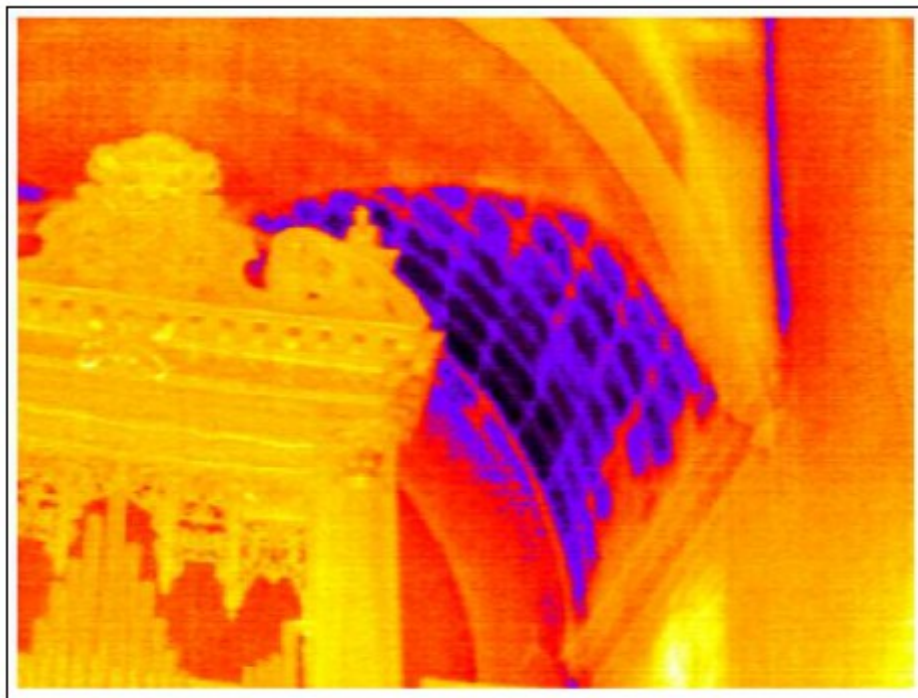


Fig. 3.5: Ferrara – Cattedrale di S. Giorgio.

La figura 3.5 mostra il risultato della termografia eseguita sulla volta della Cattedrale di S. Giorgio a Ferrara. La differenza dei materiali costitutivi della volta viene evidenziata dai diversi colori dell'immagine termografica.

## 3.2 Riflettografia IR

La riflettografia IR è un metodo di indagine non invasivo per la visualizzazione degli strati di carbonio (carboncino o tempera nera) nascosti dallo strato pittorico.

La riflettografia è inquadrabile fra le tecniche di *imaging* quali l'analisi fotografica nelle diverse bande spettrali, la radiografia e la spettroscopia per immagini.

Per una ripresa in IR, come sorgente di illuminazione è sufficiente una qualsiasi lampada a incandescenza, come quelle per uso fotografico, che hanno sempre un'intensa componente di emissione nell'infrarosso vicino.

È importante che la superficie da indagare sia illuminata in modo uniforme e con una luce prevalentemente diffusa.

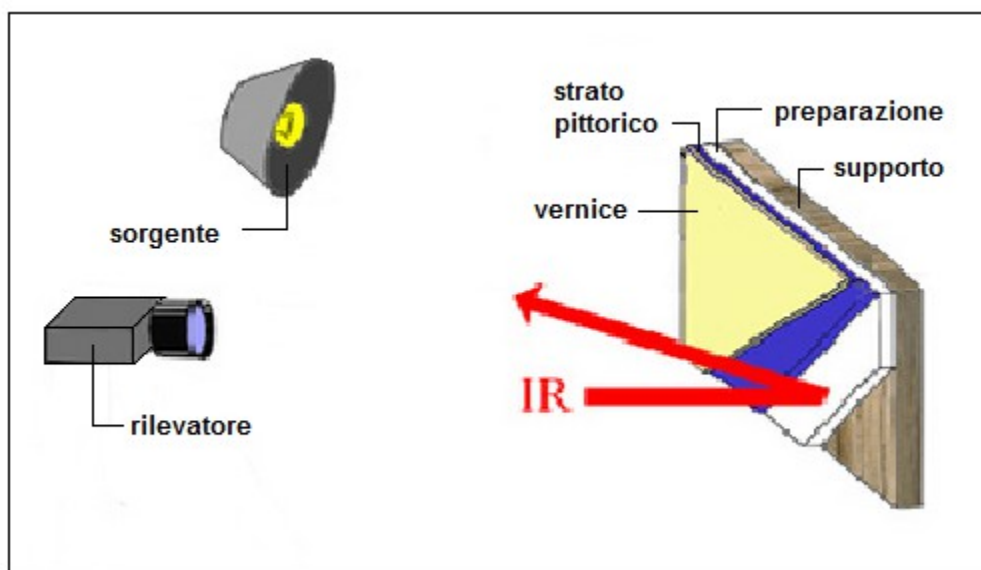


Fig. 3.6: Schema di funzionamento della riflettografia IR.

Come tecnica di *imaging* abbinata alla lunghezza d'onda dell'infrarosso che permette di penetrare lo strato di vernice fino a raggiungere lo strato preparatorio, la riflettografia IR si è affermata come il metodo di indagine più efficace nel rivelare la presenza di disegni preparatori eseguiti dall'artista sopra lo strato di preparazione e coperti dalle stesure di colore.

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

La riflettografia infrarossa è soprattutto impiegata per i dipinti su tavola o su



tela, più raramente per le pitture murali. Nel caso degli affreschi, infatti, non essendo trasparente all'infrarosso lo strato di *intonachino*, il suo uso è limitato all'esame di zone di ripresa a *secco*.

Gli strati di sporcizia o annerimento sono trasparenti all'infrarosso per cui la riflettografia IR è importante per la leggibilità di antichi affreschi e testi su pergamene o papiri.

L'importanza della riflettografia IR è cresciuta di pari passo con l'evoluzione della tecnica riflettografica.

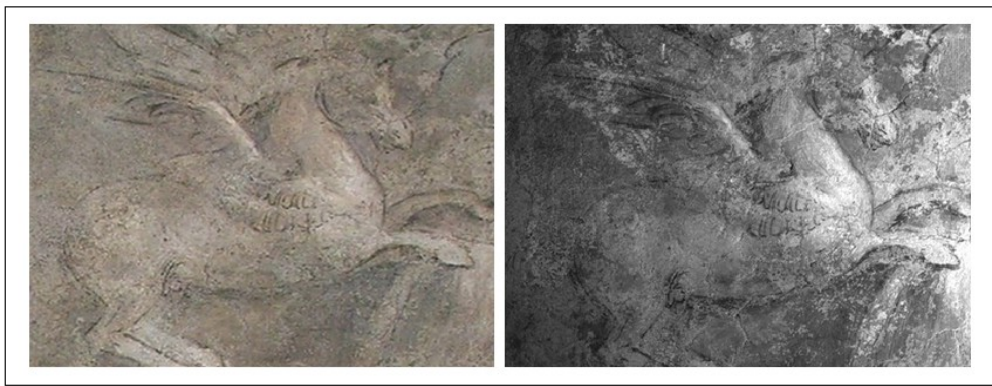


Fig. 3.7: Polidoro da Caravaggio – Parnaso (Affresco nel casino del Palazzo del Bufalo a Roma). A destra particolare di affresco in riflettografia IR.

Le prime analisi riflettometriche partirono con la fotografia infrarossa, già conosciuta nel 1873, ma questa tecnica diventa di routine a partire dagli anni '50 soprattutto su dipinti fiamminghi del XV secolo, per i quali garantisce buoni risultati nella lettura del disegno grazie soprattutto al medium oleoso e allo spessore esiguo degli strati pittorici, oltre che ai pigmenti adoperati.

Nei primi anni '60 viene sviluppata la telecamera Vidicon dotata di rivelatore al solfuro di piombo (PbS).

La telecamera Vidicon è il primo strumento utilizzato tradizionalmente per la riflettografia in sostituzione della pellicola fotografica ed ha una sensibilità spettrale del sensore estesa fino a circa 2,2  $\mu\text{m}$ .

Pur avendo problemi di instabilità termica del sensore, mancanza di uniformità di risposta fotometrica, forte instabilità ad alti livelli di illuminamento, tempi di acquisizione dell'immagine lunghi in condizioni di bassa luminosità nonché

distorsioni geometriche, è tuttora utile per le indagini preliminari e per indagare stesure pittoriche particolarmente spesse o non trasparenti a lunghezze d'onda minori.

Negli anni '80 si svilupparono le telecamere CCD (così dette allo *stato solido*) in cui ogni singolo fotone a contatto con il rivelatore può produrre uno spostamento di cariche che può generare un segnale.

In questi dispositivi, presenti nelle moderne fotocamere digitali, la risoluzione spaziale può essere particolarmente elevata fino ad alcune decine di punti per millimetro.

Il limite della telecamera CCD rispetto alla telecamera Vidicon è quello di avere una sensibilità in un range di lunghezza d'onda più limitata, con conseguente minore capacità di penetrazione.

Entrambe le due tipologie di telecamera (CCD e Vidicon) hanno necessità di registrare un numero elevato di immagini contigue per ricostruire un riflettogramma di risoluzione sufficiente a leggervi i particolari del disegno.

La difficoltà delle riprese e i tempi di ricostruzione sono un grosso limite di questa tecnica di ripresa riflettometrica.

Nel 1990 si cominciarono a usare rivelatori allo stato solido precedentemente sviluppati per scopi termografici dotati di una maggiore estensione nell'IR rispetto a quelli al silicio; si tratta tipicamente dei rivelatori al arseniuro di gallio-indio (InGaAs), e al siliciuro di platino (PtSi), i primi attivi tra 0,9 e 1,7  $\mu\text{m}$  circa, i secondi tra 1,2 e 5  $\mu\text{m}$ .

Nell'anno successivo l'INOA (Istituto Nazionale di Ottica Applicata) mise a punto il primo scanner con sensore costituito da un fotodiodo PIN di InGaAs, la cui risoluzione è di 16 punti per millimetro quadrato.

Con questa apparecchiatura, nella seconda metà degli anni '90, vennero studiati i dipinti degli Uffizi e della Pinacoteca di Brera.

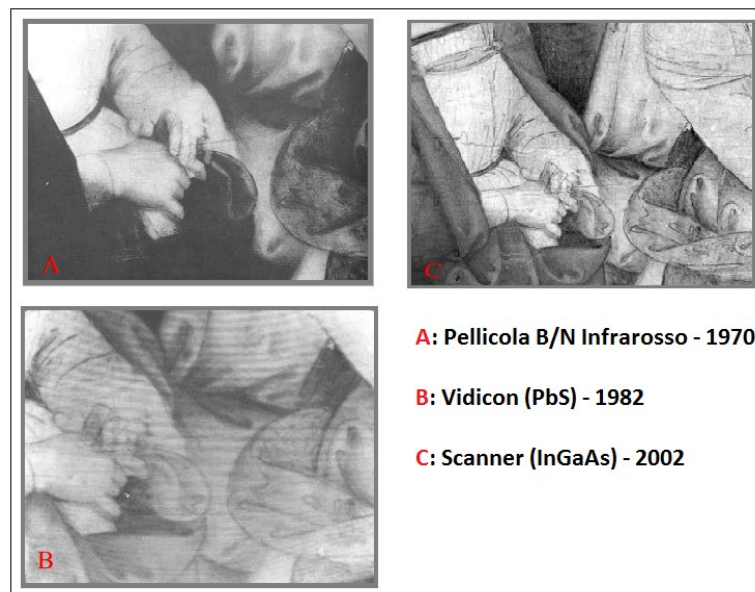


Fig. 3.8: Raffaello – Sposalizio della Vergine (particolare) – Pinacoteca di Brera. Evoluzione della tecnica riflettografica.

### 3.3 Infrarosso in falso colore

La tecnica fotografica a infrarossi in falso colore (FC-IR) è tale che l'immagine ottenuta avrà colori non corrispondenti a quelli reali ed è per questa ragione che viene definita in “falso colore”.

L'immagine in falso-colore fornisce informazioni sulla *riflettanza* del materiale alle radiazioni infrarosse.

La tecnica dell'infrarosso falsi colori costituisce un meccanismo di restituzione delle informazioni ottenuto in modo tale da riportare nelle tre componenti: rosso, verde e blu (RGB – red, green, blue) i canali del verde, del rosso e dell'infrarosso.

La componente verde viene restituita nel blu, la componente rossa nel verde, la componente infrarossa viene riportata in rosso, mentre il blu viene eliminato.

Dalla combinazione dei tre colori si ottiene una tricromia del soggetto ripreso con formazione di una immagine a colori non corrispondenti a quelli reali, appunto “falsi”, ma caratteristici dei materiali indagati.

Questa tecnica di ripresa ha come risultante cromatica finale un'immagine che contiene le informazioni che provengono dalla regione infrarossa, prossima al

rosso, non visibili a occhio nudo.

Le stesure pittoriche cromaticamente simili nel visibile, ma realizzate con pigmenti aventi diversa natura chimica, possono apparire nell'immagine a falsi colori ben differenziate se hanno un diverso comportamento spettrale nell'infrarosso.

Un esempio evidente sono i pigmenti dell'azzurrite e dei lapislazzuli che nel visibile sono entrambi di colore blu, mentre nelle immagini effettuate con questa tecnica presentano due colori nettamente diversi.

L'azzurrite, assorbendo la radiazione infrarossa risulta di colore scuro; al contrario i pigmenti dei lapislazzuli non assorbendo la radiazione infrarossa danno un falso-colore rosso.

Questa metodologia di indagine viene utilizzata:

- per l'individuazione di alcuni pigmenti puri;
- per evidenziare la sovrapposizione in alcune zone tra disegno e colore;
- per la presenza di stesure di composizione chimica diversa ma simili nelle cromie a luce diffusa;
- per l'identificazione di alcuni pigmenti alterati;
- per la presenza di pentimenti;
- per la presenza di interventi di restauro (ritocchi);
- per l'abrasione del film pittorico.



Fig. 3.9: Tavola rappresentante "Madonna con bambino" dipinta nel XII dal Maestro della Maddalena.

Nella figura 3.9 si vedeva la tecnica in falso-colore: a sinistra l'immagine visibile; al centro l'immagine in falso-colore; a destra la mappatura dei restauri: rosso, originale del XIII secolo, verde il restauro del XVIII secolo, blu il restauro del XIX secolo.

Il manto della Madonna nell'immagine in falso-colore si presenta rosso (a sinistra) e nero (a destra). In effetti, il lato sinistro del mantello è stato restaurato con Indaco del XVIII secolo, mentre il lato destro è stato ridipinto in blu di Prussia.

La tecnica del falso colore non può essere considerata specifica per l'identificazione dei vari composti in quanto non sempre esiste una corrispondenza biunivoca tra una sostanza o tra mescolanze (es.: pigmento) e falso colore associato e di conseguenza lo stesso composto, al variare di una serie di parametri al contorno (concentrazione, purezza, provenienza, ecc...), presenta tonalità di falso colore distanti tra loro.



Fig. 3.10: Raffaello – Lo Sposalizio.

Nella figura 3.10 si può notare la risposta gialla della lacca rossa impiegata nella veste della Vergine e la risposta rossa del manto realizzato a lapislazzuli. Si possono inoltre notare i ritocchi effettuati che appaiono come macchie scure.



## Capitolo 4

### Luce visibile

La luce visibile è quella porzione dello spettro elettromagnetico visibile all'occhio umano.

La lunghezza d'onda è compresa fra i 700 e i 400 nm; in termini di frequenza è compresa fra i 428 e i 749 THz.

I colori che possono essere prodotti da un raggio di luce visibile di una precisa lunghezza d'onda (raggio *monocromatico o puro*) sono chiamati *colori spettrali puri*.

La definizione di spettro (dal latino *spectrum*) e il nome dei sette colori spettrali furono dati da Isaac Newton a seguito dei suoi studi sulla rifrazione della luce.

Lo spettro visibile non contiene, come si potrebbe pensare, tutti i colori che l'occhio e il cervello umano possono distinguere come, ad esempio: il rosa, il viola, magenta o il marrone. Questi colori sono dati dalla sovrapposizione di diverse lunghezze d'onda.

Lo spettro, pur senza soluzione di continuità, è suddiviso approssimativamente in gamme di colore.

Colore	Frequenza	Lunghezza d'onda
<b>Violetto</b>	668 ÷ 789THz	380 ÷ 450nm
<b>Blu</b>	631 ÷ 668THz	450 ÷ 475nm
<b>Ciano</b>	606 ÷ 631THz	476 ÷ 495nm
<b>Verde</b>	526 ÷ 606THz	495 ÷ 570nm
<b>Giallo</b>	508 ÷ 526THz	570 ÷ 590nm
<b>Arancione</b>	484 ÷ 508THz	590 ÷ 620nm
<b>Rosso</b>	400 ÷ 484THz	620 ÷ 750nm

La gamma della strumentazione che lavora nel campo dei visibile è vastissima, di seguito ne verranno trattate alcune tipologie particolarmente significative nelle indagini sui beni culturali.

## 4.1 La fotografia

La fotografia è la base documentale per ogni campagna di indagine, sia come testimonianza visiva del bene culturale in un dato momento, sia come supporto alle diverse indagini e restauri che si intendono effettuare sul bene stesso.

La documentazione fotografica è costituita, quindi, da un insieme di immagini che con le opportune tecniche fotografiche evidenziano la tecnica artistica utilizzata, i materiali costitutivi e lo stato di conservazione.

La fotografia può essere effettuata con diverse tipologie di macchine fotografiche (analogiche o digitali).

Le macchine analogiche hanno differenti tipi di negativi: dalla vecchia lastra in vetro, divenuta essa stessa bene culturale, alla pellicola in B/N e colore.

Oltre allo strumento utilizzato si possono distinguere alcune tipologie di ripresa specifiche per i beni culturali.

### 4.1.1 Fotografia in luce diffusa



Fig. 4.1: Raffaello – Lo Sposalizio. Fotografia in luce diffusa.

La fotografia in luce diffusa è eseguita ricreando, anche artificialmente, le condizioni di illuminazione che rendono leggibile al meglio l'opera.



Con l'illuminazione diffusa si cerca di eliminare qualsiasi riflesso speculare della superficie e di garantire il più possibile le normali condizioni di osservazione dell'opera.

La luce diffusa in modo omogeneo nasconde la trama ed appiattisce l'immagine, ma nello stesso tempo esalta il dettaglio poiché produce un contrasto minore.

#### ***4.1.2 Fotografia a luce radente***

La fotografia con luce radente si effettua illuminando l'oggetto da un solo lato scelto opportunamente.

L'angolo di incidenza della luce è molto stretto, mai superiore ai 10° rispetto al piano da esaminare.

Il fascio di luce, quasi parallelo all'oggetto, riesce a creare ombre dietro le millimetriche rugosità dell'oggetto esaminato esaltandone tutte le imperfezioni e i difetti.

Questa tecnica rapida, economica e non invasiva, se utilizzata sui dipinti, permette di individuare:

- lo stato di tensione, deformazione;
- rigonfiamenti, lacerazioni, strappi, cuciture o integrazioni della tela e l'impronta del telaio;
- la tecnica di esecuzione ed assemblaggio delle tavole lignee, la venatura del legno e le sue imperfezioni;
- lo spessore degli strati pittorici e la loro sequenza di applicazione;
- i sollevamenti, le cadute e integrazioni di colore;
- i pentimenti e i rifacimenti, le incisioni e le decorazioni.

Se utilizzata sulle pitture murali permette di individuare:

- i cedimenti e i dissesti della struttura portante;
- la stesura degli strati d'intonaco e la loro finitura, le giornate di lavoro e la loro sequenza;
- le incisioni del disegno preparatorio, l'andamento della stesura e le tecniche usate per le dorature e altre decorazioni;
- lo stato di conservazione (sollevamenti e cadute di pellicola pittorica), solfatazione della superficie.



Fig. 4.2: Jacopo Del Sellaio – La Vergine e il Bambin Gesù. A destra il dipinto visto con luce radente proveniente da destra.



Fig. 4.3: Polidoro da Caravaggio – Parnaso (Affresco nel Casino del Palazzo del Bufalo a Roma). A destra particolare di affresco visto con luce radente.

#### ***4.1.3 Macro e microfotografia***

La macro e la microfotografia sono tecniche di indagine fotografica che permettono di ottenere immagini di dettagli molto piccoli tramite forti rapporti di ingrandimento.

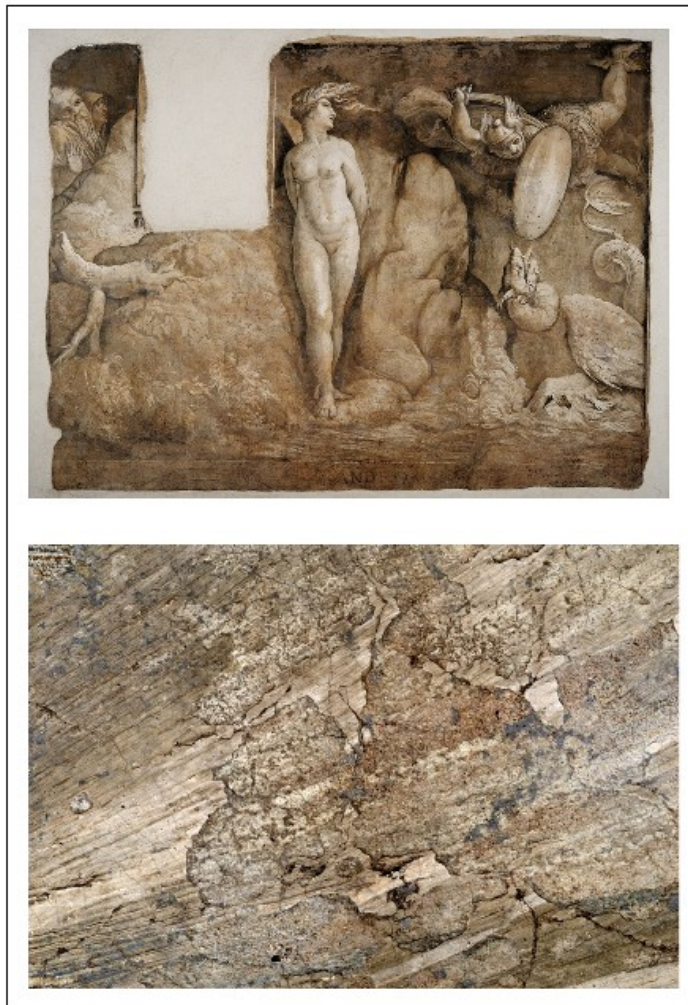


Fig. 4.4: Polidoro da Caravaggio – Perseo libera Andromeda (Affresco nel Casino del Palazzo del Bufalo a Roma). La macrofotografia evidenzia gli strati preparatori superstiti.

Si parla di *macrofotografia* quando il rapporto di riproduzione del soggetto è pari o superiore ad 1, cioè quando le dimensioni dell'immagine sulla pellicola o sul sensore sono le medesime o sono superiori alle dimensioni reali dell'oggetto da riprendere.

Immagini con un rapporto fino a 10:1 sono definite *macrofotografie*, gli ingrandimenti superiori e fino a 20:1 si definiscono *microfotografie*.

Le macro e le microfotografie si ottengono interponendo fra il corpo macchina e l'obiettivo dei soffiotti di estensione.

Il problema principale per riprese macro e microfografiche è la ridotta profondità di campo che consente di avere a fuoco solo una zona ristretta.

Il problema dipende dal rapporto fra le dimensioni fisiche del soggetto e quelle del sensore/pellicola ed è accentuata all'aumentare dell'ingrandimento ottenuto.

Se poi non vi è complanarità fra soggetto e sensore l'area di messa a fuoco si riduce ulteriormente. Tuttavia questo problema viene quasi totalmente risolto tramite l'utilizzo di banchi ottici basculanti.

Un'altra problematica è l'eccessiva vicinanza fra soggetto e obiettivo che ne impedisce una corretta e sufficiente illuminazione.

L'utilizzo di teleobiettivi, applicati in aggiunta agli obiettivi macro e micro, permette di riprendere il soggetto da una distanza tale da ottenere una corretta illuminazione dello stesso.

La macrofotografia dà la possibilità di isolare piccole zone del bene culturale e di concentrare l'attenzione su particolari invisibili all'occhio umano (che non percepisce la separazione fra due punti distanti fra loro meno di un ventesimo di millimetro) e allo stesso tempo permette di evidenziare sia lo stile dell'autore del dipinto, che lo stato di conservazione: abrasioni, piccole lacune, residui di vecchie vernici e screpolature.

La macrofotografia delle labbra della Gioconda di Leonardo (fig. 4.5) permette di vedere come le labbra che dovrebbero formare il famoso sorriso in realtà non esistano, ma l'effetto sia dato solo da sfumature di colore.

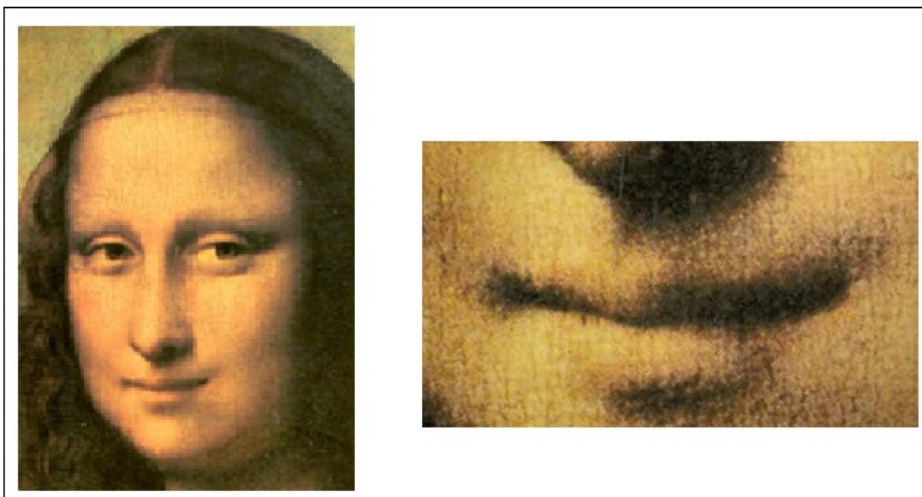


Fig. 4.5: Leonardo – La Gioconda. Macrofotografia.

La microfotografia consente di documentare un dettaglio della superficie dipinta, a fattori di ingrandimento comparabili con quelli impiegati nella fotografia delle sezioni stratigrafiche.

E' possibile così descrivere morfologia e granulometria dei materiali costituenti una miscela, mantenendo la corretta geometria di osservazione della superficie, al fine di intrecciare le caratteristiche cromatiche e di successione stratigrafica delle stesure.

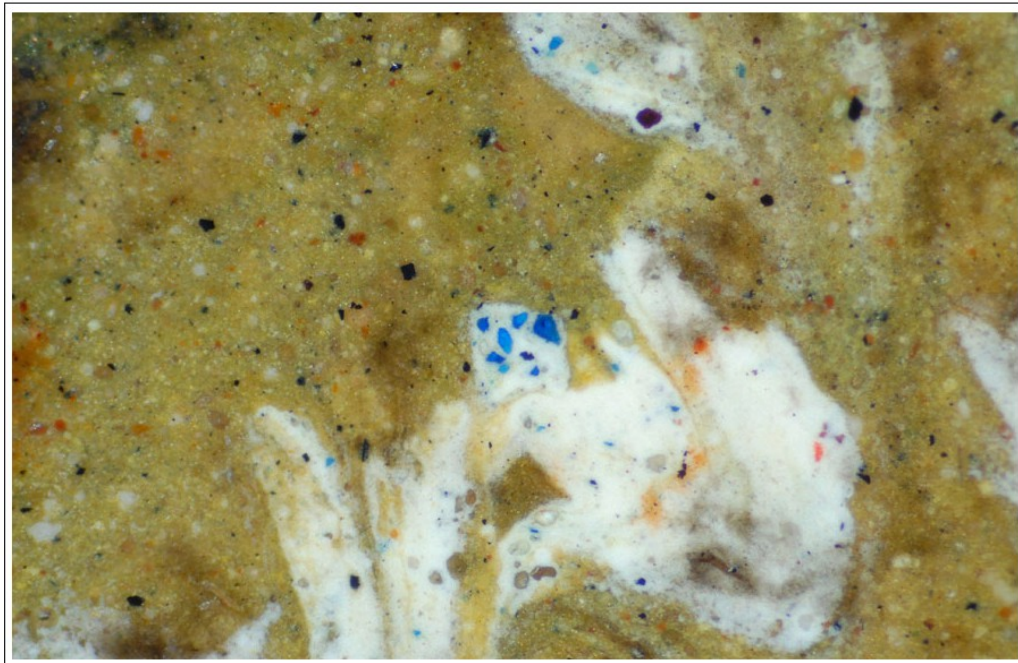


Fig. 4.6: Microfotografia in cui è individuabile la granulometria e la morfologia dei pigmenti.

#### ***4.1.4 Transilluminazione***

Una tecnica fotografica per una prima indagine dei dipinti su tela o carta è la transilluminazione che si basa sul presupposto della parziale trasparenza del dipinto alla radiazione visibile.

La tecnica consiste nel posizionare una sorgente luminosa sul retro del dipinto e quindi fotografarlo sul recto.

Nella transilluminazione, la luce che arriva direttamente in fotocamera deve provenire solo dal retro per cui la sorgente luminosa deve essere

opportunitamente schermata per evitare componenti diffuse sulle pareti circostanti.

La sorgente luminosa deve essere ad una distanza minima dal dipinto senza scaldarlo eccessivamente per evitare di danneggiare l'opera.

Utilizzando un fascio di luce che attraversa il dipinto si potranno ottenere varie informazioni:

- stato di conservazione del supporto (lacerazioni, strappi e toppe);
- stato di conservazione del colore (presenza di screpolature);
- stesura e spessore del colore, la sua omogeneità, i ritocchi e l'eventuale presenza di dipinti sottostanti.

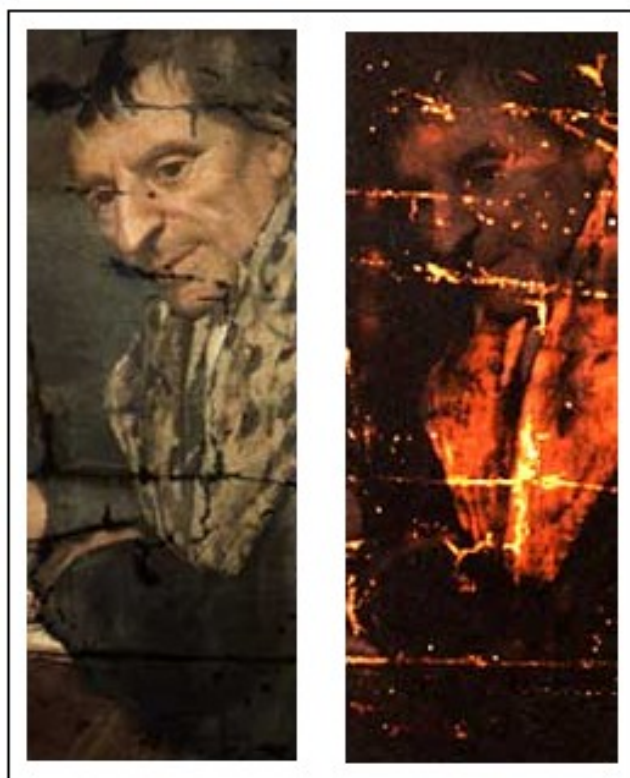


Fig. 4.7: A destra l'immagine del dipinto ripreso con la tecnica della transilluminazione.

## 4.2 La spettrofotometria di riflettanza nel visibile

La spettrofotometria di riflettanza nel visibile è una tecnica basata sulla misurazione della riflettanza spettrale della superficie di un dipinto in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente.

Questa metodologia di analisi consente di realizzare un grafico che indica l'andamento della riflettanza dell'elemento in esame in funzione della lunghezza d'onda impiegata.

Ogni campione preso in esame ha uno spettro caratteristico chiamato *firma spettrale*, che per essere tale deve essere riferito ad uno standard assoluto di riflettanza indipendente sia dallo spettro di emissione della lampada utilizzata, sia dalle componenti ottiche impiegate.

Per eseguire la misura si utilizza uno standard di riferimento *bianco*, con una riflettanza costante al variare della lunghezza d'onda determinando così il *bianco assoluto*.

I valori di intensità della radiazione riflessa vengono così espressi in termini percentuali; ne consegue che un campione bianco fornirà una riflettanza del 100%, mentre un campione nero esprimerà una riflettanza dello 0%.

I pigmenti colorati presentano, se pur con massimi e minimi, caratteristiche distintive in posizioni dello spettro relativamente fisse.

Già negli anni quaranta sono iniziate le prime applicazioni della spettrofotometria in riflettanza per determinare la firma spettrale dei pigmenti, ma solo con lo sviluppo dell'elettronica, dell'applicazione delle fibre ottiche e nello specifico delle sfere integratrici, che garantiscono la ripetibilità delle misure, si è potuto sviluppare la tecnica.

La sfera integratrice o *sfera di Ulbricht* è una delle apparecchiature più utilizzate per la misura di grandezze fotometriche.

È una sfera cava con superficie interna perfettamente diffondente che consente la riflessione totale della luce, che può entrare attraverso una piccola fessura.

Le misure vengono effettuate attraverso un fotorilevatore fissato dietro una piccolissima fessura presente sulla superficie della sfera ed opportunamente schermato per non falsare i risultati.

Per come è realizzata la sfera, la fessura attraverso cui passano le radiazioni

luminose è a tutti gli effetti un corpo nero, che assorbe totalmente la radiazione incidente, senza rifletterla.

Utilizzando gli spettrofotometri portatili dotati di fibra ottica e di sfera integratrice è estremamente facile e rapido campionare per punti un dipinto.

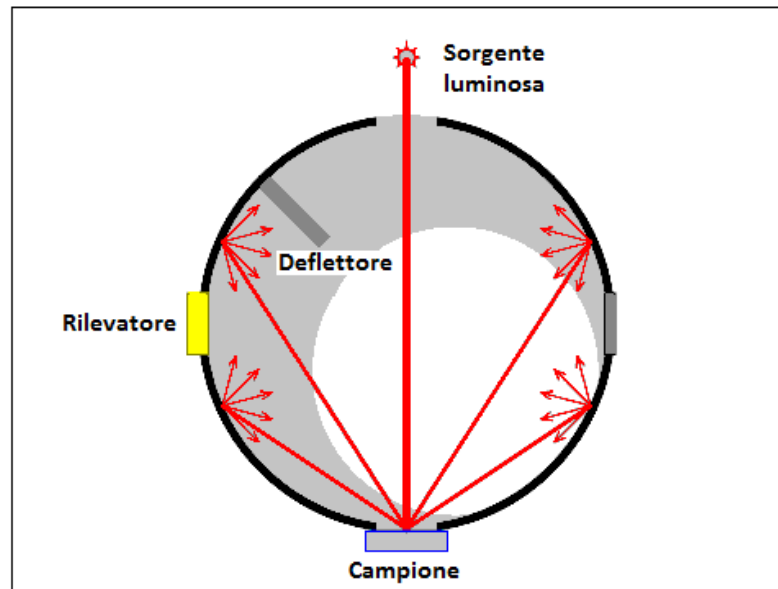


Fig. 4.8: Schema sfera di Ulbricht.

#### 4.2.1 Telefotometria

La telefotometria è una tecnica di spettrofotometria di riflettanza che permette di analizzare l'intero dipinto.

Si utilizza una fotocamera fornita di una serie di filtri intercambiabili con banda passante di 10 nm che inquadra l'intera superficie in esame. A seguito della successione dei filtri ottici è possibile ottenere una serie di immagini del dipinto ripreso nelle diverse bande spettrali.

Contemporaneamente in ciascuna immagine vengono ripresi alcuni standard di riflettanza nota.

Grazie al confronto delle immagini con gli standard di riflettanza è possibile ottenere la riflettanza spettrale di ogni zona dell'area esaminata.

Questa tecnica consente l'archiviazione digitale dell'immagine della superficie



indagata alle diverse lunghezze d'onda.

Diventa così possibile costruire una sorta di carta d'identità dell'opera che permetterà di verificarne il successivo stato di conservazione.

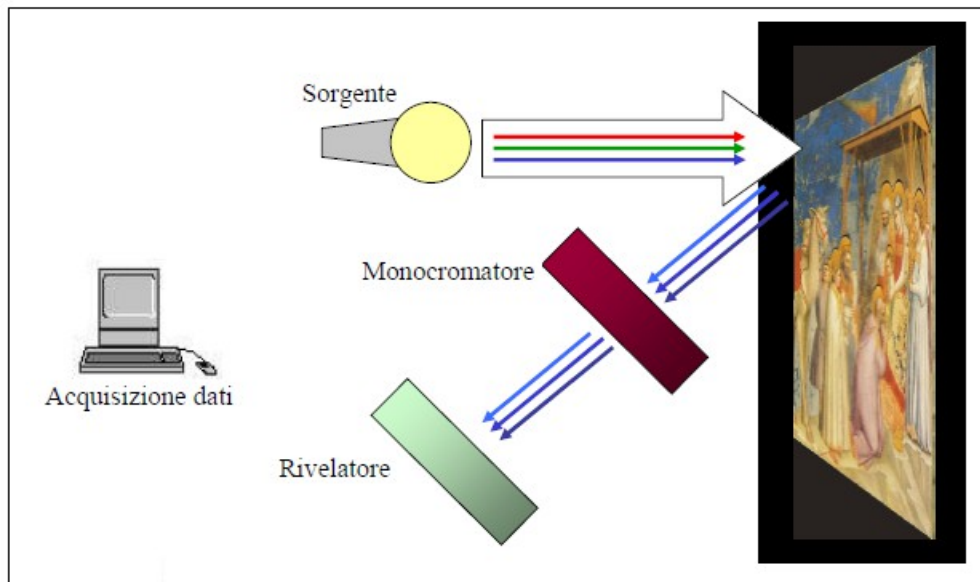
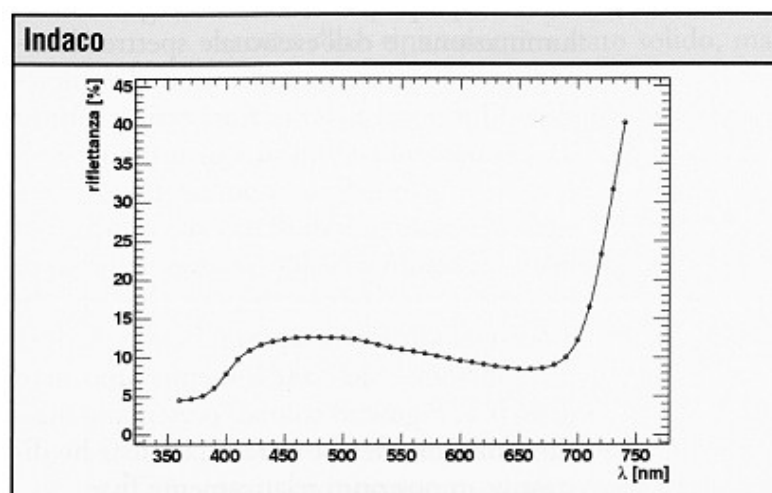


Fig. 4.9: Schema di ripresa con spettrofotometro di riflettanza.



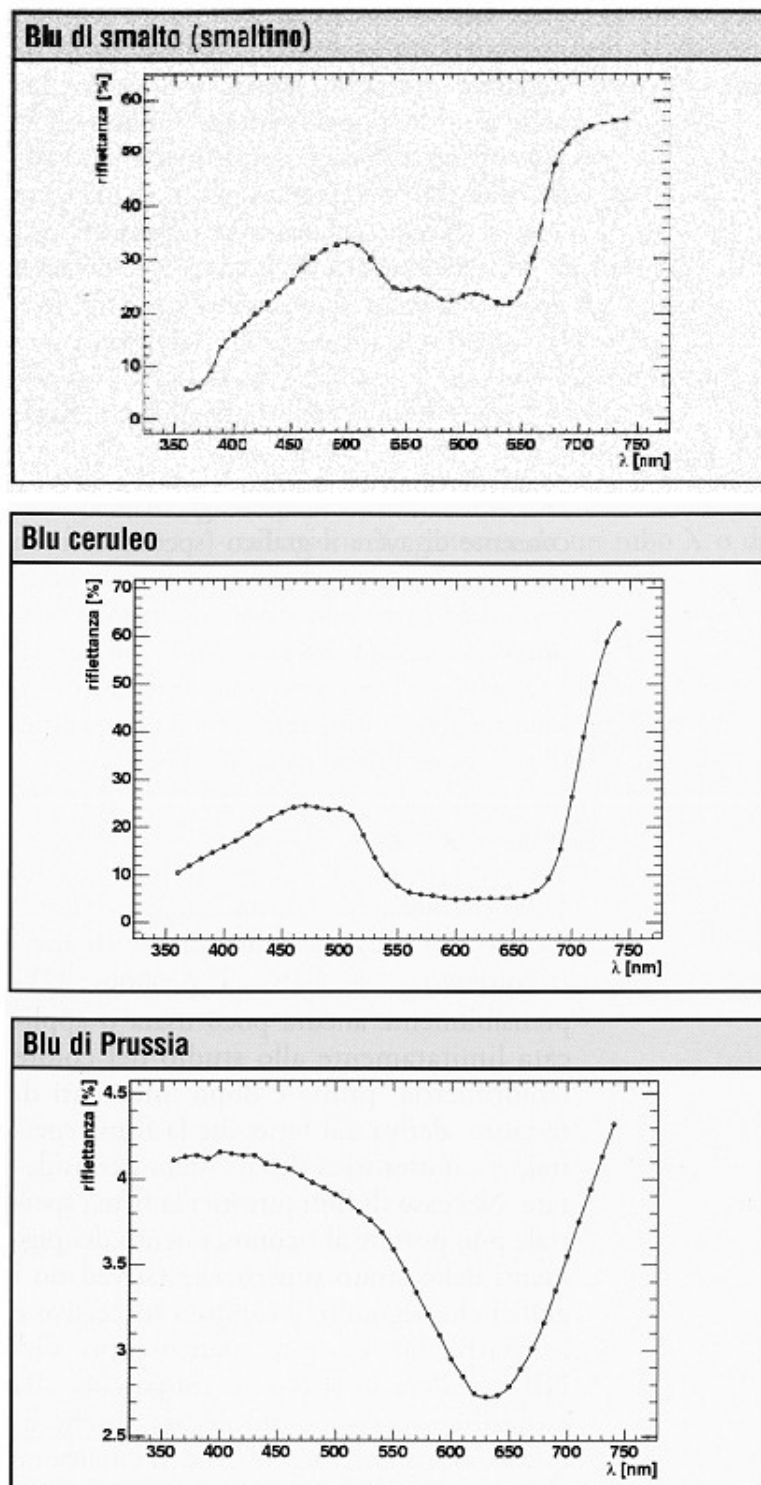


Fig. 4.10: Esempi di firme spettrali nel visibile di pigmenti.

## 4.3 Il laser

Il LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) è un dispositivo che emette luce attraverso un processo di amplificazione ottica basata sull'emissione stimolata di radiazione elettromagnetica.

Secondo il tipo di strumento utilizzato la lunghezza d'onda varia da 700 a 200nm, toccando l'infrarosso, il visibile e l'ultravioletto.

Il laser è in grado di emettere un fascio di luce coerente e monocromatica concentrata in un raggio rettilineo estremamente collimato.

Con l'emissione stimolata l'atomo eccitato ritorna allo stato energetico iniziale a seguito della stimolazione effettuata dal fotone incidente.

I fotoni in uscita sono nella stessa direzione di quelli incidenti e tutti in fase (creste e avvallamenti allineati fra loro).

L'emissione nel sistema del fotone incidente viene definito *pompaggio*.

Le caratteristiche peculiari della radiazione laser sono:

- la direzionalità, il laser permette infatti di emettere la radiazione in un'unica direzione con un angolo solido estremamente piccolo;
- la monocromaticità del fascio luminoso;
- la brillantezza, ovvero l'elevato numero di fotoni per unità di frequenza;
- la coerenza (i fotoni in uscita sono tutti in fase che viene mantenuta nello spazio e nel tempo);
- Impulsi ultra-brevi, in quanto i pacchetti di onde emessi dal laser sono estremamente stretti nel dominio del tempo. Gli impulsi possono essere dell'ordine del femtosecondo.

Il laser viene utilizzato per molteplici scopi avendo proprietà meccaniche, termiche e ottiche.

Per le indagini non invasive, nel campo dei beni culturali, il laser viene utilizzato per le proprietà ottiche come misuratore di distanze.

L'apparecchio elementare che si basa sulla tecnologia laser è il distanziometro elettronico laser.

Gli attuali distanziometri sono classificati in due grosse categorie.

I *distanziometri ad impulso* che calcolano la misura basandosi sui tempi trascorsi tra due impulsi o tra due treni d'onda.

I *distanziometri a misura di fase* che calcolano la misura basandosi sullo

sfasamento tra l'onda emessa e quella ricevuta.

Sulla base del distanziometro si sono realizzati i Laser Scanner 3D.

Queste apparecchiature si basano su un sistema automatico di rilevamento di distanze in uno spazio sferico, determinando così una nuvola di punti.



Fig. 4.11: Laser scanner.

I Laser Scanner 3D si distinguono in due grandi famiglie: quelli a tecnologia a tempo di volo (TOF) e quelli a triangolazione.

In architettura la tecnologia più usata è quella che si basa sulla misura del tempo di volo (T.O.F. - Time Of Flight technology).

Il principio di funzionamento della misura di distanza effettuata con il laser può essere così sintetizzato.

Un generatore di impulsi elettrici impone periodicamente ad un diodo laser semiconduttore di emettere degli impulsi di luce, indirizzati e convogliati da una lente di emissione.

Una seconda lente di ricezione capta la parte del segnale di eco del raggio laser riflesso dalla superficie di impatto dell'oggetto, mentre un fotodiodo produce un segnale di ricezione elettrico.

L'intervallo di tempo tra il segnale emesso e l'eco del segnale ricevuto è quantificato da un orologio stabilizzato al quarzo.

Il risultato viene trasmesso ad un microelaboratore interno che trasforma il dato ricevuto in una misura di distanza, nota la velocità di propagazione dell'impulso nel mezzo considerato (aria) e il tempo di volo.

La maggior parte dei laser scanner raggiunge precisioni comprese fra i 6 e i 100mm sulla misura della distanza.

Per avere la conoscenza tridimensionale, l'impulso laser viene deflesso sull'intero oggetto da rilevare per mezzo di due specchi mossi da servomeccanismi elettrici.

Per l'individuazione spaziale dei punti rilevati, lo strumento utilizza un sistema di riferimento sferico con origine posta in corrispondenza di un punto interno dello strumento.

I valori rilevati per ogni punto acquisito sono: la distanza tra il centro di presa dello strumento e l'oggetto colpito dal raggio laser, l'angolo zenitale del raggio emesso rispetto all'asse verticale dello strumento e l'angolo azimutale del raggio emesso rispetto ad un asse orizzontale preso come riferimento.

La seconda grande famiglia di Laser Scanner 3D è quella che si basa sul sistema della triangolazione.

Con questa strumentazione il raggio laser, deflesso secondo un passo incrementale, colpisce l'oggetto secondo una scansione regolare, ed il segnale riflesso viene catturato da un sensore di immagine a stato solido CCD, posto ad una distanza prefissata rispetto al punto da cui il raggio laser viene inviato all'oggetto.

Il calcolo della distanza tra il centro di presa dello strumento e l'oggetto colpito dal raggio laser è analogo alla triangolazione in topografia.

Questi strumenti operano su distanze minori ma offrono una precisione maggiore, anche sub-millimetrica, per cui sono estremamente validi nel campo dei beni culturali per rilevare sculture e decorazioni architettoniche.

Le problematiche relative ai rilievi con Laser Scanner 3D sono le seguenti:

- il passo incrementale con cui lo strumento acquisisce i dati può non intercettare correttamente gli spigoli;
- lungo il percorso del raggio vi possono essere interferenze che falsano il rilievo;
- la quantità elevata di punti acquisiti che rendono precisa, ma

estremamente difficoltosa la restituzione grafica dell'oggetto rilevamento.

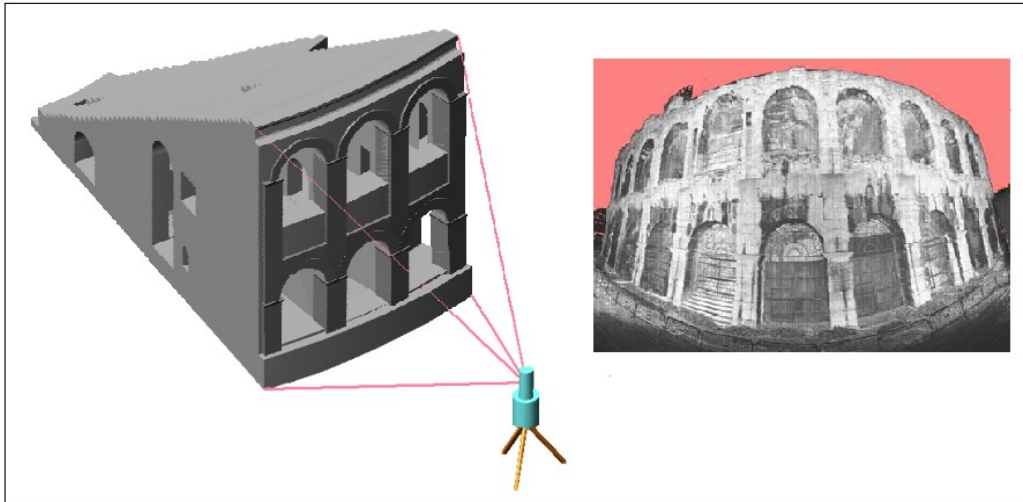


Fig. 4.12: Rappresentazione grafica di un rilievo con Laser Scanner 3D.

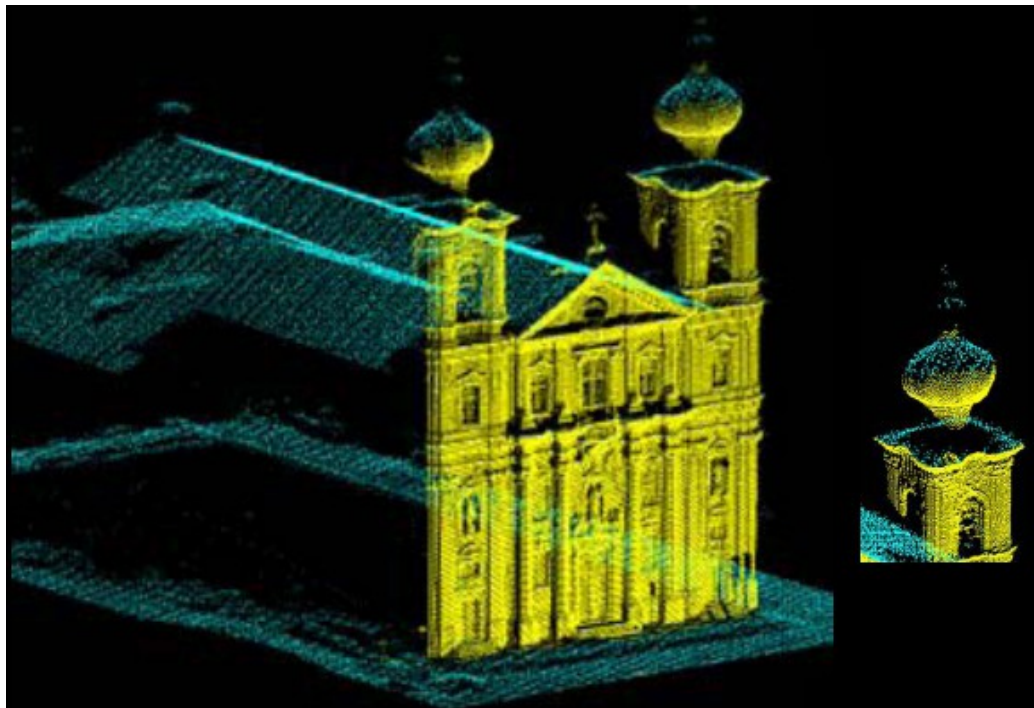


Fig. 4.13: Nuvola di punti di un rilievo effettuato con Laser Scanner 3D.

## Capitolo 5

### Ultravioletti

La radiazione ultravioletta (UV) è una radiazione elettromagnetica con lunghezza d'onda dai 10 ai 400 nm, detta anche luce nera perché non è visibile ad occhio nudo.

Il nome significa *oltre violetto* (dal latino *ultra* “oltre”), cioè oltre il colore viola che è la frequenza più alta del visibile.

I raggi ultravioletti furono scoperti nel 1801 da Johann Wilhelm Ritter che ottenne un rapido annerimento del cloruro d'argento usando la stessa metodologia del prisma di W. Herschel (scopritore dei raggi IR).

L'energia solare è composta per circa il 5% da ultravioletti in tre bande di lunghezza d'onda di cui solo la prima, denominata UV-A, riesce a raggiungere in grande quantità la superficie terrestre, mentre le UV-B e UV-C sono quasi totalmente assorbite dallo strato di ozono.

Nome	Abbreviazione	Lunghezza d'onda [nm]
Ultravioletto A	UVA	400 ÷ 315 nm
Ultravioletto B	UVB	315 ÷ 280 nm
Ultravioletto C	UVC	280 ÷ 100 nm
Ultravioletto Vicino	NUV	400 ÷ 300 nm
Ultravioletto Medio	MUV	300 ÷ 200 nm
Ultravioletto Lontano	FUV	200 ÷ 122 nm
Ultravioletto Estremo	EUV	121 ÷ 10 nm

La radiazione ultravioletta può essere prodotta anche artificialmente con lampade ad arco al mercurio, allo xeno, al deuterio ed altri tipi di lampade, di cui le più note sono:

- lampada di Wood;
- lampade a scarica di gas;

- LED Ultravioletto;
- laser ultravioletto.

Nel campo dei beni culturali è comunemente usata la lampada di Wood.

La lampada di Wood è una lampada a scarica che emette raggi ultravioletti di lunghezza d'onda compresa fra i 320 e i 400 nm con un picco a circa 360 nm.

Fu realizzata negli anni '20 da Robert William Wood utilizzando un filtro in vetro a base di ossido di nichel che blocca la radiazione visibile, ma è trasparente alla radiazione UV.

Da questo filtro particolare si ottengono lampade che emettono solo radiazioni UV la cui sorgente di luce non è percepibile all'occhio umano e per questo motivo, oltre al nome dell'inventore "Wood", vengono chiamate anche lampade a luce nera.



Fig. 5.1: Esempi di lampade a luce nera o di Wood.

## 5.1 La fluorescenza UV

La *fluorescenza* è la capacità di alcuni materiali di emettere luce nel visibile quando vengono colpiti da radiazioni ultraviolette.

Sono fluorescenti le molecole con un'elevata coniugazione:

- strutture con molti elettroni  $\pi$  coniugati;
- strutture planari con anelli aromatici.

Molti dei materiali usati nella pittura tradizionale emettono, anche se debolmente, luce fluorescente nel visibile.



L'emissione per fluorescenza dipende dalle vernici superficiali (semi-trasparenti) e da alcune componenti, leganti e pigmenti, che costituiscono lo strato pittorico. Un oggetto sottoposto ad una sorgente UV, come la lampada di Wood, emette luce nel visibile sotto forma di luminescenza (fluorescenza o fosforescenza). Il diagramma di Jablonski schematizza le transizioni elettroniche che sono alla base della luminescenza.

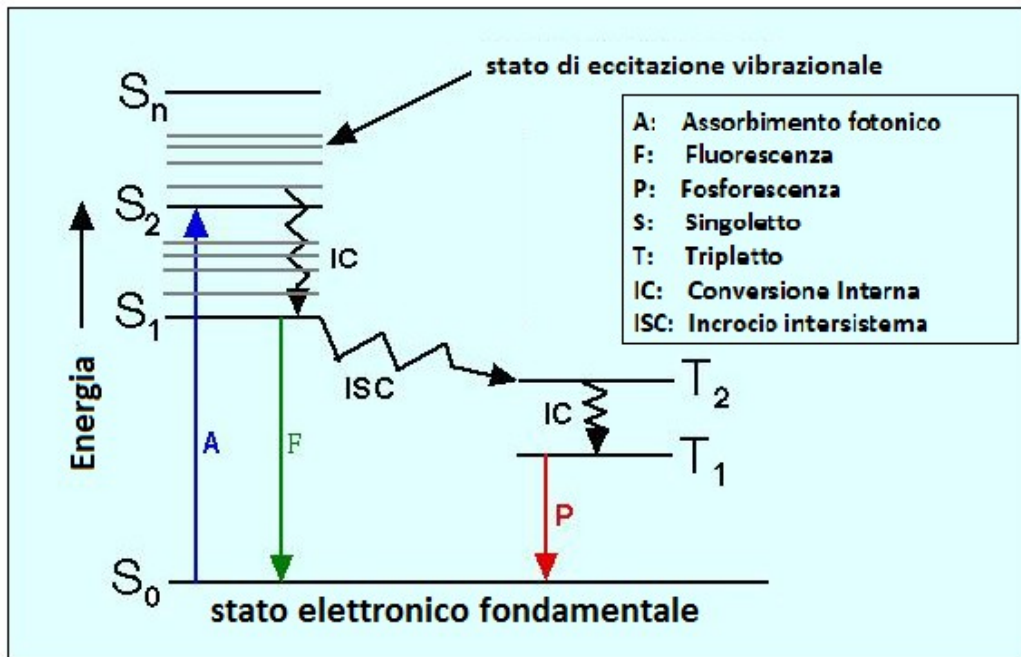


Fig. 5.2: Diagramma di Jablonski.

Una molecola allo stato fondamentale  $S_0$ , a seguito dell'assorbimento di luce, viene eccitata a uno dei suoi stati elettronici  $S_1$ ,  $S_2$ , ecc..

La molecola eccitata nello stato  $S_2$ , a più alta energia, può ricadere nello stato di minor energia  $S_1$ , senza emettere radiazioni, mediante una serie di transizioni, chiamate conversioni interne e dissipando l'energia accumulata sotto forma di calore.

La molecola eccitata nello stato di *singoletto*  $S_1$  può ricadere nello stato fondamentale  $S_0$ , emettendo una radiazione tramite un processo chiamato *fluorescenza*.

La molecola eccitata nello stato di singoletto può anche sottostare a un

interscambio senza radiazioni che richiede il disaccoppiamento di spin, passando allo stato di *tripletto*, T1, tramite un *incrocio intersistema*.

Da questo stato di tripletto eccitato può ricadere allo stato fondamentale con emissione di energia.

L'energia associata alla conversione di T1 in S0 è il fenomeno che si chiama *fosforescenza*.

Poiché si perde energia nelle transizioni senza radiazioni che sempre si accompagnano alla transizione fluorescente, l'energia del fotone emesso è sempre minore dell'energia del fotone assorbito, cioè la  $\lambda$  della luce prodotta nel percorso di luminescenza è sempre maggiore della lunghezza d'onda della luce eccitante.

L'emissione di fotoni in seguito all'assorbimento di radiazioni elettromagnetiche può avvenire in un tempo più o meno breve:

- la *fluorescenza*, è caratterizzata da un intervallo di tempo tra eccitazione ed emissione dell'ordine di  $10^{-8}$  secondi. Il fenomeno è presente solo con la radiazione incidente attiva;
- la *fosforescenza* ha intervallo di tempo tra eccitazione ed emissione maggiore di  $10^{-3}$  secondi e permane per tempi più o meno lunghi dopo che la radiazione incidente è cessata.

Dall'analisi delle radiazioni capaci di eccitare la fluorescenza si ricava lo spettro di eccitazione, che è in pratica lo spettro di assorbimento della sostanza.

Lo spettro di fluorescenza o di emissione è l'insieme delle radiazioni emesse per fluorescenza.

La fluorescenza UV, che è maggiormente visibile nei materiali organici, agevola l'individuazione di integrazioni e ridipinture realizzate con materiali diversi da quelli originali.

I pigmenti e le vernici utilizzati in tempi successivi sull'opera, anche se nel visibile si presentano cromaticamente uguali agli originali, in fluorescenza UV hanno in generale comportamenti differenti; inoltre l'intensità di fluorescenza tende ad aumentare con l'invecchiamento per cui materiali recenti presentano fenomeni di fluorescenza minori rispetto a quelli più datati.

Non essendo le radiazioni ultraviolette capaci di penetrare gli strati di colore le indagini rimangono limitate allo strato superficiale visibile.

Il comportamento riguardo alla fluorescenza dei pigmenti è condizionato dal

legante e viceversa, per cui la fluorescenza UV non può essere considerata una tecnica certa per il riconoscimento dei materiali.

Tendenzialmente le stesure ad olio, materiale organico, sono più sensibili alla fluorescenza delle opere realizzate a tempera.

<b>materiale superficiale</b>	<b>colore di fluorescenza</b>
bianco di titanio (in olio o tempera)	nessuna
bianco di zinco (in olio o tempera)	rosa pallido
bianco di piombo (in olio o tempera)	bianco-azzurro
pigmenti rameici: azzurrite, malachite, verderame	nessuna
giallo di Napoli (a tempera)	nessuna
terra di Siena (a tempera)	nessuna
giallo di cadmio (a tempera)	nessuna
realgar e orpimento (a tempera)	giallo
olio	giallo
tempera a uovo	azzurrognolo
gommalacca	giallo - marrone
gomma arabica	nessuna
caseina	nessuna
paraloid, mowilith, plexisol	nessuna

L'importanza di questa tecnica di indagine è prevalentemente legata allo studio dello stato di conservazione dell'opera.

La strumentazione (lampada di Wood), poco ingombrante, maneggevole e poco costosa, richiede particolari cautele durante l'uso per i danni che le radiazioni UV possono indurre sia sui materiali indagati (invecchiamento artificiale), che sugli occhi degli operatori.

L'uso degli occhiali protettivi ha la funzione non solo di protezione degli occhi dalle radiazioni ultraviolette, ma anche di migliorare la leggibilità da parte

dell'operatore del fenomeno della fluorescenza, in quanto senza lenti l'immagine apparirebbe più nebulosa e confusa.

I tipi di lampada di Wood normalmente usati sono a tubo o a bulbo e sono immediatamente distinguibili per il vetro nero.

Il picco di emissione della radiazione UV è centrato su 365 nm di lunghezza d'onda, ma rimane sempre una parte di spettro che sconfina nel visibile.

Questa radiazione, essendo paragonabile alla fluorescenza dei materiali da indagare, non deve essere trascurata.

Uno dei maggiori problemi nell'impiego di questa tecnica, oltre alla necessità di operare totalmente al buio, consiste nella difficoltà di registrare le immagini con i colori che l'operatore visivamente percepisce, infatti raramente si realizzano immagini di grande qualità e di vaste porzioni dell'opera.



Fig. 5.3: Polidoro da Caravaggio – Perseo combatte contro gli uomini di Polidette (Affresco nel Casino del Palazzo del Bufalo a Roma). Fluorescenza indotta dalla radiazione UV.

## Capitolo 6

### Raggi X

I raggi X sono una forma di radiazione elettromagnetica con una lunghezza d'onda tra 10 nm e 1 pm corrispondente ad un intervallo di frequenza da 30 PHz a 300 EHz.

Nel 1895 Wilhelm Röntger scoprì casualmente i raggi X mentre eseguiva esperimenti con tubi a vuoto.

L'attuale tubo a raggi X è un'ampolla di vetro sotto vuoto spinto contenente un catodo e un anodo alimentati ad alta tensione.

Il catodo (polo negativo) è costituito da un filamento di materiale conduttivo percorso da corrente.

L'anodo (polo positivo), situato al polo opposto dell'ampolla è costituito da un disco di metallo pesante con elevato numero atomico.

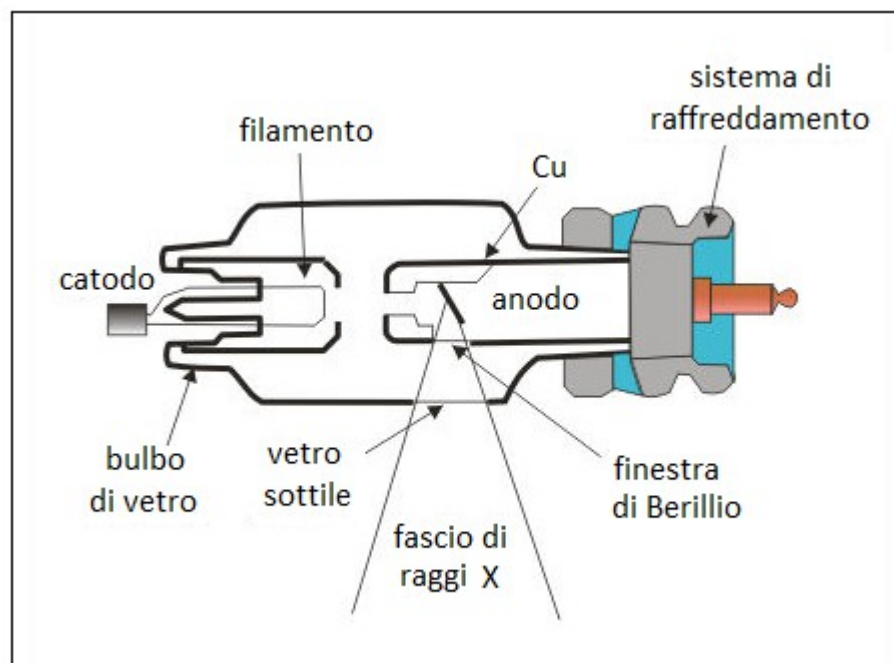


Fig. 6.1: Schema di un tubo a raggi X.

Il tubo è a sua volta contenuto in una guaina metallica con schermatura in piombo. Lo scopo della guaina è la protezione meccanica e la dissipazione termica.

L'anodo, essendo inclinato rispetto al catodo, deflette i raggi X su un lato dell'ampolla detto finestra. La finestra non è schermata con il piombo, ma ha egualmente filtri in rame o alluminio per quella parte di raggi X a più bassa energia.

Il funzionamento consiste nel riscaldamento del filamento del catodo con la corrente che, per effetto termoelettrico, emette elettroni.

Data l'alta differenza di potenziale fra catodo ed anodo la nube elettronica formatasi attorno al catodo viene proiettata verso l'anodo colpendo il disco metallico. Nell'impatto l'energia cinetica si trasforma in calore (99% circa) e in radiazione X (1% circa).

La generazione di raggi X avviene per *Bremsstrahlung* (radiazione di frenamento) e per emissione di *radiazione caratteristica*.

## 6.1 Componente di Bremsstrahlung (radiazione di frenamento)

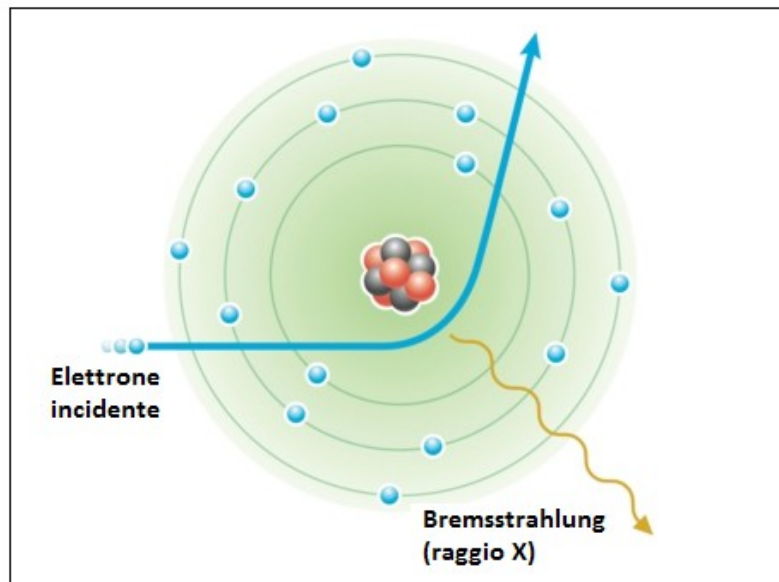


Fig. 6.2: Generazione della radiazione di Bremsstrahlung.

La *Bremsstrahlung* è la radiazione elettromagnetica prodotta dalla decelerazione di una particella carica quando è deviata da un'altra particella carica (elettrone deviato dal nucleo).

La particella deviata perde energia cinetica che viene convertita in un fotone, soddisfacendo così la legge di conservazione dell'energia.

Nel caso specifico dei raggi X la radiazione di *Bremsstrahlung* ha uno spettro continuo che forma una curva a campana.

Con l'aumentare dell'energia delle particelle accelerate, aumenta l'energia massima dei raggi X prodotti.

Vale infatti la relazione:

$$E_{\max} = h \cdot f_{\max} = E_{\text{cinetica}} = e \cdot U$$

equivale a:

$$\lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U}$$

con:

- $h$  = costante di Planck;
- $c$  = velocità della luce;
- $e$  = carica dell'elettrone;
- $U$  = tensione di accelerazione, ovvero tensione anodica del tubo a raggi X.

Da cui si deduce che la  $\lambda_{\min}$  dipende solo dalla tensione  $U$ .

## 6.2 Radiazione caratteristica

La radiazione caratteristica dipende dal materiale di cui è costituito il disco di metallo dell'anodo.

Quando un elettrone ad alta energia (elettrone incidente) colpisce un elettrone legato ad un atomo (elettrone bersaglio), l'elettrone bersaglio viene espulso dal guscio interno dell'atomo.

Con la rimozione dell'elettrone interno si crea una lacuna che viene compensata

da un elettrone di un livello esterno.

Esiste un numero limitato di modi in cui questa transizione può avvenire di cui le principali sono:

- dal livello L al livello K, chiamata  $K_{\alpha}$ ;
- dal livello M al livello K, chiamata  $K_{\beta}$ ;
- dal livello M al livello L, chiamata  $L_{\alpha}$ .

L'elettrone esterno in questa transizione emette radiazioni quantizzate pari alla differenza di energia tra stati superiori e inferiori.

Ciascun elemento ha un unico insieme di livelli di energia e quindi lo spettro di emissione di raggi X, a seguito delle transizioni avvenute, ha frequenze che sono caratteristiche del materiale che costituisce l'anodo.

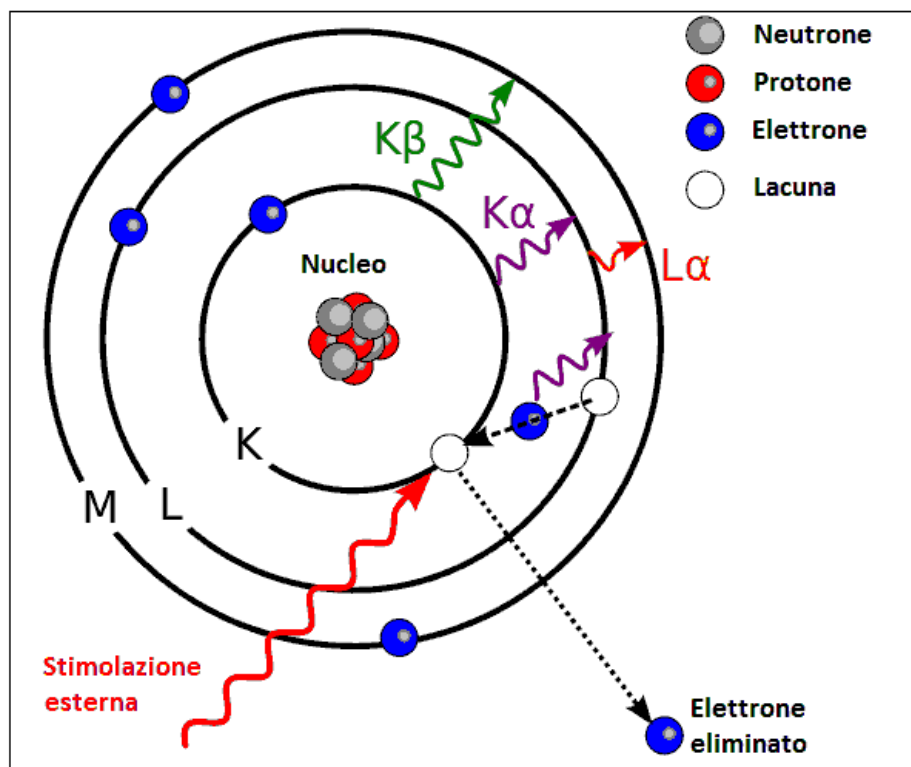


Fig. 6.3: Generazione di radiazione caratteristica.



Materiale dell'anodo	Numero atomico	Energia del fotone [keV]	
		$K_{\alpha}$	$K_{\beta}$
W	74	59,3	67,2
Mo	42	17,5	19,6
Cu	29	8,05	8,91
Ag	47	22,2	24,9
Ga	31	9,25	10,26
In	49	24,2	27,3

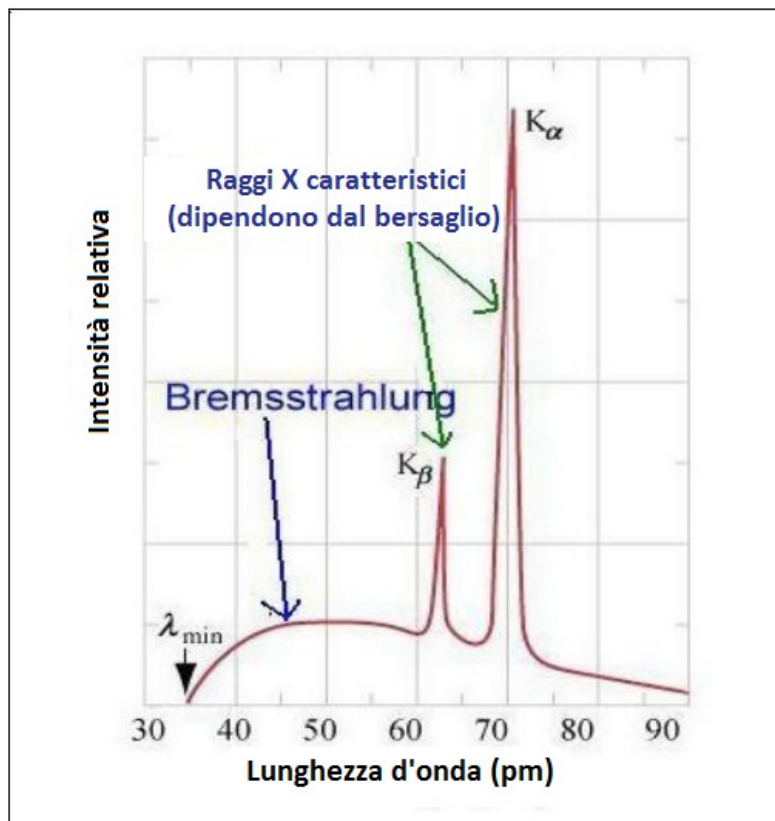


Fig. 6.4: Schema di un tipico spettro dei raggi X prodotti da un tubo radiogeno.

## 6.3 Interazione con la materia

I fotoni dei raggi X trasportano energia sufficiente a ionizzare gli atomi.

Il potere di penetrazione, detto anche durezza, aumenta con l'aumentare del potenziale che eccita il tubo radiogeno.

L'interazione con la materia avviene principalmente in tre modi: *Rayleigh scattering*, *effetto fotoelettrico* e *Compton scattering*.

Se la sorgente dei raggi X è un tubo radiogeno non sono infatti possibili altri meccanismi di interazione che avvengono ad energie più elevate, quali la produzione di coppie e tripletti e le reazioni fotonucleari.

Nel Rayleigh scattering la perdita di energia del fotone è nulla, nel Compton scattering è parziale, mentre nell'effetto fotoelettrico è totale.

### 6.3.1 Rayleigh scattering

Nel Rayleigh scattering il fotone incidente viene diffuso elasticamente ad angoli molto ridotti (diffusione "in avanti"), praticamente senza alcuna perdita di energia.

L'energia del fotone incidente è insufficiente ad eccitare o ionizzare l'atomo.

La sezione d'urto è quindi il coefficiente di attenuazione ad essa proporzionale a  $Z^{2,5}$ .

La sezione d'urto  $\sigma$  è la misura della probabilità di occorrenza di un dato processo e ha le dimensioni di un'area misurata in barn ( $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ ).

### 6.3.2 Effetto fotoelettrico

L'effetto fotoelettrico avviene quando un fotone X, interagendo con un elettrone legato di un atomo, cede completamente la sua energia espellendo l'elettrone.

Il fotoelettrone (elettrone espulso) acquista un'energia cinetica  $E_c$  uguale alla differenza tra l'energia del fotone incidente ( $h \cdot \nu_0$ ) e la sua energia di legame  $E_l$ :

$$E_c = h \cdot \nu_0 - E_l$$

La probabilità di interazione per effetto fotoelettrico è nulla se l'energia del fotone incidente è inferiore all'energia di legame dell'elettrone.

La probabilità del fenomeno cresce all'aumentare del numero atomico  $Z$  la sezione d'urto risulta:

$$\sigma \propto Z^4$$

L'effetto fotoelettrico è più probabile con gli elettroni più legati “guscio K”.

I raggi X caratteristici hanno questo nome perché sono caratteristici dell'atomo  $s$  con cui il fotone incidente interagisce e la posizione dei picchi dipende dal numero atomico dell'atomo.

Un processo alternativo all'emissione di fotoni X è l'*effetto Auger*.

Non sempre l'energia rilasciata viene convertita con l'emissione di un fotone X, può accadere che questa energia venga ceduta ad un terzo elettrone del guscio più esterno che infatti riesce così a raggiungere il livello di energia necessario per fuoriuscire dall'atomo.

Questo processo chiamato *emissione di Auger* e l'elettrone espulso in seguito al fenomeno è chiamato *elettrone di Auger*.

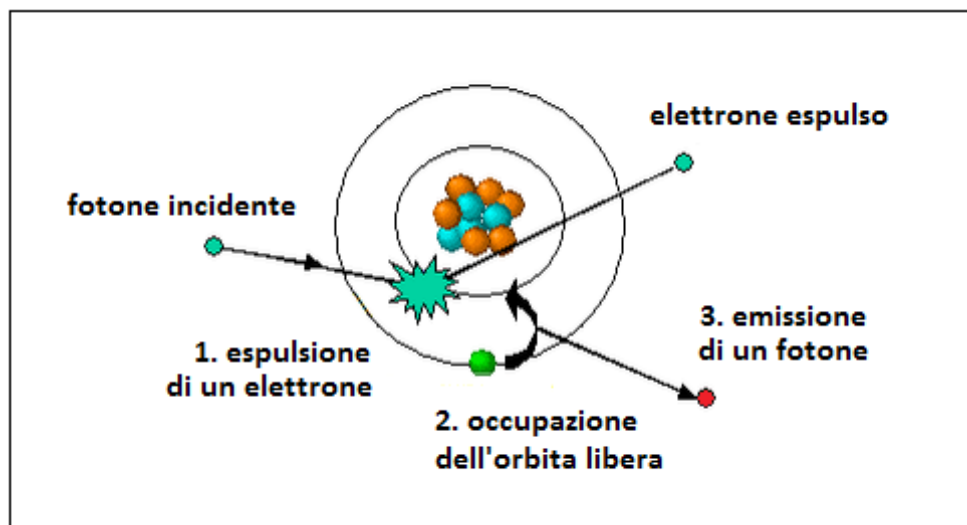


Fig. 6.5: Effetto fotoelettrico.

### 6.3.2 Compton scattering

Il Compton scattering avviene quando l'energia del fotone incidente è molto più elevata dell'energia di legame dell'elettrone con il quale interagisce liberandolo. Il fenomeno può essere descritto dalla meccanica classica come un urto elastico tra due particelle.

Applicando le leggi di conservazione dell'energia si ha:

$$h \cdot \nu_0 + m_e \cdot c^2 = h \cdot \nu + E_{tot}$$

con  $E_{tot}$  = massa a riposo + energia cinetica dell'elettrone "scatterato".

Per un angolo di diffusione  $\alpha = 0^\circ$  si ha  $h \cdot \nu_0 = h \cdot \nu$ ; in questo caso il quanto non perde energia.

Con  $\alpha = 180^\circ$  (quanto diffuso all'indietro) si ha la massima perdita di energia da parte del fotone.

L'elettrone acquista energia cinetica data da:

$$E_c = h \cdot \nu_0 - h \cdot \nu$$

Il Compton scattering risulta predominante per energie comprese fra 100keV e 2MeV.

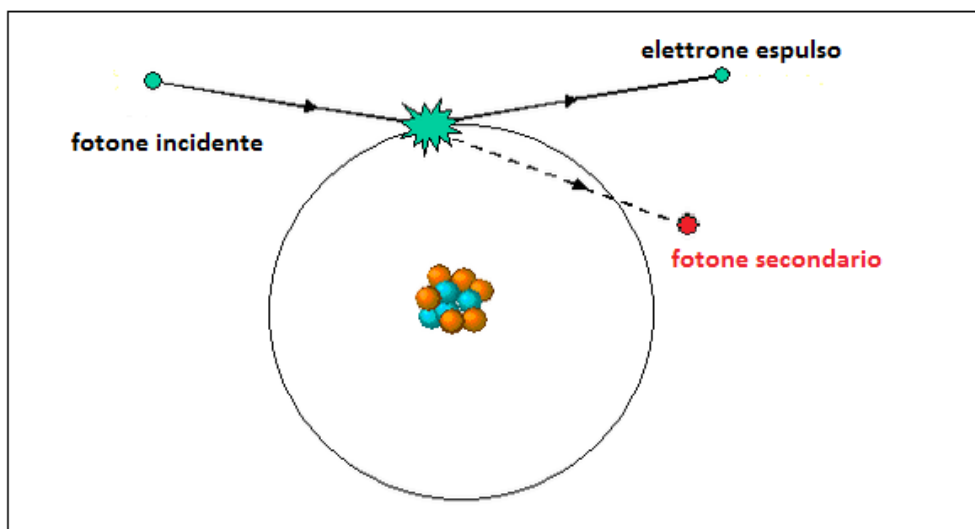


Fig. 6.6: Compton scattering.

## 6.4 Fluorescenza X

L'analisi di fluorescenza a raggi X (XRF X-ray fluorescence) è un metodo di analisi dei materiali basato sul fenomeno della fluorescenza indotta da raggi X.

È uno dei metodi più comunemente utilizzati, di tipo non distruttivo, per la determinazione qualitativa degli elementi che costituiscono un campione.

L'applicazione di questa tecnica ai beni culturali è iniziata alla fine degli anni '60, ma la consacrazione ufficiale e definitiva della fluorescenza X (nel seguito indicata come XRF) è avvenuta al convegno promosso dall'Accademia Nazionale dei Lincei, tenutosi a Roma e Venezia dal 24 al 29 maggio 1973, dal titolo "Applicazione dei metodi nucleari nel campo delle opere d'arte".

Quando i fotoni dei raggi X incidono su una superficie di un oggetto possono, come già precedentemente illustrato, avere diverse interazioni:

- Rayleigh scattering;
- effetto fotoelettrico;
- Compton scattering.

Solo l'effetto fotoelettrico è rilevante per la fluorescenza X.

In questo caso se i fotoni X incidenti hanno energia sufficiente possono estrarre elettroni dalle orbite più interne degli atomi presenti, denominate K, L, M, ecc..., lasciando gli atomi stessi in uno stato eccitato.

La diseccitazione avviene immediatamente con il salto di elettroni degli orbitali esterni verso quelli interni in cui si sono generate le lacune degli elettroni estratti dai fotoni X.

Questi salti dagli orbitali esterni verso gli orbitali interni sono accompagnati da emissione di raggi X caratteristici.

L'energia della radiazione X, infatti, corrisponde alla differenza tra il livello energetico di partenza dell'elettrone e quello di arrivo nell'atomo, livelli che sono caratteristici dell'atomo stesso. Questi raggi X vengono detti raggi X di fluorescenza.

La fluorescenza X viene sfruttata per analizzare la composizione superficiale di un oggetto irraggiandolo di fotoni di opportuna energia e misurando l'energia e l'intensità della radiazione di fluorescenza emessa: l'energia uscente è legata all'elemento chimico interagente, mentre l'intensità alla sua abbondanza nel materiale sottoposto ad analisi.

A seconda del livello energetico da cui l'elettrone viene espulso si avranno emissioni di fluorescenza, dette anche righe, della serie K o della serie L, rispettivamente  $\alpha$  o  $\beta$ , a seconda della provenienza dell'elettrone sostitutivo.

Ognuna di queste righe è in realtà la sovrapposizione di due righe ad energie lievemente diverse, come si può dedurre considerando la struttura dettagliata dei livelli energetici degli elettroni nei singoli orbitali.

L'energia della radiazione di fluorescenza X emessa dal materiale oggetto d'indagine è quindi legata agli elementi chimici presenti ed è caratteristica di ciascun elemento.

Non esiste mai una completa sovrapposizione delle righe prodotte anche tra elementi di massa atomica assai simile, questa differenza di emissione spettrale garantisce l'individuazione univoca dell'elemento chimico.

La tecnica XRF ha diverse limitazioni: la prima deriva dalla rapida diminuzione dell'energia delle righe di fluorescenza con il numero atomico Z, per cui elementi con  $Z < 15$  (fosforo) non possono essere rilevati. Questo limite esclude la possibilità di osservare tutti i composti organici.

La seconda deriva dall'impossibilità di effettuare determinazioni strettamente quantitative dei materiali. L'intensità delle righe caratteristiche di un certo elemento, legata alla concentrazione, dipende dalla composizione globale della regione interessata dalla misura e dalla distribuzione in profondità dell'elemento, a causa dell'effetto di schermo ai raggi X di eccitazione e fluorescenza, che ogni strato di materiale esercita sui sottostanti.

La terza è che la tecnica XRF consente di individuare soltanto gli elementi chimici e non i composti cui essi appartengono.

Le analisi con tecnologia XRF sono raggruppate in due grandi classi.

*EDXRF* (Energy Dispersive XRF) – analisi in dispersione di energia in cui si legge la radiazione di fluorescenza emessa.

*WDXRF* (Wave Dispersive XRF) – analisi in dispersione di lunghezza d'onda in cui si determina la lunghezza dell'onda, ma che necessita di microprelievi invasivi.

Se pur con i limiti sopra esposti la tecnica XRF nella versione EDXRF riesce ad essere efficace in quanto non invasiva, è eseguibile in situ mediante strumentazione portatile ed estremamente rapida (circa 100s per punto di misura).

Questa facilità e rapidità di esecuzione permette di effettuare un esame

dettagliato dell'opera oggetto di analisi.

La tabella seguente indica le energie (keV) dei raggi X di fluorescenza emesse dagli elementi di interesse pratico per lo studio in situ di superfici policrome.

<b>Z</b>	<b>elemento</b>	<b>K<sub>α</sub></b>	<b>K<sub>β</sub></b>	<b>L<sub>α</sub></b>	<b>L<sub>β</sub></b>
19 K	potassio	3,31	3,59	-	-
20 Ca	calcio	3,69	4,01	-	-
23 V	vanadio	4,95	5,43	-	-
24 Cr	cromo	5,41	5,95	-	-
25 Mn	manganese	5,89	6,49	-	-
26 Fe	ferro	6,40	7,06	-	-
27 Co	cobalto	6,93	7,65	-	-
28 Ni	nichel	7,47	8,26	-	-
29 Cu	rame	8,04	8,90	-	-
30 Zn	zinco	8,63	9,57	-	-
33 As	arsenico	10,53	11,73	-	-
37 Rb	rubidio	13,37	14,96	-	-
38 Sr	stronzio	14,14	15,84	-	-
40 Zr	zirconio	15,74	17,67	-	-
42 Mo	molibdeno	17,43	19,61	-	-
47 Ag	argento	22,08	24,94	2,98	3,25
48 Cd	cadmio	23,08	26,10	3,13	3,43
49 In	indio	24,11	27,28	3,28	3,60
50 Sn	stagno	25,16	28,49	3,44	3,78
51 Sb	antimonio	26,24	29,73	3,60	3,97
55 Cs	cesio	30,80	34,99	4,28	4,78
74 W	tungsteno	58,65	67,24	8,37	9,82
79 Au	oro	67,90	77,98	9,67	11,51
80 Hg	mercurio	69,89	80,25	9,95	11,87
82 Pb	piombo	73,89	84,94	10,50	12,62
83 Bi	bismuto	75,96	87,34	10,76	13,00

Tablelle comparative come la seguente, che elenca i principali pigmenti utilizzati in occidente tra trecento e cinquecento, abbinata ad altre tecniche di indagini permettono di individuare i pigmenti pittorici.

<b>pigmento</b>	<b>formula chimica</b>	<b>elementi individuabili con XRF</b>	<b>riconoscibile con certezza mediante XRF</b>
<b>Bianchi</b>			
bianco di piombo o biacca	$2\text{PbCO}_3\text{Pb(OH)}_2$	Pb	Sì, rispetto ad altri bianchi
bianco di piombo o biacca	$\text{CaCO}_3$	Ca	No, confondibile con gesso o bianco d'ossa
gesso comune	$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	S,Ca	Sì, quando è individuabile S
<b>Violetti</b>			
violetto oltremare	varietà violetta del lapislazzuli (vedi)		
<b>Azzurri</b>			
azzurrite	$2\text{CuCO}_3\text{-Cu(OH)}_2$	Cu	Sì
lapislazzuli o oltremare naturale	$3\text{Na}_2\text{O-3Al}_2\text{O}_3\text{-6SiO}_2\text{-2Na}_2\text{S}$ + spato calcareo (Ca) - tracce di pirite(Fe)	(Al), (Si), Fe	Non sempre
<b>Verdi</b>			
malachite	$\text{CuCO}_3\text{Cu(OH)}_2$	Cu	No, confondibile con verderame e resinato di rame
verderame	$\text{Cu(CH}_3\text{COO)}_2\text{2Cu(OH)}_2$	Cu	No, confondibile con malachite e resinato di rame
verderame trasparente o resinato di rame	$\text{Cu(CH}_3\text{COO)}_2\text{2Cu(OH)}_2$ in resina naturale	Cu	No, confondibile con malachite e verderame
<b>Gialli (e arancio)</b>			



ocre gialle	$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O} + \text{Si, Al}$	(Al), (Si), Fe	Sì
gialli di piombo	$\text{PbO, Pb}_2\text{SnO}_4,$ $\text{Pb}_3(\text{SbO}_4)_2, \text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$	Pb, eventualment e anche Sn o Sb	Sì, se solo Pb indistinguibili dal litargirio
orpimento (giallo) e realgar (rosso- arancio)	orpimento: $\text{As}_2\text{S}_3$ ; realgar: $\text{AsS, As}_4\text{S}_4$	S,As	Sì, non distinguibili tra loro
lacche gialle	coloranti organici		No
<b>Rossi</b>			
ocra rossa	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{argille}$	Fe	Confondibile con ematite
ematite	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (95%)	Fe	Confondibile con ocra rossa
rosso veneziano (rosso mattone)	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Fe	Confondibile con ocra rossa
bolo rosso	caolino con ossidi di Fe	(Al),(Si), Fe	Sì, quando è individuabile Al
<b>Bruni</b>			
terre	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{argille e}$ $\text{MnO}_2$	Fe, Mn	Sì, non distinguibili i diversi tipi (terra di Siena, d'ombra, di Verona)
bitume	miscela di idrocarburi ad alto peso moleco- lare e altre sostanze		No
bistro	miscela di idrocarburi ad alto peso moleco- lare e altre sostanze		No
seppia	colorante organico		No
<b>Neri</b>			
nerofumo, nero di carbone o di vite, grafite	organici		No
gesso nero	materiale argilloso di carbone	Fe	Sì

Altro elemento che determina la curva di fluorescenza X è dato dalla differenza di potenziale fra catodo ed anodo nel tubo a raggi X.

Nelle figure seguenti si può notare la differenza di risposta a seguito della differenza di potenziale su uno stesso campione del dipinto di Paolo Brill – Paesaggio con San Francesco (Galleria Borghese – Roma).

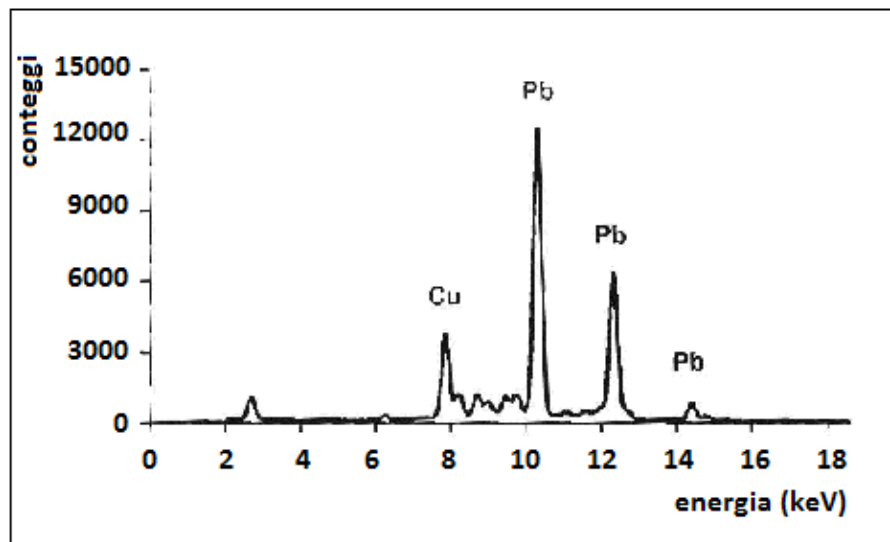


Fig. 6.7: Giallo – spettro a 20 kV.

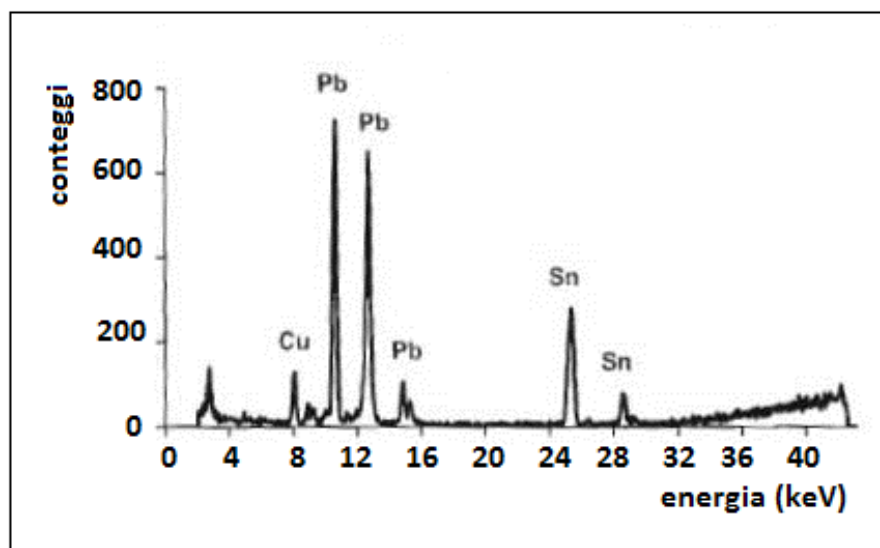


Fig. 6.8: Giallo – spettro a 60 kV.

Nella figura 6.7 con lo spettro a 20 kV sono visibili in progressione i raggi X caratteristici: K del rame (Cu),  $L_{\alpha}$ ,  $L_{\beta}$  e  $L_{\gamma}$  del piombo (Pb).

Nella figura 6.8 con lo spettro a 60 kV sono visibili in progressione, oltre ai raggi X caratteristici della figura precedente, anche i raggi X caratteristici dello stagno (Sn)  $K_{\alpha}$  e  $K_{\beta}$ .

## 6.5 Radiografia a raggi X

L'indagine radiografica sulle opere d'arte è utilizzata soprattutto su tele, tavole, sculture lignee, statue in metallo ed in pietra ed anche per lo studio di fossili e mummie, con l'ovvia limitazione che gli spessori coinvolti non siano troppo elevati altrimenti la radiazione verrebbe completamente assorbita dal campione. E' un'indagine non invasiva che permette di conoscere in modo approfondito ed immediato lo stato di conservazione del bene e le tecniche di esecuzione utilizzate.

I raggi X, grazie all'alto potere penetrante, attraversano selettivamente l'oggetto indagato e permettono di imprimere, su un supporto recettivo alle radiazioni posto sul retro dell'oggetto, un'immagine per trasparenza dell'oggetto stesso ed in particolare di ciò che si trova al suo interno.

Le radiazioni X attraversano l'oggetto in maniera differenziata ovvero in funzione dei materiali presenti, del loro spessore e dell'energia dei fotoni X incidenti.

Se l'oggetto è idealmente un elemento omogeneo e si considerano raggi X monocromatici, la legge che mette in relazione l'intensità del fascio incidente con quella del fascio in uscita è:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

dove I è l'intensità del fascio in uscita,  $I_0$  quella del fascio incidente,  $\mu$  il coefficiente di attenuazione misurato in  $\text{cm}^{-1}$  ed x lo spessore del materiale espresso in centimetri.

Il coefficiente di attenuazione, oltre allo spessore, è maggiore in materiali contenenti elementi con numero atomico più alto, ma decresce significativamente con l'aumento dell'energia dei raggi X tranne quando il

fotone X incidente ha la stessa energia degli elettroni di una shell atomica, perché in corrispondenza di tali energie la sezione d'urto aumenta bruscamente. Vi è quindi un secondo coefficiente di attenuazione legato all'interazione che hanno i raggi X con gli elettroni del materiale attraversato. Oltre al Rayleigh scattering, alle basse energie predomina l'effetto fotoelettrico, ad energie maggiori, invece diviene più importante il Compton scattering.

<b>Assorbimento basso</b>	<b>Assorbimento medio</b>	<b>Assorbimento alto</b>	<b>Assorbimento molto alto</b>
supporto di tela o cartone	supporto di legno spesso (20 ÷ 60mm)	ossido di ferro (ocra)	carbonato di piombo (bianco)
supporto di legno sottile (fino a 20mm)	carbonato di calcio	ossido di Zinco (bianco)	giallo di piombo e stagno
colori organici	solfo di calcio (gesso)	pigmenti minerali con numero atomico e peso specifico medi	solfo di mercurio (rosso cinabro)
pigmenti acrilici	colori minerali leggeri		pigmenti di metallo pesanti

E' evidente che per un lungo tratto il coefficiente di assorbimento totale, che è la somma dei tre parziali

$$\mu_{TOT} = \mu_{ph} + \mu_C + \mu_R$$

coincide praticamente con quello fotoelettrico ( $\mu_{ph}$ ), mentre alle energie più elevate (ma inferiori a 1 MeV) segue quello del Compton scattering ( $\mu_C$ ).

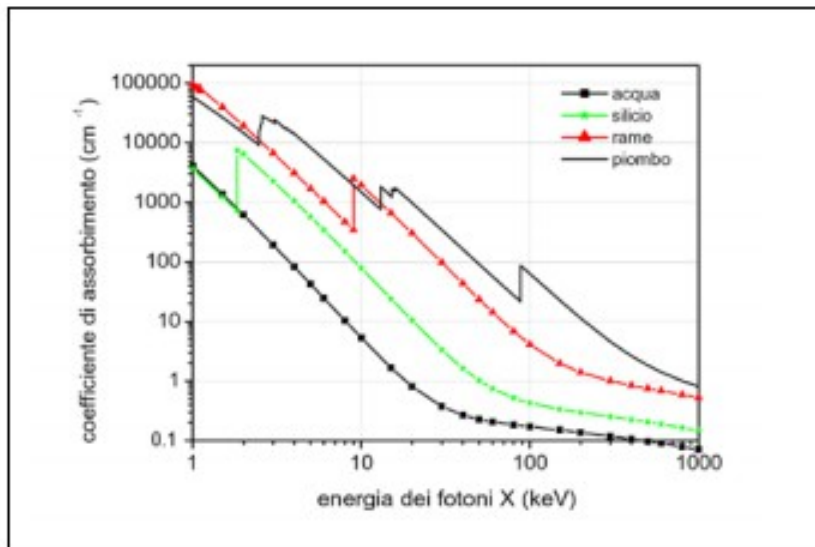


Fig. 6.9: Coefficiente di assorbimento della radiazione X in funzione dell'energia dei fotoni per diversi materiali.

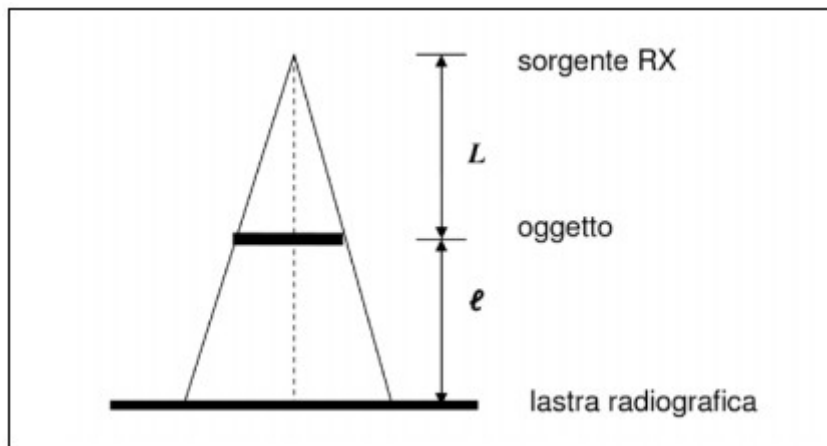


Fig. 6.10: Schema di ripresa di immagine radiografica.

La figura 6.10 schematizza la ripresa di un'immagine radiografica in cui la sorgente di raggi X ha una distanza  $L$  dall'oggetto che a sua volta ha una distanza  $l$  dal rivelatore.

La distanza  $L$  determina il cono con cui vengono trasmesse le radiazioni e la diversa intensità del fascio che investe oggetto da esaminare.

La distanza  $l$  determina l'ingrandimento dell'immagine radiografica rispetto all'oggetto.

La sorgente RX fino ad ora presa in considerazione è un'ideale sorgente puntiforme, ma nella realtà è una sorgente estesa.

La sorgente estesa è assimilabile ad un insieme di sorgenti puntiformi, ciascuna delle quali dà luogo ad un'immagine nitida.

Come risultato solo una parte di tutte queste immagini si sovrappongono esattamente, formando l'immagine radiografica dell'oggetto, mentre una parte non si sovrappone dando origine ad una zona sfumata ai bordi che prende il nome di *penombra*.

La sorgente di raggi X, che deve essere posta perpendicolarmente all'oggetto da esaminare per ottenere un irraggiamento omogeneo, può avere due diverse tipologie del fascio di emissione: conica (*cone beam*) o a ventaglio (*fan beam*).

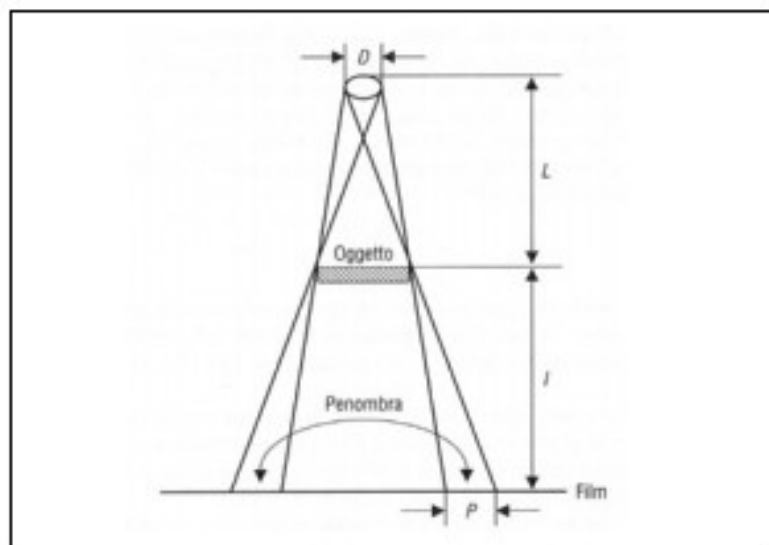


Fig. 6.11: Penombra radiografica.

Altro elemento fondamentale è il rivelatore dei fotoni X trasmessi dall'oggetto irradiato al ricevitore.

Quest'ultimo può essere di due tipi: analogico o digitale.

Un esempio di rivelatore analogico è la lastra radiografica, che viene accostata all'oggetto e permette di ottenere un'immagine prospettica di poco superiore

all'originale.

Le attuali pellicole (lastre) radiografiche hanno dimensioni tipiche di 30x40 cm, per cui per ottenere immagini aventi dimensioni maggiori è necessario eseguire una sequenza di riprese radiografiche impressionando una o più lastre alla volta fino a coprire l'intero oggetto.

Le lastre devono poi essere unite, tagliando le sovrapposizioni al fine di avere un'immagine completa.

L'operazione è di difficile realizzazione causa le distorsioni prospettiche date dall'ingrandimento dell'immagine radiografica rispetto all'originale.

Problemi di distorsione geometrica possono essere risolti con pellicole fotografiche di grandi dimensioni (h=127 cm) disponibili in rullo.

La radiografia digitale con lastre ai fosfori fotostimolabili sensibili ai raggi X rappresenta l'evoluzione della tecnica radiografica.

Al posto delle tradizionali pellicole, vi sono lastre ai fosfori fotostimolabili con dimensioni massime di cm. 35x43 cm., che consentono di mantenere la memoria latente dell'immagine che, grazie appositi scanner laser, viene digitalizzata ed elaborata al computer.

Questa tecnica permette di ottenere immagini radiografiche anche in condizioni di sovra o sottoesposizione consentendo di ottenere informazioni su oggetti con elevate differenze di radiopacità tramite una sola ripresa.

Anche la risoluzione risulta molto elevata fino a raggiungere i 25 µm.

Rimane comunque il problema dell'acquisizione radiografica di opere di grande formato che può essere risolto solo con l'unione di più riprese.

Altri sistemi digitali per la rilevazione dei raggi X nel campo dei beni culturali sono:

- Rivelatori a scintillazione: nei rivelatori a scintillazione, costituiti da un materiale fluorescente che emette luce quando esposto a raggi X ( $Gd_2O_2S$  o CsI), la radiazione visibile emessa può essere ripresa da array di fotodiodi o fotomoltiplicatori, oppure da una telecamera CCD dotata di un obiettivo fotografico. I CCD sono costituiti da semiconduttori in cui la radiazione produce coppie di elettroni e lacune.
- Image intensifiers: gli intensificatori di brillantezza si basano sugli schermi di terre rare da dove i fotoni a raggi X estraggono elettroni, che, a loro volta, sono accelerati da un campo elettrico su uno schermo fluorescente.

L'immagine molto luminosa formata sullo schermo è acquisita da una telecamera CCD.

Utilizzando I.I. è possibile ottenere immagini digitali con basse dosi di radiazioni e quindi questi rilevatori sono spesso usati in medicina diagnostica.

- Flat panel detectors (FPD): I flat panel sono rivelatori di radiazione di geometria planare con matrici di pixel molto piccoli ( $\leq 100 \mu\text{m}$ ). I flat panel si dividono in due categorie: FPD costituiti da selenio amorfo (Se-am), anche conosciuti come rivelatori "diretti" perché i fotoni di raggi X vengono convertiti direttamente in carica e rivelatori indiretti di silicio amorfo (Si-am), che sono costituiti da uno strato superiore di materiale scintillante ( $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$  o CsI) che produce radiazioni quando è colpito dai raggi X.

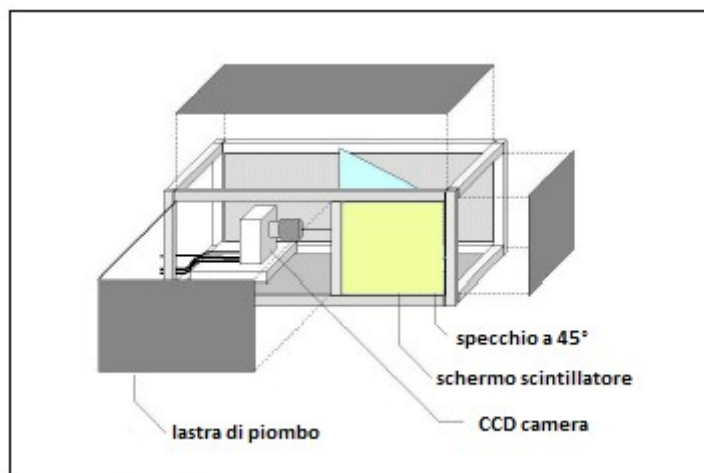


Fig. 6.12: Schema di un sistema di rilevamento con schermo scintillante, specchio e fotocamera CCD. Le lastre di piombo proteggono la fotocamera da fotoni X diffusi.

Nella figura 6.13 si può vedere il risultato di una radiografia digitale su un quadro con supporto ligneo.

La radiografia (a destra) mette chiaramente in evidenza il restauro avvenuto del 1548 circa tra cui:

- i chiodi metallici utilizzati per rimettere insieme i 17 pezzi della tavola;
- inserti di legno ridipinti;



- fratture della tavola e lacune dello strato pittorico.



Fig. 6.13: Raffaello – Madonna del Cardellino.

Nell'autoritratto di Rembrandt, in figura 6.14, si può vedere come l'autore abbia riutilizzato la tela, la radiografia infatti evidenzia come sotto al dipinto finale ci sia un ritratto di un volto femminile.

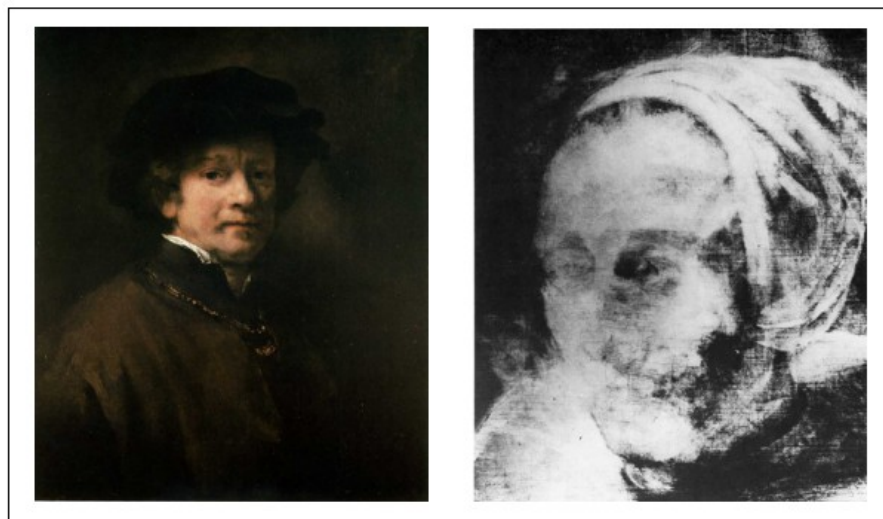


Fig. 6.14: Rembrandt – Autoritratto – XVII sec.



Fig. 6.15: San Demetrio (particolare dell'icona) – Chiesa di Timios Prodomos – Calcidica - Grecia

Nella figura 6.15 la radiografia a raggi X rivela il disegno sottostante inciso sulla tavola. Nei solchi delle linee di incisione si è concentrato una maggiore quantità di cinabro (pigmento molto assorbente) rilevabile ai raggi X.

## 6.6 Tomografia a raggi X

Il termine tomografia (dal greco *τόμος* “strato” e dal *γράφω* “scrivere”) si riferisce alla possibilità di ottenere immagini di sezioni dell'oggetto investigato, attraverso l'uso di diversi tipi di onde meccaniche o elettromagnetiche, nello specifico i raggi X.

La tomografia intesa come *tomografia computerizzata* con i raggi X è stata inventata da Godfrey Hounsfield nel 1969.

La tecnica è mirata alla rappresentazione dell'oggetto come sommatoria di strati, in contrapposizione alla radiografia convenzionale che proietta sulla superficie bidimensionale della lastra tutto lo spessore dell'oggetto.

La tecnica consiste nell'acquisizione di più radiografie da vari angoli dell'oggetto investigato e nella successiva ricostruzione tridimensionale con un processo matematico chiamato ricostruzione tomografica.

Nella figura 6.16 è schematizzato il principio base della tomografia: una sovrapposizione di immagini “fette” (S1 e S2) in contrasto con l'immagine proiettata P (radiografia).

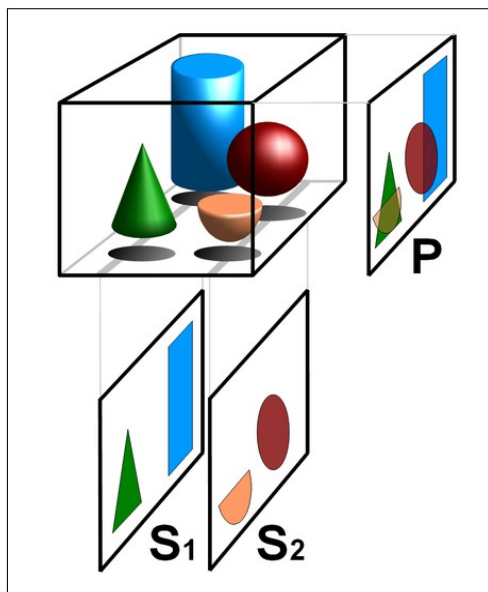


Fig. 6.16: Principio base della tomografia.

La strumentazione della tomografia a raggi X comprende: una sorgente di raggi X, un collimatore, un rivelatore e un computer.

Solitamente è presente un sistema costituito dalla sorgente stessa solidale con il rivelatore che ruotano intorno all'oggetto in esame, metodo usato prevalentemente in medicina.

Nelle altre branche della scienza, comprese quelle dei beni culturali e dell'industria, la sorgente ed il rivelatore sono generalmente fissi mentre a ruotare è l'oggetto.

La strumentazione per la tomografia ha subito notevoli sviluppi, dai primi tomografi degli anni '70 fino ai sofisticati e rapidi tomografi odierni.

Per migliorare i tempi di acquisizione e ridurre l'emissione di radiazioni è stata studiata una nuova generazione di tomografi in cui l'immagine prodotta dalla sorgente, sotto forma di un ampio fascio a cono (cone beam), viene rilevata da uno flat panel o da uno schermo scintillatore letto da un sensore digitale.

La figura 6.17 schematizza il sistema cone beam per oggetti di piccola dimensione.

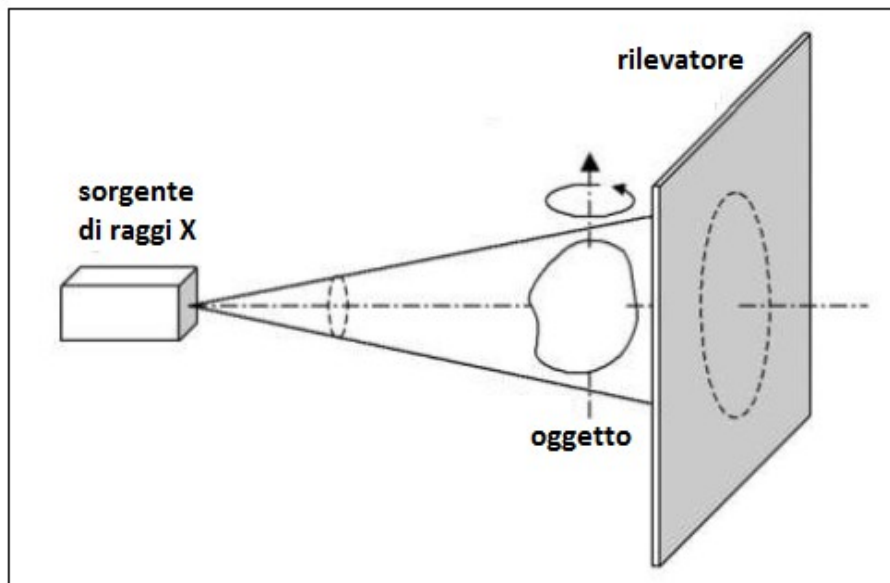


Fig. 6.17 Schema di ripresa con il sistema cone beam.

La figura 6.18 raffigura la strumentazione adottata per effettuare il rilievo tomografico di oggetti di grandi dimensioni, come ad esempio il globo realizzato dal monaco Egnazio Danti nel 1567 e custodito nella sala delle “Carte geografiche” in Palazzo Vecchio di Firenze.

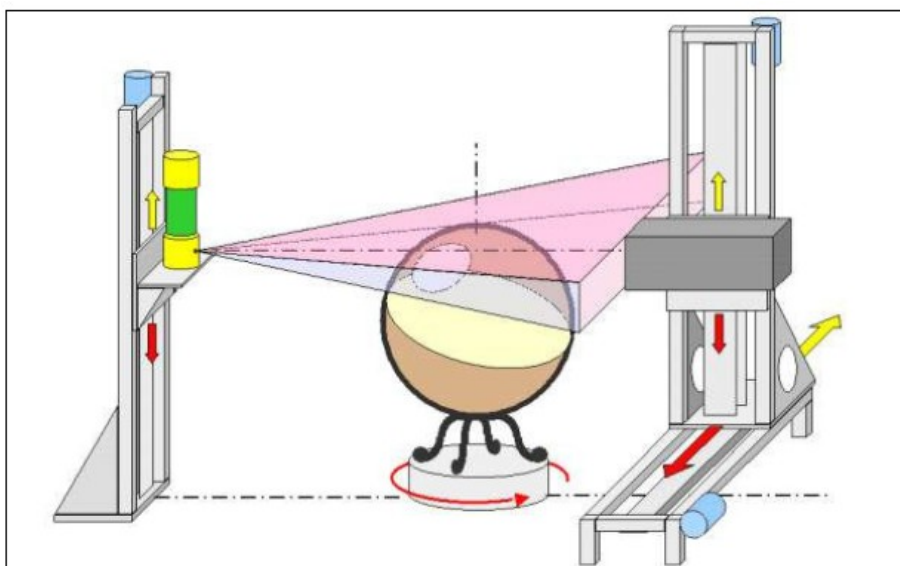


Fig. 6.18: Schema di ripresa per oggetti di grande dimensione.

Una scansione tomografica consiste nell'acquisizione di molte proiezioni radiografiche dell'oggetto effettuate da diverse angolazioni.

La tomografia registra quindi una molteplicità di immagini della stessa sezione dell'oggetto che devono essere filtrate e sovrapposte da un apposito software per produrre un'immagine bidimensionale che rappresenta la sezione interna dell'oggetto stesso.

Le sezioni vengono poi allineate per la ricostruzione 3D dell'oggetto.

Il metodo comunemente utilizzato per la ricostruzione delle immagini è la cosiddetta *retroproiezione filtrata*, basata sull'antitrasformata di Radon.

Un esempio di tomografia tridimensionale a raggi X è mostrato in figura 6.19, si tratta di un sarcofago egiziano a forma di gatto conservato nel Museo Archeologico di Bologna.

L'immagine A) è la fotografia del sarcofago, la B) la sua radiografia, la C) è la ricostruzione tomografica 3D e la D) è la sezione virtuale longitudinale del sarcofago in cui si vedono le ossa del gatto.

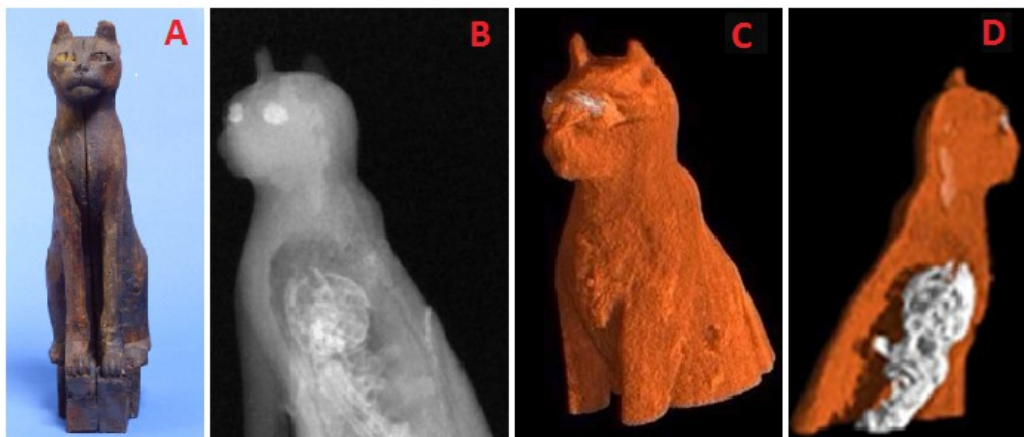


Fig. 6.19 Mummia egizia – Museo Archeologico di Bologna.



## Conclusioni

Grazie all'invenzione della fotografia attorno alla metà dell'800 si è potuti passare da una documentazione soggettiva, basata sulle abilità descrittive e ritrattistiche dell'osservatore, ad una vera documentazione visiva, se ben eseguita, oggettiva e misurabile dei fenomeni e degli oggetti che ci circondano.

Grazie alla prima teoria moderna sull'elettromagnetismo, formulata da Maxwell a metà del 1800, che raggruppò tutte le teorie, osservazioni ed esperimenti relativi a questa branca della Fisica effettuati in precedenza, si è potuto osservare come la luce, l'elettricità e il magnetismo siano tutte manifestazioni di uno stesso fenomeno: il campo elettromagnetico.

In particolare lo studio dello spettro elettromagnetico e l'individuazione delle caratteristiche di interazione con la materia delle onde nelle diverse bande di frequenza, hanno portato alla realizzazione di strumentazioni in grado di indagare la materia stessa.

Da allora le capacità dell'essere umano sono andate evolvendosi senza interruzione, con lo sviluppo di strumenti sempre più avanzati. Basti pensare a tutte quelle tecnologie connesse alle onde elettromagnetiche e ai fenomeni a esse correlati come le antenne, i semi-conduttori, le fibre ottiche, i laser, ecc...

Tuttavia il passaggio decisivo per la gestione dei dati ottenibili da tutti gli strumenti basati sulle onde elettromagnetiche è avvenuto con l'avvento dei moderni computer che hanno reso elaborabili e archiviabili moli di dati assolutamente non gestibili in altro modo.

L'evoluzione tecnologica, conseguente all'evoluzione della conoscenza scientifica, ha portato profondi cambiamenti non solo in campi scientifici specifici come, ad esempio, quello della diagnostica medica, o in quelli prettamente industriali, ma anche nella vita di tutti i giorni.

L'evoluzione tecnologica si è imposta prepotentemente anche nel campo dei beni culturali, dove studiosi e restauratori applicano, paradossalmente, le più moderne tecnologie alla ricerca e alla conservazione di un passato talvolta estremamente antico e tecnologicamente arretrato.

Questa trattazione è partita dall'utilizzo delle microonde nei georadar per indagare in modo non invasivo il sottosuolo alla ricerca di manufatti e strutture

sepolte ed è terminata con un altro sistema non invasivo: la tomografia a raggi X, che permette di “vedere” dentro gli oggetti.

Fra questi due estremi vi sono tutte le tecniche di indagine superficiale o pellicolare a cui un'opera d'arte può essere sottoposta.

Se è estremamente sorprendente notare come tutte queste tecniche di indagine siano basate su fenomeni già noti nel 1800, non si può non sottolineare come sia stato solo lo sviluppo dell'elettronica basata sui transistor a permettere il passaggio fondamentale e rendere lo spettro elettromagnetico utilizzabile e alla portata di tutti.

Non è solo il notevole sviluppo del computer, con la conseguente velocità e infinita capacità di calcolo e acquisizione dei dati ad aver permesso il “salto” evolutivo. Con l'evoluzione dell'elettronica si è passati dal rilevamento per punti, tipo la spettrofotometria di riflettanza, alla telefotometria, dalla pellicola fotografica alla fotocamera con rivelatori allo stato solido.

Tutte queste tecniche hanno reso i dati di *imaging* non solo elaborabili ed archiviabili, ma utilizzabili come effettivo specchio di quella realtà che non era indagabile in altro modo.

Nell'ambito specifico dei beni culturali, l'uso della tecnologia ad *imaging* permette non solo un'indagine non distruttiva, ma rende approcciabile l'utilizzo delle onde elettromagnetiche e delle loro proprietà anche a personale non esperto di quella specifica tecnica d'indagine, permettendo di arrivare ad una immediata individuazione dello stato del bene.

L'utilizzo di tecnologie non distruttive che permettono osservazioni precise e ripetitive non è solo di grande aiuto per lo studio preliminare al restauro e per gli interventi conservativi immediati, ma consente anche di monitorare l'evoluzione del bene in esame nel tempo, permettendo, a chi se ne occupa di prevedere e ottimizzare eventuali, e solitamente inevitabili, interventi futuri.

Uno dei grandi problemi che affligge il patrimonio culturale italiano è l'enorme carenza di catalogazione dei beni e, di quelli catalogati, ben pochi sono effettivamente sottoposti a controlli conoscitivi dello stato di conservazione.

È quindi auspicabile che la continua evoluzione tecnologica renda queste tecniche di indagine non invasiva sempre più facili da utilizzare come maneggevolezza, più performanti per quel che concerne l'elaborazione dati e la ripetibilità delle misurazioni ed inoltre renda i costi più contenuti.

È superfluo dire che a questa evoluzione andrebbe affiancata una adeguata



preparazione di tutto il personale addetto alla conservazione e allo studio dei beni culturali, permettendo di sfruttare questa immensa capacità di indagine al massimo delle sue potenzialità attuali e future.

Se l'evoluzione tecnologica ha reso più facile ed efficace il lavoro degli studiosi, dei restauratori e dei conservatori, una corretta e puntuale catalogazione renderebbe altresì più facile la diffusione della conoscenza dell'enorme patrimonio culturale, soprattutto italiano, rendendone contemporaneamente difficoltosa la trafugazione e la contraffazione.



## Bibliografia

Matthias Alfeld, Jos'e A.C. Broekaert, *Mobile depth profiling and sub-surface imaging techniques for historical paintings – A Review*, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2013.

F. Casali, *Physical Techniques in the Study of Art, Archaeology and Cultural Heritage*, chapter 2: *X-ray and neutron digital radiography and computed tomography for Cultural Heritage*, Bradley & Creagh, 2006.

A. Castellano, M. Martini, E. Sibilìa, *Elementi di archeometria. Metodi fisici per i beni culturali*, Egea, Milano, 2002.

M. Caprioli, *Il rilievo con Laser Scanner 3D*  
<http://www.poliba.it/dvt/dispense/caprioli/laserscanner.pdf>

G. Ciullo, *Termografia per i Beni Culturali*  
[http://www.fe.infn.it/~ciullo/Termologia/Termologia\\_08\\_2009\\_2010\\_2pg.pdf](http://www.fe.infn.it/~ciullo/Termologia/Termologia_08_2009_2010_2pg.pdf)

R. P. Clayton, *Compatibilità elettromagnetica. Concetti fondamentali di elettromagnetismo. Applicazioni progettuali*, Hoepli, Milano, 1999.

G. Conciauro, L. Perregrini, *Fondamenti di onde elettromagnetiche*, McGraw-Hill, Milano, 2003.

Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro, *Gli affreschi di Polidoro da Caravaggio dal Casino del Palazzo del Bufalo a Roma*  
<http://www.icr.beniculturali.it/pagina.cfm?usz=5&uid=73&rid=55&rim=218>

G. Loreti, *Tecniche diagnostiche fisiche e casi di studio per i Beni Culturali*, Tesi di Laurea, Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università degli Studi di Bologna, 2007.

M. Lualdi, L. Zanzi , G. Sosio, *Metodologia di rilievo georadar 3D per applicazioni archeologiche*, GNGTS – Atti del 23° Convegno Nazionale Roma 2004

[http://www2.ogs.trieste.it/gngts/gngts/convegniprecedenti/2004/content/PDF/13\\_12.PDF](http://www2.ogs.trieste.it/gngts/gngts/convegniprecedenti/2004/content/PDF/13_12.PDF)

M. P. Morigi, *Tecniche tomografiche per i Beni Culturali*

<http://www.tecore.unibo.it/didattica/att/ee8a.file.pdf>

Opificio delle Pietre Dure, Laboratorio scientifico

<http://www.opificiodellepietredure.it/index.php?it/156/laboratorio-scientifico>

M. Piacentini, *Bozza Appunti delle lezioni di Metodologie fisiche per i Beni Culturali Archeometria AA 2010-201*, Roma 2011

[http://www.sbai.uniroma1.it/~mario.piacentini/testi/metodologie\\_fisiche.pdf](http://www.sbai.uniroma1.it/~mario.piacentini/testi/metodologie_fisiche.pdf)

G. Poldi, G. C. F. Villa, *Analisi non invasive per le opere d'arte. Casi esemplari e repertorio iconografico*, CUEM, Milano, 2005.

C. Seccaroni, P. Moioli, *Fluorescenza X*, Nardini Editore, Firenze, 2004.

L. Ragazzini, *Sviluppo e caratterizzazione di un sistema di rivelazione integrato per applicazioni tomografiche*, Tesi di Laurea, Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università degli Studi di Bologna, 2010.

Università degli Studi di Milano - Sezione di fisica per i beni culturali, l'ambiente e il clima, Metodologie Fisiche per i Beni Culturali

<http://www.brera.unimi.it/istituto/archeo/Home.html>

Università degli Studi di Torino – Dipartimento di Chimica IFM – Laboratorio di Elettronica Molecolare, *Diagramma di Jablonski*

[http://lem.ch.unito.it/didattica/infochimica/2008\\_OLED/curiosita/jablonski.htm](http://lem.ch.unito.it/didattica/infochimica/2008_OLED/curiosita/jablonski.htm)

Università degli Studi di Verona – Servizio di fisica medica e radioprotezione,  
*Radioprotezione*  
<http://www.sfismed.univr.it/Radioprotezione/RI/LEZ.N2%20.pdf>





