

## La Radiografia di manufatti di interesse storico-artistico

### *Introduzione*

La radiografia è stata forse la prima tecnica che ha consentito di osservare l'interno del corpo umano senza dover effettuare una operazione chirurgica. Questa è, in sintesi, la ragione dell'enorme successo che essa ha avuto a partire dai primi anni dello scorso secolo, subito dopo che Roentgen nel 1895 scoprì l'esistenza di una radiazione elettromagnetica molto penetrante, ossia i raggi x.

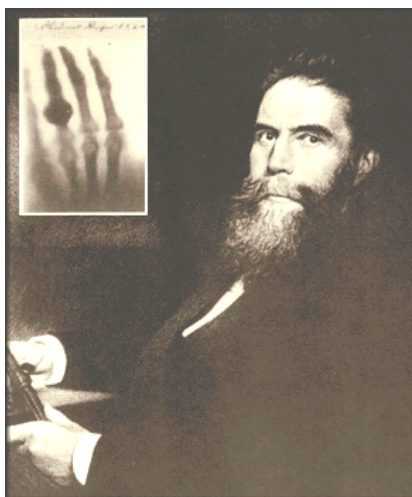


Figura 1 – Foto di Wilhelm Conrad Roentgen e della famosa prima radiografia della mano sinistra della moglie.

Con la radiografia sono nate alcune problematiche di ricerca, che in seguito si sono sviluppate in maniera notevole; in particolare quella relativa ai metodi per un esame (o una visualizzazione) di parti di un oggetto nascoste ad una osservazione dall'esterno, senza dover procedere a manipolazione dell'oggetto: cioè delle indagini non distruttive.

Il fascino della radiografia è quello che intuirono immediatamente i nostri antenati, cioè la enorme capacità della radiazione x di attraversare spessori, anche notevoli, di materiale di diversa natura, cioè non solo i tessuti di cui è composto il nostro corpo. Il rapido sviluppo della fisica moderna ha permesso di comprendere ben presto la ragione di questa straordinaria proprietà dei raggi x, in quanto ha inquadrato tutto il problema della penetrazione di una radiazione in un mezzo - e quindi della sua interazione con gli atomi che lo costituiscono - nella più generale teoria quantistica che regola appunto i meccanismi con cui avvengono i fenomeni di interazione in una scala atomica. In pratica si può semplicisticamente dire che tanto maggiore è l'energia dei quanti di luce tanto più essi riescono facilmente a penetrare nella fitta ragnatela costituita dagli atomi che costituiscono il materiale attraversato, che sono variamente legati tra loro. Per essere più espliciti, si può assumere che la radiazione elettromagnetica possa essere vista non solo come un'onda ma bensì come particelle di dimensioni via via più piccole quanto maggiore è la sua energia. Si capisce così perché le particelle (fotoni) di più alta energia penetrano di più in quanto vedono la materia come un ragnatela di minute particelle (gli elettroni) all'interno della quale possono infilarsi, fino a quando, casualmente, urtano un elettrone, con il quale interagiscono. Quindi la maggiore capacità di penetrazione è dovuta alle ridotte dimensioni che i proiettili hanno al crescere dell'energia dei quanti, questa considerazione può quindi essere estesa alla pratica della radiografia ipotizzando che utilizzando fotoni di energia maggiore è possibile penetrare di più per cui se un esame non riesce bene - in quanto le particelle non penetrano - basta aumentare la loro energia. Questi concetti, nella loro semplicità, sono veri.

Tali considerazioni permettono di comprendere anche il perché i raggi x, al contrario della luce visibile, non subiscano deviazioni nel loro percorso attraverso il materiale. In pratica gli elettroni fermano la radiazione che entra, ma molto raramente si comportano come un sorta di birillo conficcato nel terreno sul quale la particella che penetra urta e viene deviata nel suo percorso; il più delle volte i raggi x interagiscono sugli elettroni producendo delle radiazioni secondarie che si propagano - anche se in maniera non eguale - in tutte le direzioni. Quindi i raggi x, nel loro percorso attraverso il materiale, subiscono una serie di interazioni di diversa natura che finiscono con il produrre radiazione secondaria che si mischia a quella che ha attraversato il materiale. Ciò impedisce una perfetta registrazione delle differenze di attenuazione in diversi percorsi attraverso il materiale, e produce anche un'azione sul materiale stesso, che può così subire danni (radiation damage) la cui natura meriterebbe una discussione più approfondita, che non può essere fatta in questa sede con il rischio di essere fuorvianti.

Al di là della complicatezza dei meccanismi di interazione è possibile dare una sintetica visione dei fatti affermando che la probabilità che un fascio di raggi x subisca un'attenuazione attraversando un segmento unitario del materiale è costante. Naturalmente questa attenuazione avverrà in tanti singoli distinti eventi per cui si dovrà parlare di probabilità che una interazione avvenga (nell'unità di percorso all'interno del materiale attraversato) e di conseguenza il numero dei componenti del fascio primario, cioè i fotoni, diminuisca. In altre parole il fenomeno dell'attenuazione non è continuo ma costituito da singoli eventi che hanno probabilità costante di avvenire fino a che il materiale attraversato non cambia la sua natura, cioè la sua composizione o la sua densità. È facile passare da queste semplici affermazioni alla scrittura della legge che regola l'attenuazione dei raggi x nella materia, infatti, se le particelle hanno probabilità costante di subire un urto in un percorso unitario della radiazione (ad esempio un centimetro), il numero di urti sarà tanto più grande quanto lo è il numero delle particelle che stanno penetrando. Tale legge è sinteticamente espressa dalle seguenti relazioni:

$$\frac{dN}{dx} = -N\mu \Rightarrow N = N_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho x} \quad (1)$$

che può essere letta in questo modo: se  $N_0$  particelle penetrano in un materiale ad una profondità  $x$  ne sopravvivono  $N$  se il coefficiente di attenuazione di massa del materiale è  $\mu/\rho$  [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ] e la densità del materiale stesso è  $\rho$ . In pratica il numero di particelle che residuano al fenomeno dell'attenuazione non decresce in modo proporzionale, cioè lineare, ma con una legge che è detta esponenziale. Le conseguenze di questo fatto sono molto numerose, e non tutte positive; appuntiamo la nostra attenzione inizialmente sul significato del coefficiente di attenuazione (di massa) che è ovviamente legato alla probabilità di interazione delle particelle la quale cambia soprattutto con il numero di elettroni che appartengono agli atomi di cui è costituito il materiale attraversato. Tale coefficiente decresce sempre al crescere della energia della radiazione incidente, cioè l'energia della radiazione x, per cui è sempre possibile penetrare attraverso un materiale incrementando tale energia (figura 2).

La lettura del grafico precedente risulta più chiara se affermiamo che l'attenuazione è maggiore in materiali a numero atomico più alto, cioè contenenti un numero maggiore di elettroni; tale probabilità però decresce significativamente con l'energia dei raggi x, a parte alcuni fenomeni di risalita, che sono però caratteristici dei singoli elementi costituenti il materiale. Anche la densità gioca un ruolo nell'attenuazione, come è ovvio supporre, in quanto, se compattiamo insieme un maggior numero di atomi abbiamo una maggiore probabilità complessiva che una interazione avvenga. L'uso dei coefficienti di attenuazione di massa è dovuto al fatto che è opportuno tenere separati tali due aspetti dell'attenuazione, legati l'uno alla composizione del materiale e l'altro al suo stato di aggregazione.

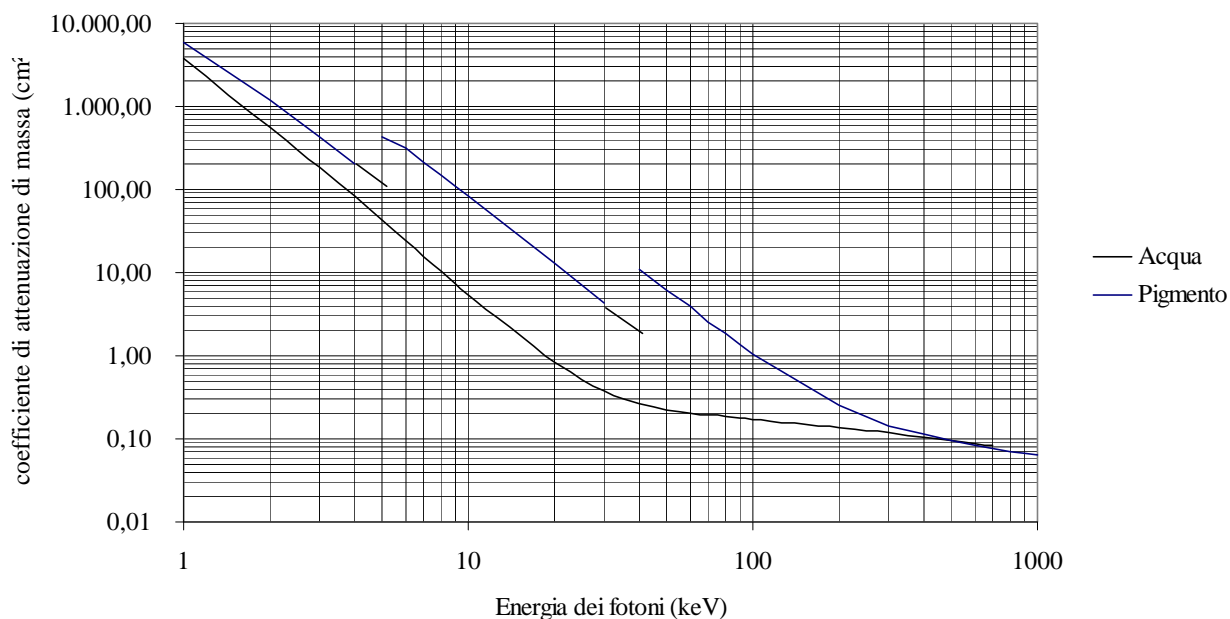


Figura 2 Coefficienti di attenuazione dell'acqua e di un pigmento. Si può notare come tali coefficienti decrescano sempre con l'energia a parte alcune brusche risalite, dovute alla presenza di elettroni (particolarmente legati al nucleo del loro atomo), che hanno probabilità di interazione significativamente più alta quando l'energia delle particelle incidenti supera quella di legame.

Un altro aspetto rilevante sta nella pluralità di modi di interazione che hanno i raggi x con gli elettroni del materiale che attraversano; a più basse energie predomina l'effetto fotoelettrico che è il responsabile di quelle discontinuità di cui abbiamo già parlato, ad energie maggiori, invece predomina la diffusione (scattering) in particolare quella non elastica o Compton. Ovviamente tutte e tre le modalità di interazione sono simultaneamente possibili ad una determinata energia, ma una predomina, qualche volta in maniera molto netta, sulle altre. Per capire come stanno le cose in figura 3 è riportato un grafico che mostra nel caso dell'acqua come varia il coefficiente di assorbimento di massa con l'energia. E' evidente che per un lungo tratto il coefficiente di assorbimento totale che è la somma dei tre parziali,

$$\mu_{TOT} = \mu_{ph} + \mu_C + \mu_R, \quad (2)$$

coincide con quello fotoelettrico ( $\mu_{ph}$ ), mentre ad energie più elevate segue quello di diffusione Compton ( $\mu_C$ ). In pratica se si facessero due radiografie, una a basse energie e l'altra ad alte si potrebbero ottenere, in principio, risultati molto diversi. Questo è possibile utilizzando fotoni di una determinata energia (cioè monocromatici) o appartenenti ad un piccolo intervallo di energie (quasimonocromatici), in genere una sorgente intensa di raggi x è caratterizzata da una emissione su un intervallo (banda) di energie molto ampia.

In pratica, se abbiamo un manufatto di un certo spessore, ed un fascio di raggi x composto da un dato numero di elementi (fotoni), è possibile far sì che la probabilità di interazione sia tale che comunque un numero sufficiente di fotoni attraversi l'oggetto, permettendoci così di registrare la diversa attenuazione che il fascio subisce in differenti percorsi attraverso l'oggetto (vedi fig. 4).

E' possibile dimostrare che, perché vi sia un contrasto ottimale - cioè differenze di assorbimento vengano registrate nell'immagine in maniera chiara - deve uscire dall'oggetto (attraversato dal fascio) poco più di un fotone ogni dieci, cioè il fascio deve essere attenuato del 86%; apparentemente deve avvenire una vera strage di fotoni.

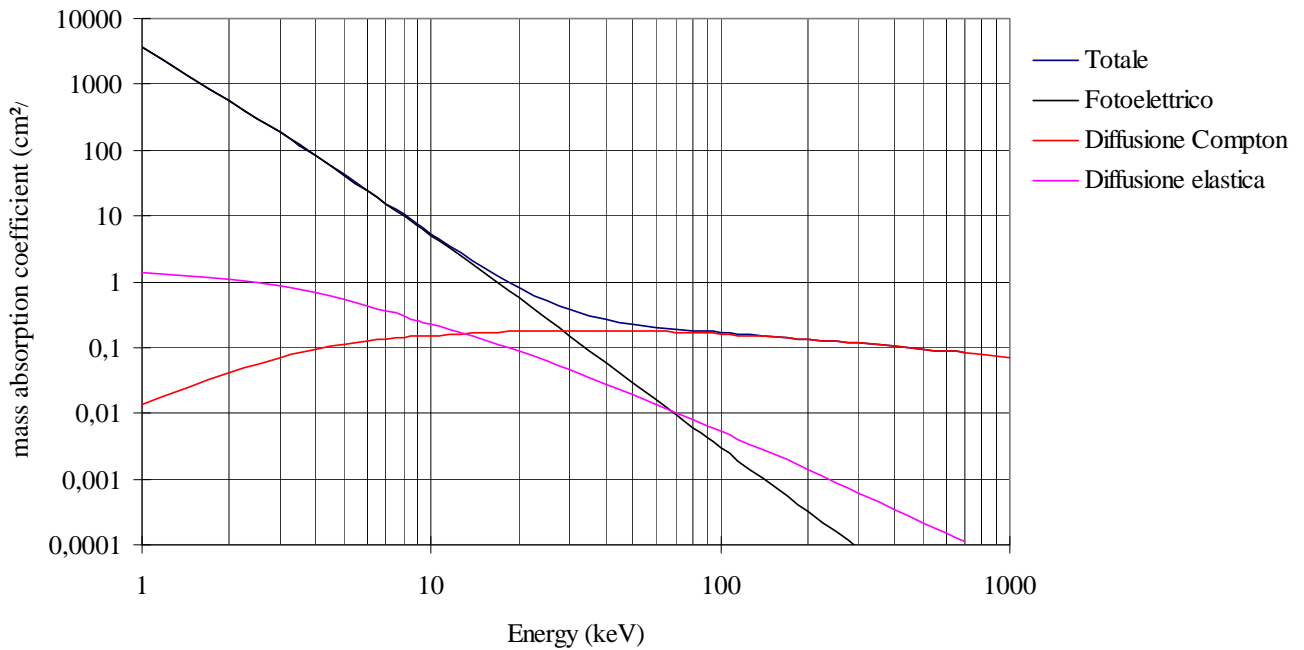


Figura 3 Coefficiente di attenuazione dell'acqua e contributi delle tre diverse modalità di interazione.

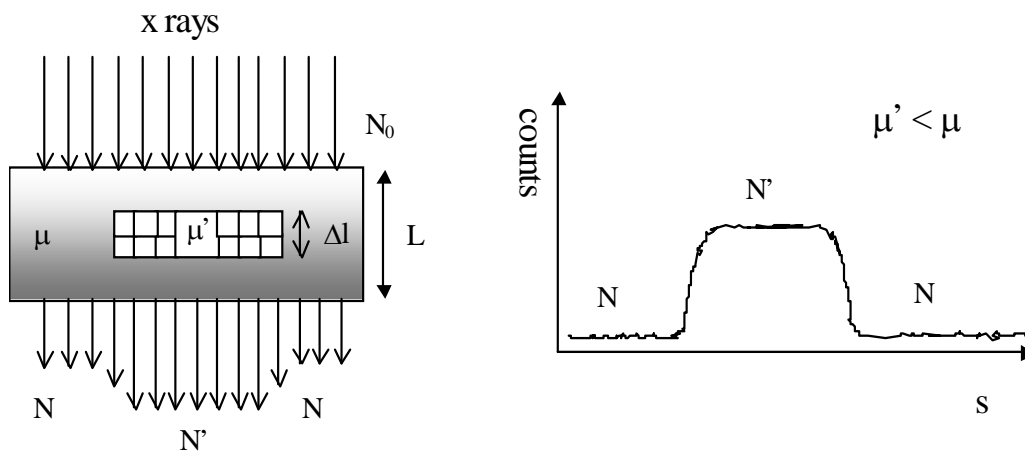


Figura 4 – Attraversando l'oggetto i raggi x sono meno attenuati attraversando il difetto che ha un coefficiente di attenuazione ( $\mu'$ ) minore. Questo produce il contrasto e permette di visualizzare la presenza del difetto stesso.

La formazione dell'immagine radiografica avviene progressivamente nel tempo in maniera del tutto casuale; infatti occorre aspettare un certo tempo per poter vedere che attraverso due percorsi diversi nell'oggetto vi è una differenza nel numero di fotoni che passano. Questo tempo è naturalmente tanto maggiore quanto minore è la differenza di attenuazione nei due percorsi e quindi tanto minore è la differenza di capacità di attenuare il fascio da parte del segmento di oggetto attraversato. In particolare la natura aleatoria dell'emissione dei fotoni da parte della sorgente – caratteristica comune a quasi tutte le sorgenti di radiazioni, comprese quindi le sorgenti di luce nel visibile – rende le cose ben più difficili in quanto una differenza diviene osservabile solo quando è statisticamente significativa, cosa che accade quando si lascia passare un tempo sufficiente. Questo è un problema non banale, in quanto non si sa a priori quale sia la differenza di attenuazione che si desidera osservare, per cui occorre procedere ad una esposizione dell'oggetto (e quindi registrazione dell'immagine) per un tempo che, (in base all'esperienza) è sufficiente per rendere

statisticamente significative tali differenze. In altre parole bisogna procedere sulla base dell'esperienza o per successivi tentativi.

## Modalità di formazione dell'immagine radiografica

Le immagini si formano tramite processi fisici che indirizzano la luce<sup>1</sup> da un punto dell'oggetto che si vuole riprodurre ad un punto del piano in cui si vuole ricostruire l'immagine. Il modo più semplice per schematizzare questo processo è utilizzare quello alla base della camera oscura (teoria del pin-hole) che è presentato nella figura 5. In pratica la presenza di un piano che scherma, in cui è stato praticato un piccolo foro di spillo (pin-hole), fa sì che su di un punto di un piano sensibile posto orizzontalmente a quello dell'oggetto da riprodurre, giunga luce proveniente da un solo punto di quest'ultimo. Si crea così un sistema di punti coniugati appartenenti rispettivamente al piano oggetto ed al piano immagine.

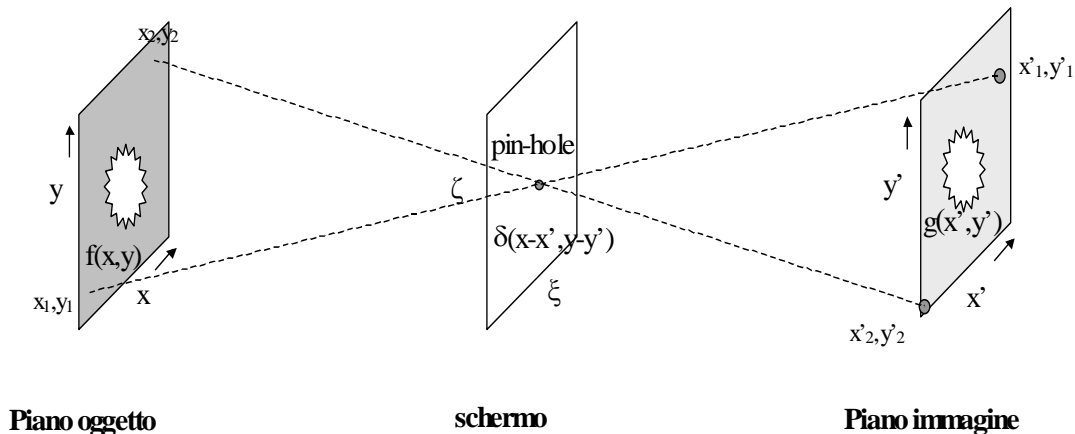


figura 5 - Schema del *pin-hole*

Un punto debole di tale schematizzazione è la mancanza della sorgente di luce, che invece risulta essenziale per innestare il processo di formazione dell'immagine stessa. A ciò si può rimediare affermando che un processo di formazione coniuga punti non su due piani (piano oggetto e piano immagine) ma su tre piani (escludendo quindi lo schermo, che diviene implicito), includendo quindi un piano sorgente (vedi figura 6).

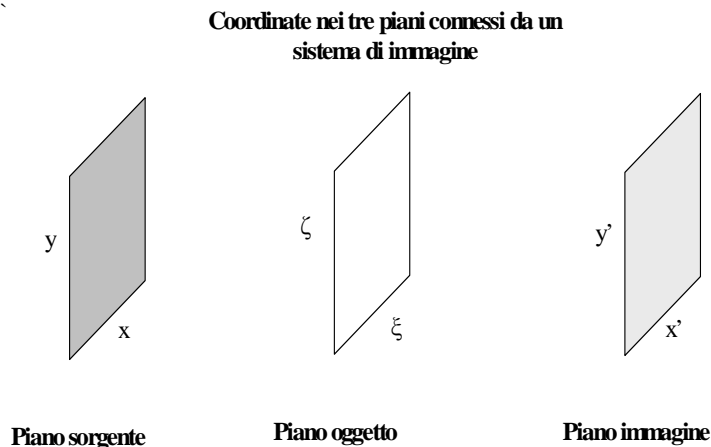


figura 6 - Sistemi di coordinate nei tre piani coniugati dal processo di formazione dell'immagine

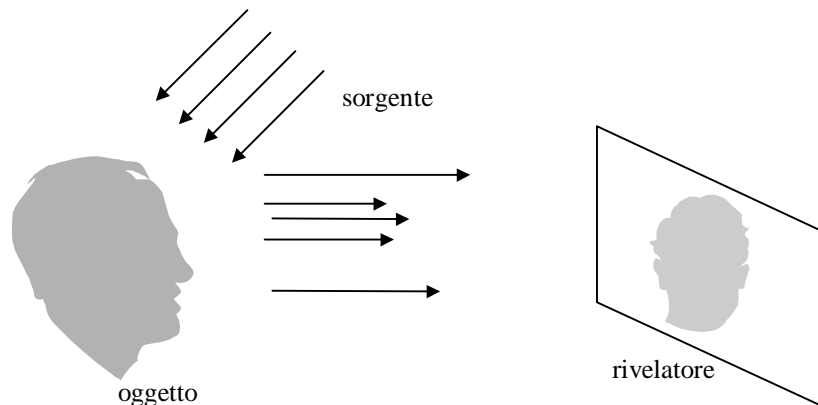
<sup>1</sup> Ovviamente vi sono modalità di produzione di immagine che non usano radiazioni per le quali l'impiego del generico termine di luce (che vale per qualsiasi tipo di radiazione elettromagnetica e non) non è corretto, mi scuso per questo.

Per comprendere meglio i processi di formazione delle immagini, e quello alla base della radiografia in particolare, è utile osservare che il processo fisico di formazione non agisce necessariamente su tre piani che sono tra loro allineati (come potrebbe far credere la figura 6), ma vi sono modalità di formazione dell'immagine in cui (come ad esempio nella fotografia) la sorgente è posta di fianco all'oggetto ed è quindi completamente disallineata rispetto al piano in cui è posto il sistema di ripresa (la macchina fotografica). In sintesi i processi di formazione possono essere raggruppati in tre categorie principali:

1) immagini in **riflessione**: il segnale emesso da una sorgente viene riflesso dall'oggetto in studio e poi rivelato. Tali immagini possono essere ulteriormente suddivise in:

- *superficiali*: quando, in prima approssimazione, si può ritenere che solo la superficie dell'oggetto riflette; un esempio è dato dalla fotografia.
- *di volume*: quando vi sono delle riflessioni sulle strutture interne all'oggetto, che concorrono alla formazione dell'immagine. In alcuni casi è possibile ricostruire la coordinata relativa alla profondità discriminando temporalmente le riflessioni provenienti dai diversi piani (come avviene nell'ecografia con l'uso degli ultrasuoni).

Riportiamo di seguito uno schema esemplificativo della formazione di immagini in riflessione.



**Figura 7 Schema di un sistema di immagini in riflessione**

2) immagini in **trasmissione**: il segnale emesso da una sorgente viene modulato nell'attraversare l'oggetto e poi rivelato. È questo il caso della radiografia, in cui viene registrata su di un piano la distribuzione dei fotoni (raggi X) che arrivano dalla sorgente passando attraverso l'oggetto.

3) immagini in **emissione**: la sorgente viene a coincidere con l'oggetto che emette direttamente il segnale. Come esempio ricordiamo la scintigrafia, in cui viene iniettato un radiofarmaco nel paziente che diventa esso stesso sorgente di raggi  $\gamma$  disponibili per la rivelazione. Anche le tecniche di radiometria (termografiche) sono esempi di immagini in emissione.

Nel caso della fotografia la sorgente può avere dimensioni molto diverse per creare comunque un'immagine nitida, si può facilmente dimostrare che per ottenere un'immagine fedele occorre far sparire la sorgente (cioè illuminare l'oggetto in maniera uniforme, tanto da rendere tutti i suoi punti assolutamente eguali). In questo modo ogni punto dell'oggetto diverrà una sorgente di luce (secondaria o riflessa) di intensità che sarà determinata dalle proprietà di assorbimento e/o riflessione della luce da parte del punto. A questo punto basterà convogliare la luce proveniente da un punto in un unico punto del piano immagine per ottenere risultati eccellenti.

Nel caso di una immagine in trasmissione il problema è diverso in quanto la presenza di una sorgente estesa produce una intrinseca incertezza sul percorso dei raggi all'interno dell'oggetto

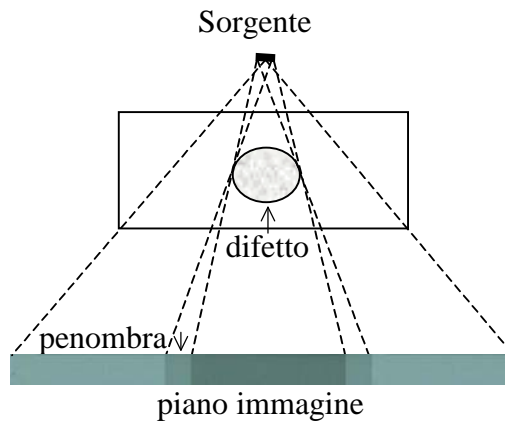
esaminato. Il vero problema è che la radiografia nasce come tecnica di analisi dell'interno degli oggetti e come tale ha un suo limite fondamentale; cerchiamo di capire, per gradi, quale esso sia. Se consideriamo la legge dell'assorbimento ci accorgiamo subito che l'ipotesi che sta alla base è che il campione attraverso sia omogeneo, se ciò non fosse occorrerebbe apportare delle modifiche:

$$N = N_0 e^{-\int \mu(x) dx} \quad (3)$$

Nell'equazione 3 il coefficiente di assorbimento lineare<sup>2</sup> è funzione delle coordinate del punto all'interno dell'oggetto attraversato.

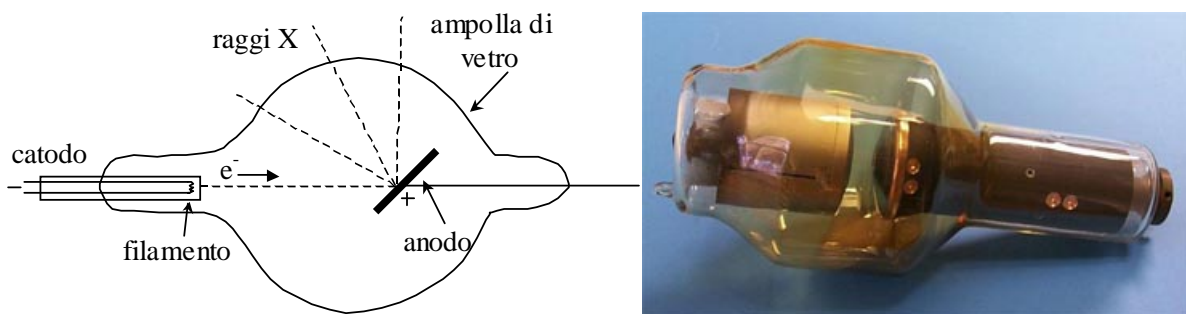
Il significato di quanto affermato sopra sta nel fatto che un fascetto di raggi X attraversa diverse parti di un oggetto, alcune delle quali sono più assorbenti altre meno assorbenti; quello che viene registrato alla fine è il risultato complessivo, cioè che, se in media sono state attraversate parti più assorbenti, il segnale avrà un valore più basso. Per essere più chiari: quando si osserva un tono più nero<sup>3</sup> significa che nel cammino attraverso l'oggetto sono stati assorbiti più quanti di luce (fotoni x) e sono state attraversate zone composte da materiali più assorbenti e/o con densità più elevate.

Quando si ha una sorgente estesa su di un singolo punto del piano immagine arrivano fotoni appartenenti a più fasci elementari, che hanno attraversato l'oggetto seguendo cammini diversi. Ciò crea una intrinseca indeterminazione nell'immagine per cui non è possibile, ad esempio, sapere dove esattamente si trova il limite di una zona che assorbe maggiormente.



## Il sistema radiografico

A questo punto merita la nostra attenzione la maniera con cui possiamo realizzare una radiografia. In pratica ci occorre una sorgente di raggi x ed un sensore per la registrazione dell'immagine, ad esempio una pellicola radiografica.



<sup>2</sup> Si usa questo coefficiente e non quello di massa per semplificare il discorso; ovviamente è opportuno distinguere tra diversi assorbimenti dovute a cambiamenti di composizione del mezzo o a variazioni della sua densità.

<sup>3</sup> Questa considerazione è ovviamente legata al fatto che si sta leggendo un'immagine negativa, quindi quella registrata sulla pellicola esposta.

Figura 6 – Schema di un tubo a raggi X

### ***Tubi a raggi x***

La sorgente è costituita da un'ampolla di vetro in cui sono contenuti diverse componenti che devono stare sotto vuoto per poter funzionare correttamente (vedi figura 6). In particolare è possibile incrementare dall'esterno la tensione che viene applicata tra i due elettrodi, catodo ed anodo, in modo che gli elettroni, prodotti da un filamento incandescente, vengano accelerati maggiormente e producano, nel successivo impatto con l'anodo, raggi x di energia maggiore. Ovviamente l'accelerazione di un maggior numero di elettroni (incrementando la corrente nel filamento è passibile portarlo ad una temperatura maggiore) comporta che il fascio così prodotto risulti più intenso. Occorre però tenere nella giusta considerazione che così facendo può allargarsi la superficie dell'anodo su cui incidono gli elettroni e da cui poi verrà riemesso il fascio di raggi x., cioè la macchia focale. Come vedremo in seguito le dimensioni della macchia, cioè della sorgente giocano un ruolo non trascurabile sulla possibilità di ottenere immagini nitide, cioè con bordi ben definiti.

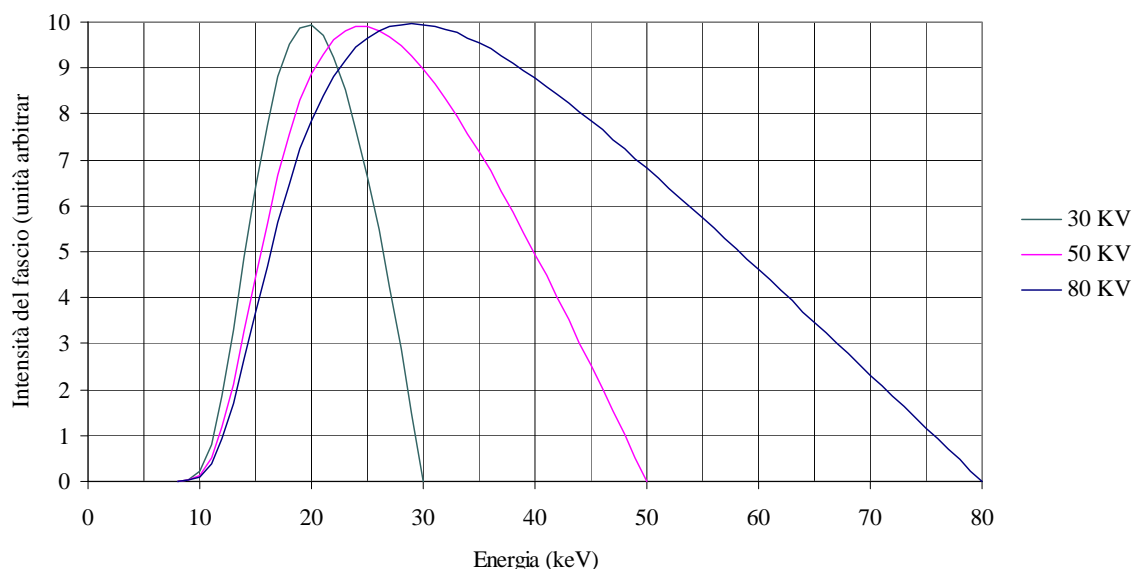


Figura 7 – Spettri di emissione di un tubo a raggi x a diverse tensioni anodiche. Il filtraggio del fascio è sempre lo stesso per cui lo spettro a basse energie non si modifica.

L'aspetto più significativo di questo modo di produrre raggi x è nella policromaticità del fascio; in figura 7 sono riportati tre spettri di emissione di uno stesso tubo alimentato con diverse tensioni, si vede che vi è un notevole allargamento dello spettro quando si incrementa la tensione. Alle basse energie lo spettro è determinato dal filtraggio, cioè dall'assorbimento intrinseco o addizionale del fascio che viene emesso dall'anodo. Ad esempio se, come accade nella radiografia dei dipinti, un maggiore contrasto si ottiene con fotoni di bassa energia occorre avere un tubo con una finestra (ad esempio di berillio) che lasci passare tali fotoni. In figura 8 viene messo in evidenza l'effetto del filtraggio sullo spettro del tubo.



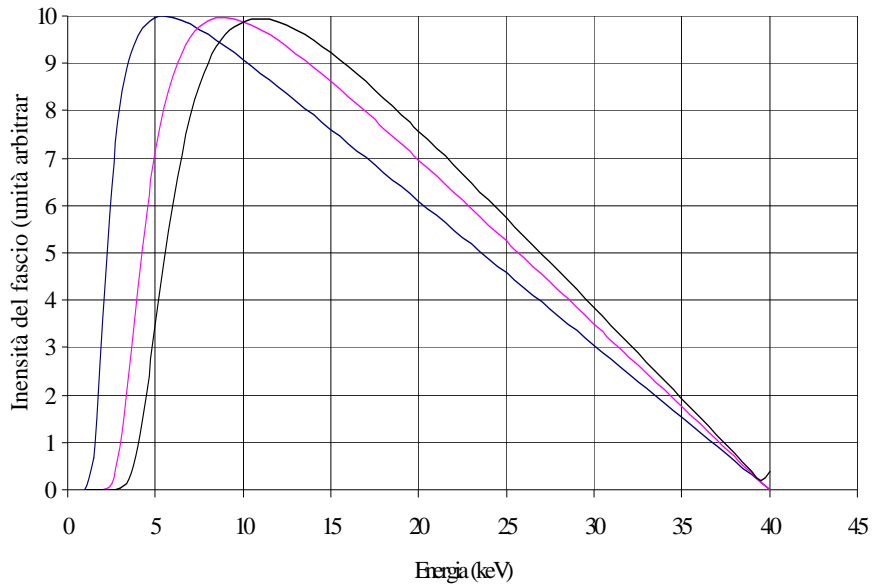


Figura 8 – Spettri di uno stesso tubo con tre filtraggi del fascio di versi. Riducendo lo spessore del filtro (o comunque rendendolo meno assorbente) si allarga lo spettro di emissione verso energie più basse.

Al crescere della tensione e della corrente le dimensioni del tubo crescono notevolmente rendendo molto più difficile l'esame radiografico, questo inconveniente non può essere in genere superato facilmente anche se negli ultimi anni vi sono sorgenti di piccolo ingombro che possono essere utilizzate a tensioni molto elevate (vedi fig. 9). In ogni caso, più è elevata la tensione più penetranti sono i fotoni prodotti, più massiccia deve essere la schermatura del tubo per evitare un indebito irraggiamento degli operatori (che comunque devono rimanere lontani dalla sorgente durante l'esposizione). Misure di sicurezza e normative abbastanza restrittive impediscono la realizzazione di sorgenti di alta potenza che siano anche di piccole dimensioni, questo è un fatto di cui occorre tenere ben conto, soprattutto quando si progettano misure su manufatti grandi o comunque molto assorbenti, come ad esempio quelli di metallo.



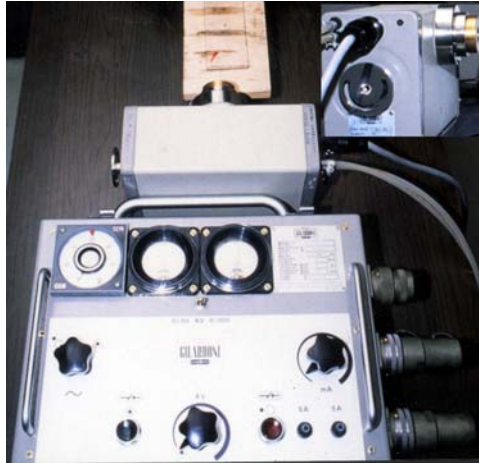


Figura 9 - Tubo a raggi x di elevata potenza per esami su manufatti molto assorbenti.

### ***Rivelazione dell'immagine***

Anche il sistema di registrazione dell'immagine è in principio assai semplice, esso deve essere costituito da sensori che siano in grado di rilevare la presenza di un flusso di raggi x che provengono dalla sorgente. Tale sistema può essere costituito da elementi microscopici disposti irregolarmente su di una superficie, o da un reticolo regolare di elementi sensibili. In pratica questa è la profonda differenza che vi è tra la tradizionale radiografia fondata su pellicole radiografiche e la moderna radiografia digitale. In una lastra radiografica gli elementi sensibili sono dei grani (tutti eguali per forma e dimensione) di alogenuro d'argento inclusi in un mezzo inerte (gelatina) e fissati su un supporto (in genere una pellicola di materiale plastico semirigido). Una buona lastra deve naturalmente avere in media un eguale numero di grani per unità di superficie su tutta la pellicola. Tali grani vengono modificati quando un fotone incidente viene assorbito, formando così l'immagine latente, che è appunto la distribuzione nel piano della lastra radiografica del numero di grani modificati (impressionati) per unità di area della pellicola esposta. L'immagine si dice latente in quanto non è immediatamente visibile, ma lo diviene a seguito del processo di sviluppo che seleziona i grani modificati, riducendoli ad argento fissato sul supporto.

Un problema che si ha in genere con tali rivelatori di immagine (area detectors) è che, non conoscendosi a priori quanti fotoni interagiranno nell'area unitaria del sensore, si corre il rischio che non vi sia la possibilità di registrare il segnale. Ad esempio se il numero di fotoni che interagiscono è grosso modo eguale (o maggiore) del numero di grani presenti nella pellicola, non sarà più possibile distinguere differenze nel numero di fotoni incidenti sulle diverse aree, quindi l'immagine sarà tutta scura egualmente. Problemi analoghi si verificheranno se il numero di fotoni che interagiscono è troppo basso per cui non sarà possibile distinguere due assorbimenti diversi, data la presenza casuale di grani d'argento che sono soggetti a modificazioni analoghe a quelle prodotte dai fotoni. Esiste quindi un intervallo di flussi di fotoni incidenti sulla pellicola per cui è possibile osservare un segnale e delle differenze; fuori da questo intervallo l'immagine si forma lo stesso, ma non può essere registrata.

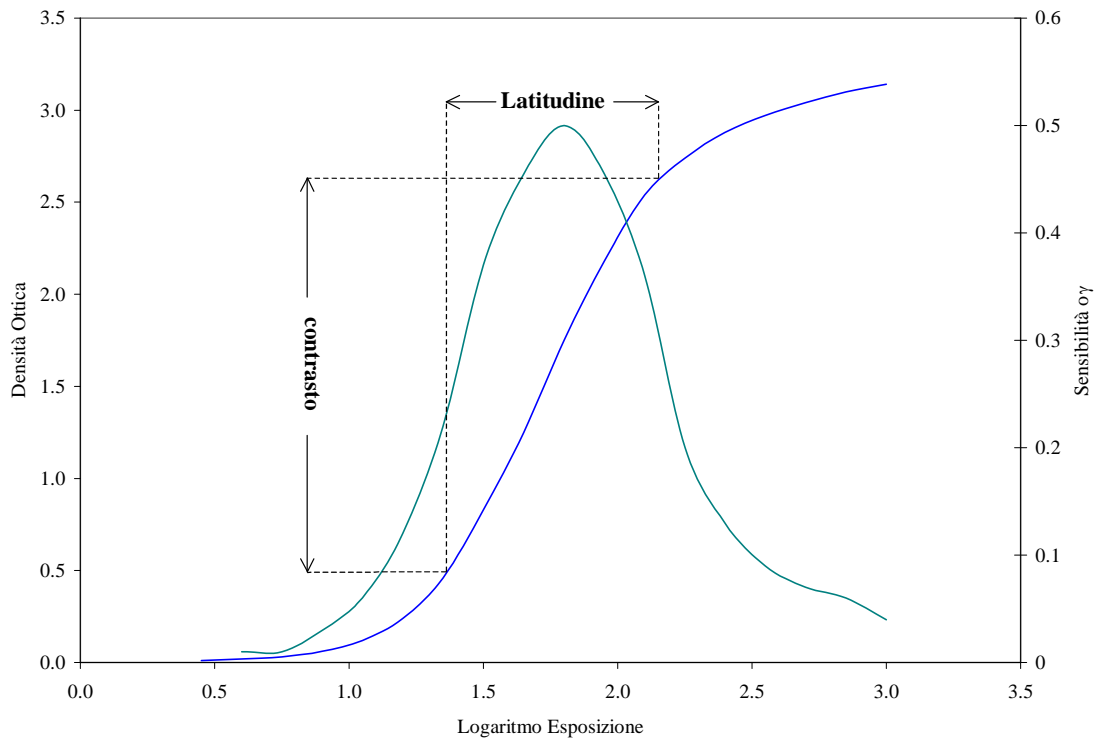


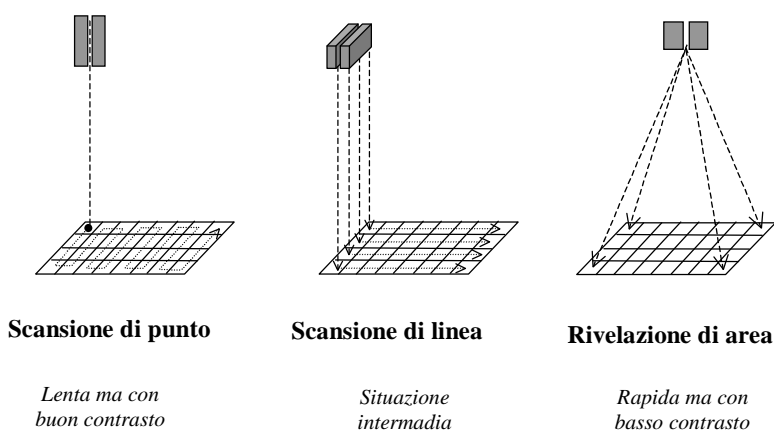
Figura 10 -

In un moderno sistema di rivelazione invece gli elementi sensibili sono disposti regolarmente; ad esempio una telecamera CCD è costituita da un cubetto (chip) di silicio la cui superficie è suddivisa in tante microscopiche celle in cui si accumula della carica quando i fotoni interagiscono. In questo caso l'immagine si ottiene, azzerando la carica nelle celle, cioè leggendo in maniera ordinata il contenuto delle singole celle.

Attualmente la tendenza è quella di sostituire le pellicole con rivelatori che consentono di trasferire l'immagine direttamente ad un computer. Questa tendenza non è del tutto percepibile nel settore dei Beni Culturali che ha esigenze molto particolari e un mercato limitato, per cui non è giustificato, al momento, sviluppare sistemi dedicati. Le tecniche di radiografia digitale stanno però diventando sempre più comuni, quindi i costi di sviluppo di nuovi sistemi diminuiscono costantemente in quanto le tecnologie tendono ad essere conosciute da tutti, per cui è prevedibile che questa situazione evolva, un po' come è accaduto per la fotografia.

Il vero problema della radiografia per le opere d'arte sta nelle dimensioni dell'oggetto da riprendere, che sono molto variabile (spesso molto grandi) e quindi occorre avere rivelatori di immagine che siano in grado di soddisfare a questa esigenza. In questo senso le pellicole radiografiche sono una scelta molto buona in quanto è relativamente facile avere lastre fotografiche anche di grandi dimensioni, mentre è assai più difficile realizzare sensori di immagini di grandi dimensioni a basso costo. Questo problema può essere risolto utilizzando un sistema di scansione che permetta di acquisire tutta l'immagine con scansioni per punti, per linee o per aree.

## Modalità di acquisizione di un'immagine



Nel caso di un uso di una telecamera digitale, con dimensione del quadro fissa, e comunque possibile scansionare un'area grande traslando il sistema di acquisizione di passi tali che sia possibile ricostruire l'intera immagine incollando (con il computer) tra loro i diversi fotogrammi.

Con l'introduzione dei sistemi moderni di radiografia vi è il passaggio alle immagini digitali; tali immagini sono numeri che forniscono il risultato registrato nelle diverse celle in cui è suddiviso un sensore di area per radiografia digitale. Ogni numero corrisponde quindi ad un punto dell'immagine che può essere manipolata in maniera semplice da un computer per effettuare le operazioni volute. Il vero vantaggio che si ha nel passaggio al digitale sta appunto nella possibilità di utilizzare tutte le potenzialità offerte da un computer sia in termini di elaborazione che di memorizzazione, visualizzazione e trasmissione delle immagini stesse.

Un altro problema che si incontra nella radiografia delle opere d'arte è la diversità dei materiali che si devono studiare. Infatti un legno assorbe i raggi x meno di una ceramica che a sua volta è molto ma molto meno assorbente di un materiale metallico. In più vi è il problema che i manufatti da studiare sono di forma e dimensioni assai variabili. La tecnica radiografica, pur essendo molto versatile, non lo è abbastanza da permettere con un singolo apparato di permettere lo studio di tutti i tipo di manufatto che in genere può capitare di dover studiare in un museo o in un laboratorio di restauro. Questo è vero anche in campo industriale e medico (per citare due settori in cui si fa largo uso di tecniche radiografiche) dove i sistemi di radiografia sono specializzati per particolari indagini arrivando al punto che alcuni di essi sono esplicitamente disegnati per una singola indagine. Ciò non significa che un sistema specializzato non possa essere utilizzato per altre indagini, significa solamente che più il problema (da un punto di vista radiologico) è diverso da quello per cui il sistema è stato disegnato, minore sarà la qualità dei risultati che potranno essere raggiunti.

Per dare un'idea della diversa complessità degli apparati disponibili per indagini radiografiche basta osservare le figure riportate qui sotto in cui sono mostrati un tubo a raggi X di elevata per lo studio di grandi manufatti metallici (a sinistra) ed un piccolo tubo di bassa potenza adatto a radiografie di oggetti piccoli o abbastanza trasparenti ai raggi X (cioè poco spessi o costituiti da materiali a basso numero atomico).



Nel passaggio

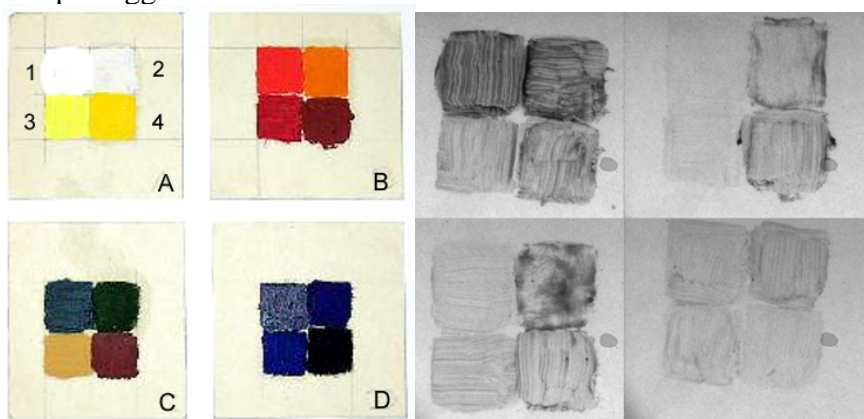


figura a: tavolozza composta da 16 colori; figura b: radiografia

| n° | colore                 | composizione<br>(principali elementi rivelati) |
|----|------------------------|------------------------------------------------|
| a1 | bianco di titanio      | Zn, Ti                                         |
| a2 | bianco di zinco        | Zn                                             |
| a3 | giallo di cadmio       | Zn, Cd, poco K                                 |
| a4 | giallo di cromo        | Pb, Cr, poco Zn, poco S                        |
| b1 | rosso cadmio           |                                                |
| b2 | rosso minio (Pb)       | Pb, Ca, S                                      |
| b3 | rosso garanza (lacca)  |                                                |
| b4 | rosso terra            | Fe                                             |
| c1 | verde cromo            | ? Ni                                           |
| c2 | verde terra (Fe)       | K                                              |
| c3 | ocra (Fe)              |                                                |
| c4 | bruno siena (Fe)       | Fe, poco Ca, poco Ti                           |
| d1 | Blu di prussia (Fe CN) |                                                |
| d2 | blu oltremare          |                                                |
| d3 | blu oltremare          |                                                |
| d4 | nero avorio (C)        |                                                |

Nel fare la radiografia di un dipinto è importante tenere conto del fatto che i dipinti sono composti da diversi strati con grado di assorbimento diverso (tabella in figura 5.12):

- supporto di base (di tela, di legno, di cartone)
- strato preparatorio (gesso, carbonato di calcio)
- strato pittorico (pigmenti, impasto)
- strato protettivo (pellicola di vernice trasparente)

| Assorbimento basso                      | Assorbimento medio                   | Assorbimento alto                                          | Assorbimento molto alto           |
|-----------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| supporto di tela o cartone              | supporto di legno spesso (20mm-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       |

*Figura 5.12*

*Tabella con i diversi gradi di assorbimento dei componenti del dipinto per spessori medi*

Questo è fondamentale sia per scegliere l'energia della radiazione con cui irraggiare il supporto, sia ai fini dei risultati che si possono ottenere.

Sono state fatte le radiografie di dipinti con diverse caratteristiche: il maggiore problema che si è presentato è stato dato dalle piccole dimensioni del sensore rispetto a quelle dei quadri che si volevano riprendere. Per radiografare tutta l'immagine e ricostruirla si è ricorsi a procedure diverse. Di seguito sono riportate le misure eseguite sui dipinti: di ognuno viene fatta una breve descrizione, vengono riportate le condizioni di misura (le sigle 'dark' e 'flat' stanno ad indicare che all'immagine è stata sottratta l'immagine di buio e che è stata fatta la calibrazione con la procedura di *Flat Field*), ed alla voce 'Ripresa' viene spiegata la tecnica che si è adoperata per acquisire l'immagine di tutto il dipinto e per ricomporlo.

*Primo dipinto: Il quadro sotto il quadro*

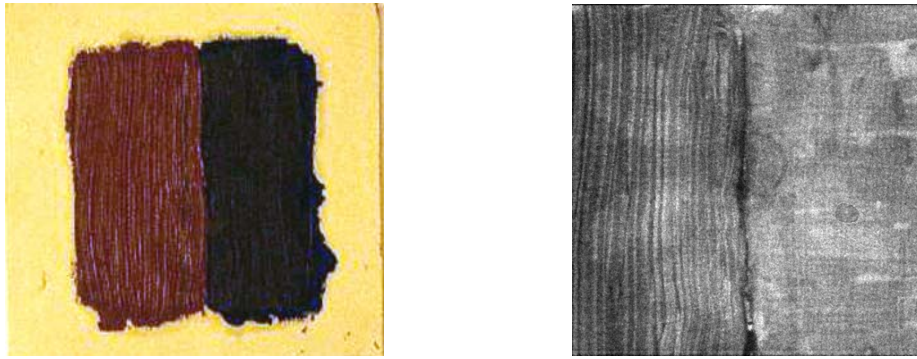
Descrizione: questo dipinto è stato realizzato in laboratorio al fine di sperimentare la capacità del rivelatore di svelare la presenza di un dipinto sotto al dipinto visibile.

Condizioni di misura:

generatore: 3 mA, 19kV

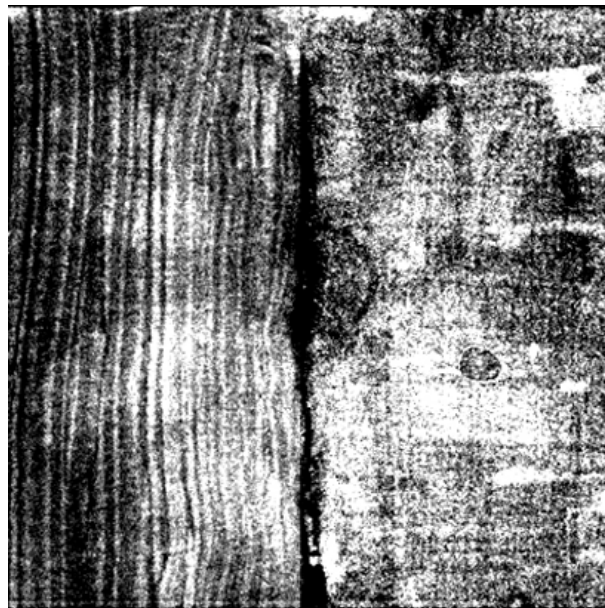
camera Hurricane: T:(-10.0±0.1)°C, t :1s, binning : 3x3, dark, flat

Ripresa: tutto il dipinto in una sola ripresa.



*Figura 5.13*  
*Dipinto e radiografia*

I risultati ottenuti sono soddisfacenti: al di sotto del primo strato pittorico emerge, nella radiografia, la figura del fiore dipinto nel “quadro sotto il quadro”. Inoltre il fatto che l’immagine prodotta sia digitale dà la possibilità di intervenire sull’immagine in modo da rendere il dipinto sottostante ancora più evidente.



*Figura 5.14*  
*Immagine manipolata in modo da esaltare il fiore.*

Conti Alessandro *Vicende e cultura del restauro in Storia dell'arte Italiana - Parte terza "Situazione momenti indagini" - Volume terzo " Conservazione, falso, restauro"* Einaudi, Torino, 1981 p.039-117  
Brandi Cesare *Teoria del restauro* Einaudi - Torino, 1977  
Baldini Umberto *Teoria del restauro e unità di metodologia (volume I°eII°)* Nardini - Firenze, 1978-81



Maltese (a cura di) I supporti nelle arti pittoriche. Storia, tecnica, restauro Mursia - Milano, 1990  
Angelucci Sergio (cura di) Arte Contemporanea. Conservazione e restauro. Contributi al  
"Colloquio sul restauro dell'arte moderna e contemporanea" a cura di Sergio Angelucci Nardini -  
Firenze, 1994

Althofer Heinz Il restauro delle opere d'arte moderne e contemporanee Nardini - Firenze, 1991

Matteini Mauro -Moles Arcangelo Scienza e restauro - Metodi di Indagine Nardini - Firenze, 1984

Mora Paolo e Laura - Phillipot Paul La conservazione delle pitture murali Compositori - Bologna,  
1999 (traduzione dell'ed. In Francese del 1977)

Nicolaus Knut Il restauro dei dipinti Konemann, Koln, 1998 (2001 ed. Italiana)

Lazzarini Lorenzo, Laurenzi Tabasso Marisa Il restauro della pietra Cedam – Padova 1986

James Carlo, Corrigan Caroline, Enshaian Marie Christine, Greca Marie Rose Manuale per la  
conservazione e il restauro di disegni e stampe antichi Leo S.Olschki - Firenze, 1991

