



Tecniche
radiografiche
applicate ai
beni culturali

ENEA

Pietro Moioli, Claudio Seccaroni

TECNICHE RADIOGRAFICHE APPLICATE AI BENI CULTURALI

Pietro Moioli, Claudio Seccaroni

ENEA

Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente
Lungotevere Thaon di Revel, 76 - Roma

ISBN 88-8286-109-0

In copertina:

radiografia della *Fornarina di Raffaello*, olio su tavola, Roma,
Galleria Nazionale di Arte Antica di Palazzo Barberini

Nel retro di copertina:

radiografia del *Ritratto di Madame Ginoux (L'Arlesiana)* di Vincent van Gogh,
olio su tela, Roma, Galleria Nazionale di Arte Moderna



Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente

Tecniche radiografiche applicate ai beni culturali

Pietro Moioli, Claudio Seccaroni

Presentazione

Caterina Bon Valsassina

Direttore dell'Istituto Centrale per il Restauro

La radiografia è, a pieno titolo, uno strumento di lavoro completamente acquisito per lo storico dell'arte, l'archeologo, il restauratore-conservatore e possiamo ormai considerarla una tecnica "storicizzata", che conferma ulteriormente, dove ce ne fosse bisogno, l'analogia della storia dell'arte (antica, classica, moderna, contemporanea) con il modello epistemologico della semeiotica medica.

L'indagine radiografica di manufatti artistici è entrata ormai da molti anni anche nel settore della valorizzazione delle collezioni museali e delle mostre. Cito in particolare, fra le molte, l'esposizione curata da Mina Gregori su *Caravaggio. Come nascono i capolavori* (Firenze – Roma, 1991-1992), perché attraverso le radiografie dei dipinti potevano anche venir confermate o rettificate attribuzioni o cronologie fino ad arrivare al recente esperimento della National Gallery di Londra, che esponeva nel 2002 alcune opere del museo con accanto la loro radiografia per insegnare al pubblico a vedere "oltre il visibile" di un dipinto e, allo stesso tempo, far uscire l'indagine radiografica dal campo ristretto degli addetti ai lavori.

Sono particolarmente onorata di essere stata invitata a scrivere questa presentazione proprio per il ruolo che ha avuto l'Istituto Centrale per il Restauro quando, in tempi durante i quali in Italia il suo uso nel nostro settore era certamente pionieristico, ne ha promosso e sviluppato l'impiego fin dai tempi del suo primo Direttore e fondatore, Cesare Brandi.

Oggi, proprio perché così connaturata ed integrata nel nostro lavoro quotidiano, i suoi principi fisici e gli aspetti più strettamente tecnici spesso ci sfuggono, la consuetudine ci porta sovente a trascurarne i suoi fondamenti ed è cresciuto il rischio di farne un uso di *routine*. Questo libro, proprio per il modo chiaro ma rigoroso di trattare gli argomenti, costituisce un valido strumento per tutti quelli che vogliono capirne i meccanismi, insieme alle potenzialità ed ai limiti e che desiderino fare dell'indagine radiografica un impiego corretto.

La pluriennale esperienza degli autori - Claudio Seccaroni ingegnere e Pietro Moio - fisico - in campo diagnostico ed in quello della formazione, nonché la loro consuetudine al lavoro di *équipe* con professionalità diverse e complementari, ha permesso loro di sviluppare un testo che ha anche una forte potenzialità didattica, adatto sia alle nuove figure professionali che vengono da pochi anni formate nelle molte nuove facoltà universitarie (Beni Culturali, Scienze della conservazione nelle classi

12 e 41 delle facoltà rispettivamente umanistiche e scientifiche), ma anche ai restauratori delle Scuole di Alta Formazione che ad una solida preparazione nell'intervento diretto sul manufatto devono accompagnare una sempre più approfondita conoscenza tecnico-scientifica.

Gli argomenti trattati sono, infatti, esposti in maniera rigorosa ma, allo stesso tempo, nel modo più scevro possibile da tecnicismi accessibili solo a chi possiede una formazione specialistica.

Il libro, che nella prima parte si sviluppa assai diffusamente nell'illustrare i principi teorici e gli aspetti tecnici che sono alla base di questa indagine non distruttiva, presenta poi, nella seconda, una serie di casi studio emblematici.

La lunga collaborazione con l'ICR, in particolare col laboratorio di Fisica e Controlli Ambientali, la collaborazione con differenti istituzioni universitarie, fra cui la facoltà di Conservazione in Beni Culturali dell'Università della Tuscia, le sperimentazioni sviluppate partendo da problematiche concrete con le quali ogni giorno ci si trova a dover misurare ed i molti esempi portati, hanno fatto sì che questo testo possa costituire un valido supporto per tutti quelli che operano nel settore dei beni culturali.

Chiude il libro un interessante intervento della restauratrice Giovanna Martellotti, che mostra come la radiografia costituisca un potente strumento di indagine, se utilizzata in maniera tutt'altro che automatica. La Martellotti mostra con chiarezza e competenza quanto sia imprescindibile mantenere una prospettiva che focalizzi la ricerca sull'opera, nella sua istanza materica e storica. In questo contesto le indagini diagnostiche e, nel nostro caso le tecniche radiografiche, devono fornire un oggettivo incremento conoscitivo e non, come purtroppo spesso avviene, uno sterile corollario di indagini astratte.

La chiara esposizione della parte teorica e applicativa e gli esempi addotti dalla Martellotti enfatizzano come spesso una cattiva o superficiale lettura delle lastre radiografiche portino ad estrarre solo una piccola percentuale del loro potenziale informativo.

Gli autori, ben consapevoli della varietà e della vastità delle problematiche che i diversi materiali e manufatti possono presentare, lasciano agli storici, ai conservatori e a tutti quelli a cui il testo è rivolto, il compito e la libertà di trovarne la giusta chiave di lettura.

Indice

Introduzione	9
1. LA RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA	13
1.1 Natura della radiazione elettromagnetica	13
1.2 Produzione dei raggi X	16
1.3 Qualche cenno sulle unità di misura	17
1.4 Spettro della radiazione emessa	18
1.5 Generatori di raggi X	19
1.6 Sorgenti radioattive	21
2. RADIOGRAFIA E GAMMAGRAFIA	29
2.1 Interazione dei raggi X e γ con la materia	29
2.2 Esecuzione delle radiografie	30
2.3 Scelta dell'energia della radiazione	31
2.4 Contrasto radiologico o contrasto di assorbimento	33
2.5 Radiazione diffusa	33
2.6 Criteri per la scelta dell'energia della radiazione	35
2.7 Deformazione delle immagini radiografiche	36
2.8 Condizioni geometriche	38
2.9 Localizzazione di particolari interni	39
2.10 Radiografia di oggetti tridimensionali	40
2.11 Radiografia di dipinti	43
2.11.1 Supporto: dipinti su tela	45
2.11.2 Supporto: dipinti su tavola	46
2.11.3 Strutture di sostegno o di irrigidimento del supporto	48
2.11.4 Strati preparatori	50
2.11.5 Disegno	50
2.11.6 Strati pittorici: materiali	51
2.11.7 Strati pittorici: stesure	54
2.12 Fluoroscopia, intensificatori d'immagine	56
2.13 Trattamento digitale delle immagini	56
2.14 Campioni per la datazione	57
2.15 Centri di colore	58

3.	LA LASTRA RADIOGRAFICA E LE CONDIZIONI DI IRRAGGIAMENTO	59
3.1	Struttura della lastra	59
3.2	Trattamento delle lastre	60
3.3	Densità fotografica	61
3.4	Esposizione o dose assorbita	62
3.5	Curva caratteristica o di densità	62
3.6	Determinazione della densità	64
3.7	Influenza dello sviluppo	65
3.8	Tipi di lastre radiografiche	66
3.9	Scelta dei parametri di irraggiamento	66
4.	ALTRE TECNICHE RADIOGRAFICHE	71
4.1	Betaradiografia	71
4.2	Tomografia assiale computerizzata	72
4.3	Radiografia neutronica	75
4.4	Autoradiografia neutronica	78
4.5	Cattura radiativa di neutroni	80
5.	CENNI DI RADIOPROTEZIONE	91
5.1	Effetti delle radiazioni sugli organismi biologici	91
5.2	Misura della dose	94
5.3	Alcuni aspetti normativi	96
6.	TAVOLE	99
7.	LA RADIOGRAFIA TRA GLI STRUMENTI PER LA MESSA A FUOCO DEL PROCEDIMENTO DELLA PITTURA	175
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	185
	APPENDICE A – GLOSSARIO	191
	APPENDICE B – UNITÀ DI MISURA RICHIAMATE NEL TESTO	195

Introduzione

Per tecniche radiografiche s'intendono in questa sede tutte quelle tecniche d'indagine non distruttive che consentono, mediante l'uso di radiazioni elettromagnetiche, di guardare "dentro" un corpo opaco, analogamente a quanto si fa normalmente quando si osserva controluce un oggetto semitrasparente. In quest'ultimo caso la luce che attraversa l'oggetto reca all'occhio informazioni sulla sua struttura interna. Quando l'oggetto è completamente opaco occorre utilizzare, al posto della luce, qualcosa di più penetrante, appunto la radiazione elettromagnetica, capace di attraversare la materia ed estrarre informazioni sulle sue caratteristiche interne. In questo caso l'occhio non è in grado di rivelare la radiazione che attraversa l'oggetto, e inoltre ne verrebbe seriamente danneggiato; al suo posto occorre utilizzare una pellicola radiografica o un opportuno schermo fluorescente, sui quali viene formata l'immagine.

In questo modo è possibile evidenziare i dettagli interni non osservabili mediante una semplice ispezione visiva, quali la struttura, i particolari di realizzazione, lo stato di conservazione, eventuali difetti e alterazioni ecc.

La radiografia è uno degli strumenti diagnostici applicati allo studio delle opere d'arte di più antico e largo impiego; essa è attualmente considerata uno strumento tra i più validi e semplici, a tal punto che viene utilizzata correntemente come operazione preliminare a qualsiasi tipo di intervento e, in molti casi, è condotta a scopo conoscitivo indipendentemente da normali operazioni di restauro.

Le prime applicazioni della radiografia a manufatti di interesse storico-artistico risalgono al 1896 con l'esecuzione di radiografie di dipinti effettuate a Francoforte da Walter König, l'anno successivo a quello in cui Wilhelm Konrad Röntgen aveva scoperto i raggi X. La sperimentazione proseguì nei due decenni successivi, al termine dei quali avvenne l'ingresso ufficiale e stabile di questa tecnica nelle diverse istituzioni museali pubbliche: il Kunsthistorisches Museum di Vienna (1916), il Louvre di Parigi (1919), l'Alte Pinakothek di Monaco (1924) ecc.

In Italia la piena affermazione della sua applicazione ai dipinti data agli anni 30, con la fondazione di strutture pubbliche dedicate alla conservazione che furono subito dotate di strumentazione radiografica: il Gabinetto Restauri della Soprintendenza di Firenze (1932), il Gabinetto Pinacologico di Napoli (1932) e l'Istituto Centrale per il Restauro a Roma (1939).

Il principio base è stato successivamente variato, ricorrendo a differenti "illuminanti" (raggi gamma, neutroni, elettroni ecc.) o ad assetti particolari, in modo da analizzare manufatti di varia forma, materiale e dimensioni, dando luogo a una molteplicità di tecniche.

Il potenziale di informazioni contenuto nelle radiografie è elevatissimo; ciò consente diversi livelli di lettura, in funzione dei fini per cui esse vengono realizzate o della specializzazione di chi esegue la lettura. Nel caso dei dipinti, ad esempio, lo storico dell'arte darà un peso maggiore alle caratteristiche e alle fasi esecutive dell'opera (abbozzo, prime stesure, andamento delle pennellate, costruzione delle figure, pentimenti ecc.) mentre il restauratore sarà invece più interessato allo stato fisico del supporto e della materia pittorica, focalizzando l'attenzione su cadute di colore, lacune, stuccature, ritocchi, riprese di colore ecc. Naturalmente queste non sono le uniche informazioni ricavabili da una ripresa radiografica.

Questo testo nasce dalla rielaborazione di materiale didattico messo a punto alcuni anni fa per una serie di lezioni universitarie. Il carattere interdisciplinare dell'argomento è stato affrontato sviluppando i fondamenti teorici, illustrando i procedimenti pratico-operativi, svolgendo gli aspetti diagnostici e corredando il tutto con numerosi esempi forniti da una lunga attività su queste problematiche.

Nelle pagine che seguono verranno richiamate in modo molto semplice pochissime nozioni di fisica, in particolare sulla radiazione elettromagnetica e sulla radioattività. Lo scopo è quello di mettere in grado anche il lettore che non abbia dimestichezza con questi fenomeni fisici di comprendere i meccanismi che intervengono nelle tecniche di indagine illustrate, che utilizzano tutte radiazioni ionizzanti (raggi X, raggi γ , neutroni).

Essendo questo lo scopo, si è cercato di semplificare al massimo i concetti trattati ricorrendo anche a modelli che potessero rendere più intuitivo quanto esposto. È evidente che in questo modo l'esposizione degli argomenti è alquanto semplificata, e non rigorosa dal punto di vista scientifico, ma si ritiene, o almeno si spera, che sia sufficiente a mettere il lettore in grado di capire i fenomeni di cui si parlerà nel corso dell'illustrazione delle varie tecniche di analisi.

Le immagini radiografiche mostrate nel testo sono state estratte dall'archivio ENEA del Centro Ricerche Casaccia, dovuto per la quasi totalità all'opera dei colleghi M. Massimi, A. Melchiorri e A. Tognacci, cui rivolgiamo pertanto un ringraziamento particolare. Un ringraziamento va anche a F. Marracino per la collaborazione nell'acquisizione digitale della maggior parte delle immagini radiografiche, a E. Giani (Istituto Centrale per il Restauro) e a S. Moioli per aver letto attentamente il manoscritto.

Il nostro riconoscimento è inoltre indirizzato verso tutte quelle istituzioni che ci hanno autorizzato alla riproduzione delle immagini, nelle persone di:

- C. Acidini, A.M. Giusti (Opificio delle Pietre Dure, Firenze),
- M.G. Bernardini (Gall. Naz. d'Arte Antica di Palazzo Barberini, Roma),
- R. Ciarla e D. Mazzeo (Museo Naz. di Arte Orientale, Roma),
- K. Hermann Fiore (Galleria Borghese, Roma),
- V. Garibaldi (Soprintendenza per il Patrimonio Storico, Artistico e Demoetnoantropologico di Perugia),
- P. Masini (Musei Capitolini, Roma),

L. Mochi Onori e M.R. Valazzi (Soprintendenza per il Patrimonio Storico, Artistico e Demoetnoantropologico per le Marche),
M. Olivari (Soprintendenza per il Patrimonio Storico, Artistico e Demoetnoantropologico di Milano, Bergamo, Como, Pavia, Sondrio, Varese, Lecco, Lodi),
S. Pinto (Soprintendenza alla Galleria Naz. d'Arte Moderna e Contemporanea),
F. Rispoli e M. Vidale (ISIAO, Roma),
M.R. Sanzi di Mino e G. Bandini (Museo Naz. Romano, Soprintendenza Archeologica di Roma),
G. Testa (Istituto Centrale per il Restauro, Roma),
M.G. Vaccari (Museo Naz. del Bargello, Firenze).

Desideriamo infine ringraziare le istituzioni museali, le soprintendenze, gli operatori e i laboratori di restauro con cui abbiamo avuto modo di collaborare e con i quali abbiamo avuto sempre scambi proficui, in particolare la C.B.C. Conservazione Beni Culturali, che ha curato il restauro di molte opere da noi radiografate.

1. La radiazione elettromagnetica

1.1 Natura della radiazione elettromagnetica

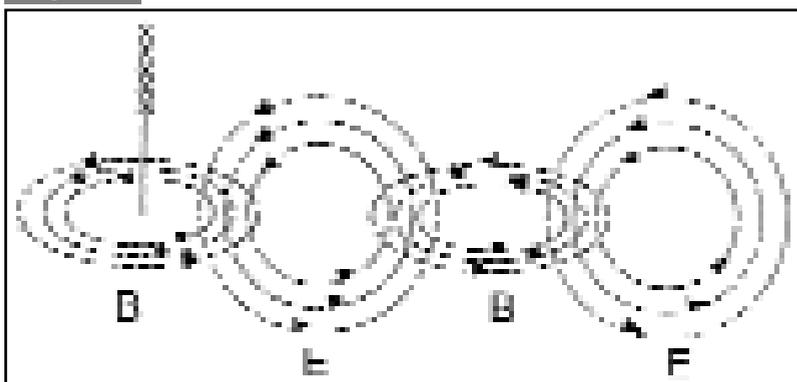
Si supponga di far muovere rapidamente una carica elettrica in un punto qualsiasi dello spazio: questo movimento produce un campo elettrico rapidamente variabile nello spazio circostante, che a sua volta produce nelle immediate vicinanze un campo magnetico anch'esso variabile nel tempo. La variazione del campo magnetico origina nello spazio circostante un campo elettrico variabile, e così via, come mostrato nella figura 1, dove con \vec{B} ed \vec{E} sono indicati rispettivamente il campo magnetico e il campo elettrico.

Viene quindi provocata una perturbazione elettromagnetica che si propaga nello spazio all'infinito; si ha cioè l'emissione di *radiazione elettromagnetica* sotto forma di onde sinusoidali che trasportano energia. Queste onde sono della stessa natura della luce visibile e delle onde radio e si propagano nello spazio allo stesso modo delle onde acustiche o di quelle, a tutti familiari, che si propagano sulla superficie ferma di uno stagno. Per meglio visualizzare i fenomeni ad essa collegati ci riferiremo a quest'ultimo esempio¹.

L'onda è data da una successione regolare di massimi e di minimi o, come evidenziato dalla figura 2, da una successione di creste e di gole (*sinusoide*).

Una grandezza che caratterizza un'onda sinusoidale è la *lunghezza d'onda* λ : si immagini di poter fermare l'onda in un dato istante e di poter misurare la distan-

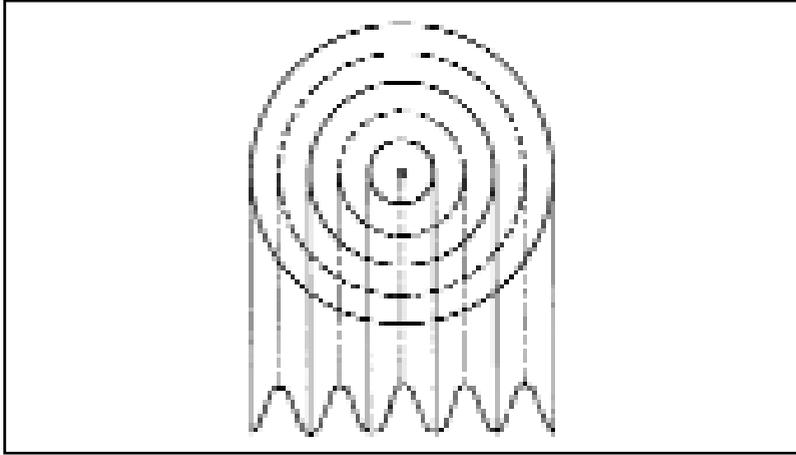
Figura 1



Rappresentazione schematica di un campo elettromagnetico che si propaga nello spazio

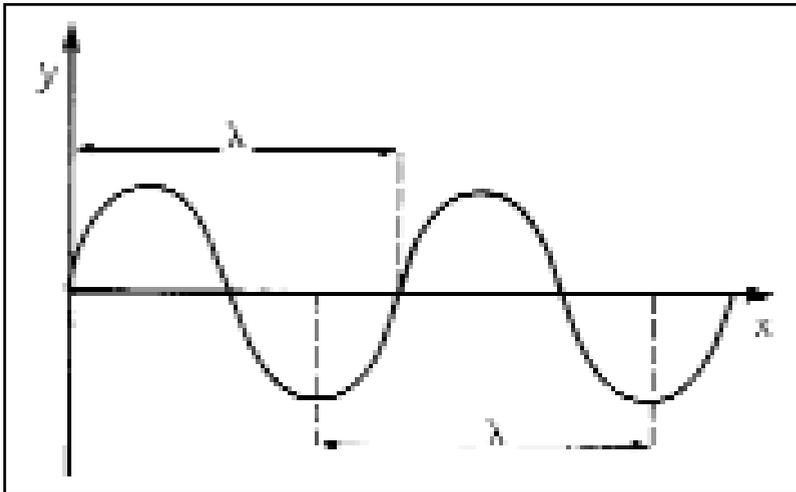
¹ Un'onda elettromagnetica può essere generata anche dalla variazione di un campo magnetico. Una trattazione rigorosa di questi fenomeni richiederebbe l'introduzione dei concetti di campi elettrici e magnetici variabili e delle loro mutue interazioni.

Figura 2



Corrispondenza
tra la
rappresentazione
dell'onda e le sue
creste e gole

Figura 3



Lunghezza di
un'onda
sinusoidale

za, espressa in metri, che intercorre tra due creste o due gole (figura 3). Questa distanza è la lunghezza d'onda e si misura in metri o nei suoi multipli e sottomultipli.

A questa è legata la *frequenza* ν ; si immagini di fissare un punto e di contare quante creste o quante gole passano per questo punto in un secondo: questo numero è la frequenza. Ovviamente se \mathbf{v} è la velocità con cui l'onda si propaga sarà

$$\mathbf{v} = \nu/\lambda$$

Tornando all'onda elettromagnetica, la velocità di propagazione è quella della luce \mathbf{c} .

A queste grandezze se ne aggiunge una terza che è l'energia **E**. Queste grandezze sono legate dalle relazioni

$$v = \frac{c}{\lambda} \qquad E = h \cdot v = h \frac{c}{\lambda}$$

dove **h** è la costante di Planck (par. 1.3), e **c** = 3·10⁸ m/sec.

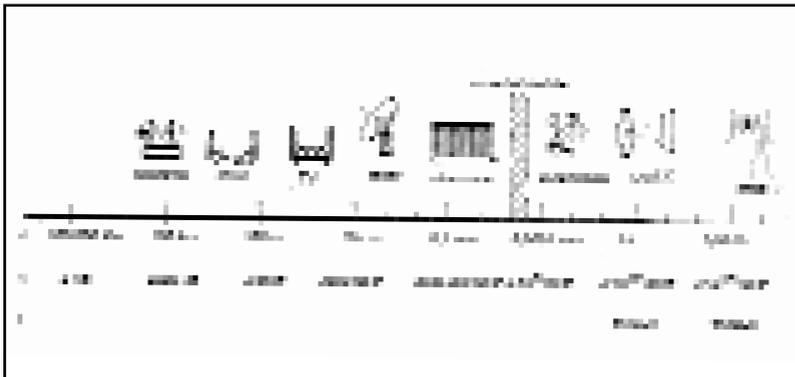
Nella figura 4 è riportato tutto lo spettro della radiazione elettromagnetica e sono evidenziati i vari intervalli corrispondenti alle diverse utilizzazioni.

Per quanto riguarda le unità di misura, abbiamo già detto che la lunghezza d'onda si misura in metri, o nei sottomultipli del metro. Per la frequenza si usano i cicli (o periodi) al secondo, oppure l'Hertz, che ha lo stesso significato e il cui simbolo è Hz. Infine delle unità di misura dell'energia dei raggi X e γ si parlerà più avanti.

Ricordando che le radiazioni elettromagnetiche possono essere generate dal movimento rapido di cariche elettriche, in particolare si può dire che le onde radio, TV e radar sono prodotte dalle correnti elettriche che vengono fatte circolare nell'antenna di trasmissione. Le onde nella zona del visibile, che come si vede occupano un intervallo abbastanza piccolo dell'intero spettro, sono dovute a salti degli elettroni nelle orbite più esterne degli atomi.

Al di là della zona del visibile, verso le lunghezze d'onda più piccole o, che è lo stesso, verso le frequenze più grandi, quindi nella zona dei raggi X e γ , alla radiazione elettromagnetica è associata una notevole quantità di energia, che la rende pericolosa per gli organismi viventi. In genere ai raggi X è associato il concetto di radiazioni di bassa energia e ai γ quello di radiazioni di alta energia, come si vede anche dalla figura 4. Ciò non è sempre vero perché si possono produrre raggi X di energia elevata che nella figura vanno ad occupare la zona tipica dei raggi γ e viceversa, come vedremo dettagliatamente parlando della radiografia e della gammagrafia. Dal punto di vista fisico invece la distinzione è concettualmente molto precisa: i raggi X

Figura 4



Spettro della radiazione elettromagnetica (rielaborato da [Gilardoni 1994])

derivano da processi che coinvolgono la nube di elettroni degli atomi, mentre i γ vengono prodotti da processi che riguardano il nucleo atomico. Sempre dal punto di vista fisico sia i raggi X sia i raggi γ possono essere trattati sia come onde elettromagnetiche che si propagano nel mezzo che attraversano, sia come veri e propri corpuscoli o, come si dice con il termine fisico, *fotoni*, privi di massa a riposo, caratterizzati solo dalla loro energia e che viaggiano nel mezzo con la velocità della luce. In questo secondo modo è forse più semplice seguire i vari processi che avvengono nella loro interazione con la materia.

1.2 Produzione dei raggi X

Il sistema rappresentato schematicamente nella figura 5 è costituito da un *tubo a raggi X*, mantenuto sotto vuoto, e da una serie di apparecchiature che servono per il suo controllo. All'interno del tubo il catodo costituisce l'elettrodo negativo, che produce elettroni attraverso un filamento mantenuto incandescente a temperature dell'ordine di 2500 °C.

Gli elettroni emessi vengono accelerati dal campo elettrico esistente tra catodo e anodo (elettrodo positivo), generato dall'alimentatore ad alta tensione (AT), e urtano contro gli atomi che costituiscono il bersaglio, posto sull'anodo, costituito da un metallo pesante, per esempio tungsteno. Questi urti devono essere intesi come interazioni con le nubi elettroniche che circondano gli atomi, in conseguenza dei quali gli elettroni accelerati subiscono una serie di brusche deviazioni e decelerazioni che provocano l'emissione di radiazioni elettromagnetiche, cioè di raggi X, che fuoriescono dal sistema attraverso la finestra. Quest'ultima ha una duplice funzione: mantenere il vuoto all'interno, necessario per evitare che gli urti con le molecole di aria impediscano il movimento degli elettroni verso il bersaglio, e permettere la fuoriuscita della radiazione generata. Le sue caratteristiche devono essere tali da assorbire il meno possibile i raggi X che l'attraversano ed è pertanto costituita da un metallo molto leggero, il berillio, dello spessore dell'ordine del centesimo di millimetro.

Figura 5



Schema di un generatore di raggi X

Come si vede dalla figura 5, le direzioni di propagazione dei raggi X emessi sono divergenti, e sono contenute all'interno di un cono detto *cono di emissione* o *cono di irraggiamento*, che ha un'apertura variabile a seconda del tipo di generatore.

La conformazione del catodo e del bersaglio sono tali che l'emissione avviene da una superficie molto piccola, detta *macchia focale*, le cui dimensioni trasversali variano da circa 0,3 mm nei piccoli generatori, fino a 4-5 mm in quelli più grandi. Le dimensioni della macchia focale sono importanti, come si vedrà in seguito, per la definizione dei contorni dell'immagine.

Solo una piccola quantità (circa 1%) dell'energia posseduta dagli elettroni viene trasformata in radiazione, la parte restante è convertita in calore sul bersaglio (per questo motivo il metallo di cui è costituito quest'ultimo deve avere un elevato punto di fusione) e si rende necessario l'utilizzo di un sistema di raffreddamento.

La quantità di elettroni emessi dal catodo, cioè la corrente di lavoro del generatore, e di conseguenza l'intensità del fascio X uscente dalla finestra, aumenta con la temperatura del filamento e può quindi essere regolata attraverso il pannello di controllo. Quest'ultimo consente anche di regolare l'alta tensione tra catodo e anodo, che come vedremo determina l'energia dei raggi X emessi ed è detta *tensione di lavoro*.

1.3 Qualche cenno sulle unità di misura²

La differenza di potenziale esistente tra due elettrodi si misura in Volt (**V**); nel caso dei generatori di raggi X, poiché l'alta tensione tra anodo e catodo è dell'ordine delle decine di migliaia di Volt, si usa il multiplo kV.

L'energia acquistata da un elettrone accelerato dipende, come abbiamo detto, dal valore dell'alta tensione V applicata tra catodo e anodo, ed è data da

$$E = e \cdot V$$

dove e è la carica dell'elettrone. L'energia è data cioè dal prodotto della carica dell'elettrone per la tensione applicata, e viene misurata in *elettronvolt*: 1 eV corrisponde all'energia acquistata dall'elettrone quando la tensione applicata tra anodo e catodo è di 1 Volt. Nel caso del generatore l'alta tensione si misura in kV, e analogamente l'energia degli elettroni si misura in keV.

La costante di Planck h , menzionata nel paragrafo 1.1, ha il valore

$$h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{sec}$$

² Maggiori dettagli si trovano nell'Appendice B.

e la relazione tra energia e lunghezza d'onda può essere esplicitata nel caso dei raggi X emessi da un acceleratore come

$$\lambda = \frac{12,4}{E} 10^{-10} \text{ m}$$

dove **E** è espressa in keV. Se ad esempio l'alta tensione utilizzata è di 20 kV, l'energia massima dei raggi X prodotti è di 20 keV, introducendo 20 al posto di E si ottiene $\lambda = 0,6 \cdot 10^{-10}$ m. Come si vede la lunghezza d'onda è molto piccola, e in questi casi si usa un sottomultiplo del metro e cioè l'Ångstrom (Å): all'energia di 20 keV corrisponde la lunghezza d'onda di 0,6 Å. Se la tensione fosse dell'ordine dei milioni di V, si dovrebbe usare il multiplo MV e analogamente la corrispondente energia degli elettroni sarebbe espressa in MeV, cioè in milioni di eV. Questa energia viene raggiunta negli acceleratori di elettroni di grandi dimensioni, ed è l'ordine di grandezza dell'energia dei raggi γ emessi da alcune sorgenti, come si dirà più avanti. Ovviamente in questi casi la lunghezza d'onda diventa mille volte più piccola di quella vista per i raggi X: ad una energia di 20 MeV corrisponde una lunghezza d'onda di 0,006 Å.

1.4 Spettro della radiazione emessa

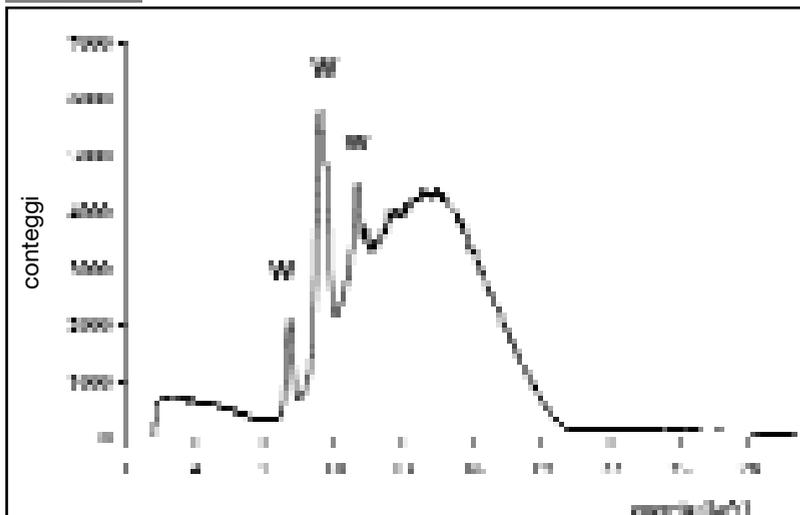
Come abbiamo accennato nel par. 1.2, gli elettroni accelerati emettono raggi X attraverso una serie di "urti" contro le nubi elettroniche degli atomi costituenti il bersaglio, urti che provocano brusche decelerazioni e deviazioni degli elettroni stessi; questa radiazione è detta di *frenamento* o, come si dice tecnicamente usando un termine tedesco, di *Bremsstrahlung*.

Se si immagina di contare i raggi X che vengono emessi con una certa energia e di mettere in un grafico per ogni energia il numero corrispondente, si ottiene quello che si dice lo *spettro della radiazione* emessa. Poiché in ogni singolo urto un elettrone può perdere una quantità di energia che varia da zero fino a tutta la sua energia, i singoli X emessi possono avere tutte le energie comprese tra questi limiti; avremo quindi uno spettro continuo come quello riportato nella figura 6 [Seccaroni 2002].

In realtà, come si vede dalla figura, manca la parte iniziale dello spettro a causa dell'assorbimento degli X di energia più bassa da parte della finestra di berillio.

Allo spettro continuo si sovrappongono le tre righe caratteristiche del tungsteno (W) del bersaglio. In effetti un elettrone accelerato, oltre ad essere deflesso e frenato dalla nube di elettroni, può entrare in collisione direttamente con uno degli elettroni delle orbite interne di un atomo del bersaglio e cedergli una energia sufficiente ad estrarlo dall'atomo stesso, lasciando quest'ultimo in uno stato eccitato. La

Figura 6



Spettro dei raggi X emessi con una differenza di potenziale di 20 kV

diseccitazione avviene tramite il salto di un elettrone da una delle orbite più esterne dello stesso atomo verso quella in cui si è creata la mancanza. Questo salto è accompagnato dall'emissione della differenza di energia tra i livelli di partenza e di arrivo dell'elettrone che è saltato, sotto forma di un nuovo raggio X detto di *fluorescenza*. Poiché questa differenza è caratteristica dell'atomo con cui l'elettrone iniziale ha coliso, lo è anche l'energia del raggio X emesso.

1.5 Generatori di raggi X

I generatori di raggi X si basano su sistemi di accelerazione di elettroni e sulla loro collisione contro un bersaglio, dei quali quello descritto nel par. 1.2 è il più semplice. Con queste macchine si possono ottenere raggi X di energie molto elevate. Per ottenere però energie maggiori di qualche centinaio di keV si devono impiegare apparecchiature di ingombro e peso molto elevati che, a parte i problemi connessi alla sicurezza del loro impiego, non possono essere trasportate in musei o laboratori di restauro per l'esame *in situ*. Il loro uso è pertanto limitato ad applicazioni presso strutture attrezzate allo scopo.

Nelle figure 7 e 8 sono riportati due esempi di generatori trasportabili utilizzati per indagini radiografiche sulle opere d'arte. La macchina illustrata nella prima figura consente di raggiungere tensioni e correnti di lavoro rispettivamente di 160 kV e 10 mA, ed è montata su un carrello che ne agevola il trasporto. A terra si nota la *cuffia*, cioè il tubo all'interno del quale gli elettroni vengono accelerati e prodotti i raggi X; il lungo cavo che la collega al resto della macchina consente di posizionarla agevolmente di fronte all'oggetto da esaminare, come si dirà nel cap. 2. Parallelamente

al cavo corrono i due tubi di circolazione del liquido di raffreddamento, provenienti dal circuito posto nella parte bassa del carrello. Nella parte superiore si trova invece il pannello di controllo, che consente d'impostare i parametri di irraggiamento (tensione, corrente, durata) e di dare inizio all'irraggiamento, il cui arresto avviene automaticamente alla fine della durata impostata, o può essere dato manualmente in caso di necessità. Questo pannello, mediante un altro cavo, deve essere collocato distante dalla macchina, in un luogo che consenta all'operatore di agire al riparo dalle radiazioni.

Del sistema fa parte un lampeggiatore che entra in funzione durante l'emissione dei raggi X, e deve essere posto in maniera ben visibile dagli accessi alla zona di irraggiamento. Quest'ultima deve essere accuratamente ispezionata prima dell'inizio per assicurarsi che non vi siano persone, e sorvegliata durante l'irraggiamento per evitare che qualcuno vi si introduca inavvertitamente.

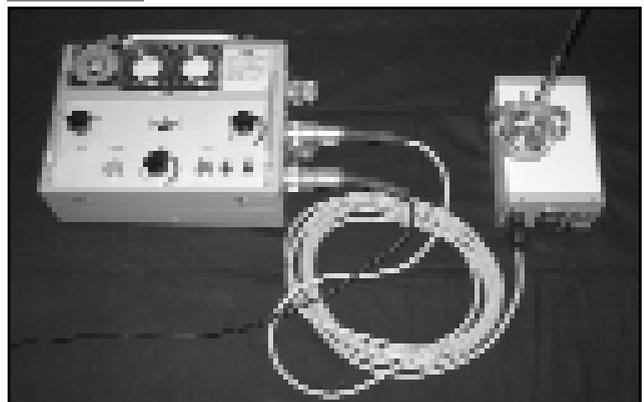
Il sistema di figura 8 consente di raggiungere una tensione massima di 80 kV con una corrente massima di 4 mA; in queste condizioni non è necessario un circuito esterno di raffreddamento. La macchina è composta dalla cuffia, dal pannello di controllo e dal lampeggiatore, le cui funzioni sono del tutto identiche a quelle dette sopra. Nell'uso di queste apparecchiature, in modo particolare nelle applicazioni presso musei, laboratori di restauro, chiese ecc., particolare cura deve essere dedicata per evitare l'irraggiamento accidentale degli operatori e della popolazione. Nel cap. 5 saranno brevemente descritte le procedure di sicurezza da adottare e le disposizioni di legge vigenti in materia.

Figura 7



Generatori trasportabili di raggi X

Figura 8



1.6 Sorgenti radioattive

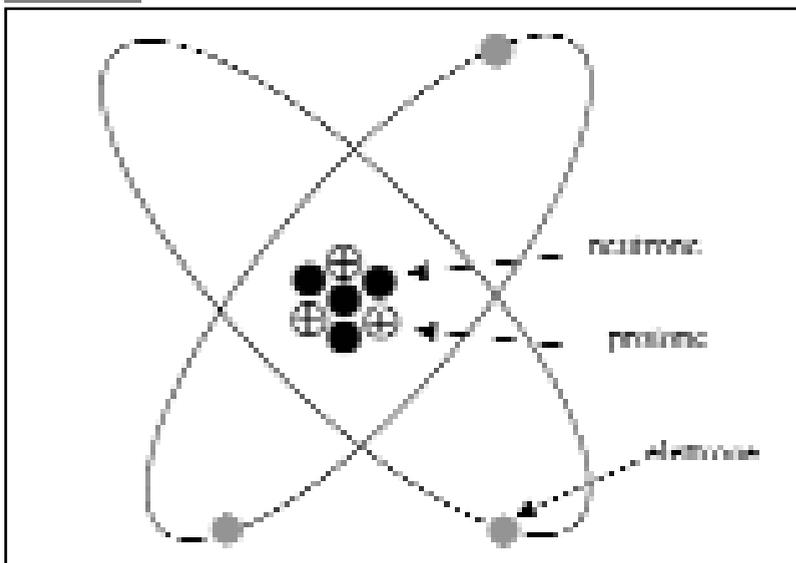
Per descrivere una sorgente radioattiva occorre ricordare la struttura dell'atomo. Se si considera il modello di Bohr, si può rappresentarlo con un nucleo centrale intorno al quale ruotano un numero Z di elettroni, che determina tutte le caratteristiche chimiche dell'atomo stesso. Se ad esempio si tratta, per semplicità, di litio, la sua struttura è come quella riportata in figura 9 (a parte il rapporto tra le dimensioni del nucleo e quelle delle orbite degli elettroni).

Il nucleo, come si vede dalla figura, ha una sua struttura interna: è costituito infatti da *protoni* e *neutroni*, che come gli *elettroni* appartengono alla famiglia delle *particelle elementari*, cioè alla serie di mattoni semplici con cui viene costruita tutta la materia dell'universo.

Protoni e neutroni, poiché coesistono nel nucleo, vengono chiamati *nucleoni*; essi hanno una massa quasi uguale tra loro e circa 1800 volte maggiore di quella dell'elettrone: ciò vuol dire, come è stato accennato in precedenza, che nel nucleo è concentrata la massa pressoché totale dell'atomo.

Mentre i neutroni sono elettricamente neutri, i protoni possiedono una carica positiva pari a quella degli elettroni, e poiché l'atomo nel suo complesso è elettricamente neutro, un atomo contenente Z elettroni deve anche contenere nel suo nucleo Z protoni. Il numero di neutroni (N) non è in rapporto costante con quello dei protoni, o per lo meno lo è solo per gli elementi più leggeri, per i quali generalmente³ $N=Z$; per gli

Figura 9



Rappresentazione di un atomo di litio secondo il modello di Bohr

³ Per il significato di questa espressione si veda quanto detto più avanti a proposito degli *isotopi*; in effetti quella riportata in figura 9 è una delle due possibili configurazioni del nucleo di litio.

altri è sempre $N > Z$ (figura 10), e la ragione di ciò è dovuta alle forze che si esercitano tra i diversi nucleoni. Tra protone e neutrone, tra neutrone e neutrone e tra protone e protone si esercitano intense forze nucleari attrattive che hanno un corto raggio di azione e che hanno la funzione di tenere insieme il nucleo. Tra protone e protone si esercita inoltre una forza che tende ad allontanarli, dovuta alla repulsione tra cariche elettriche dello stesso segno. Quando le dimensioni del nucleo aumentano diventano più importanti le forze di repulsione tra i protoni, che sono a più lungo raggio di azione, ed è quindi necessario un numero maggiore di neutroni per compensarle.

Gli atomi che si trovano in natura sono solo quelli riportati nella figura 10, dalla quale si deduce anche che per molti elementi esistono diverse configurazioni stabili cui corrispondono differenti valori di N . Questi elementi, per i quali naturalmente Z è costante, si dicono *isotopi*, perché occupano lo stesso posto nella tavola periodica degli elementi, ed hanno quindi caratteristiche chimiche esattamente identiche. Per essi varia solo il *numero di massa* $A = Z + N$. Così per esempio per l'ossigeno ($Z = 8$) esistono in natura tre isotopi stabili con $A = 16, 17, 18$ che normalmente vengono indicati scrivendo A in alto a destra del simbolo⁴: O^{16} , O^{17} , O^{18} , mentre per altri esiste un solo isotopo stabile, come nel caso dell'alluminio, per il quale si ha solo Al^{27} . Gli isotopi di un elemento qualsiasi si trovano in natura in rapporti costanti tra loro, così ad esempio O^{16} costituisce il 99,762 %, O^{17} lo 0,038% e O^{18} lo 0,0200% ovunque lo si misuri.

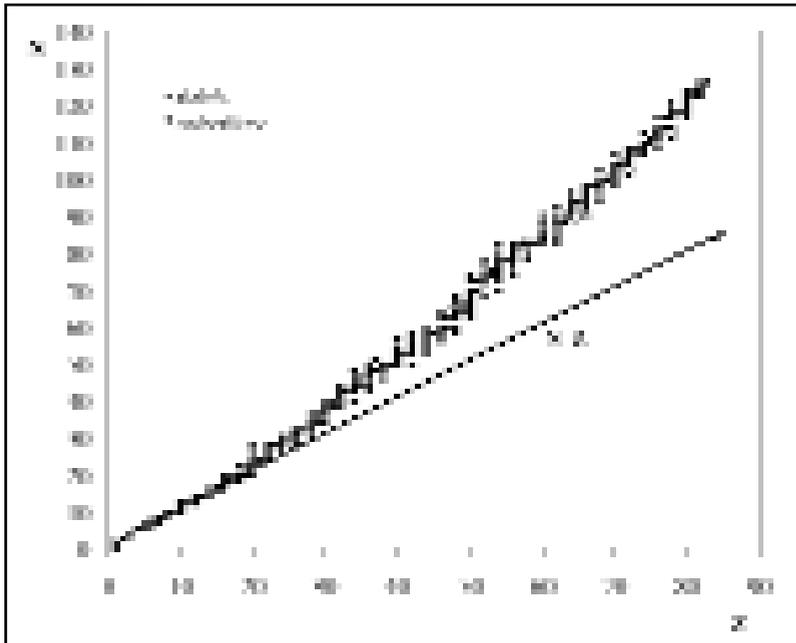
Infine per gli elementi con $Z > 83$, cioè quelli che seguono il bismuto nella tavola periodica, non esistono isotopi stabili [Evans 1955], ma si trasformano tutti in isotopi stabili del piombo e del bismuto in tempi molto lunghi, e vengono detti *naturalmente radioattivi*; sui tempi necessari per queste trasformazioni si dirà più avanti. La radioattività può anche essere indotta artificialmente: se si prende infatti un campione di un elemento stabile e lo si sottopone, per esempio, ad un bombardamento di neutroni all'interno di un reattore nucleare, alcuni nuclei degli atomi di cui è composto assorbendo un neutrone vengono ad averne uno in eccesso, e quindi si trovano fuori della curva della figura 10, vengono cioè trasformati in isotopi non esistenti in natura, quindi instabili.

Questi isotopi tendono a riacquistare più o meno velocemente una delle configurazioni stabili riportate nella figura 10, attraverso una trasformazione o *decadimento radioattivo*, che può avvenire con tre modalità diverse a seconda del nucleo coinvolto:

- *decadimento α* , che avviene con l'emissione di una particella α costituita da due protoni e due neutroni, quindi una particella dotata di carica elettrica positiva;
- *decadimento β* , cioè l'emissione di un elettrone;
- *decadimento γ* , cioè l'emissione di radiazione elettromagnetica, di cui parleremo diffusamente più avanti.

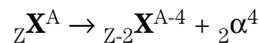
⁴ Una notazione completa prevede anche la scrittura del numero atomico Z in basso a sinistra, così ad esempio avremo ${}_8O^{16}$ e ${}_{13}Al^{27}$, anche se questa scrittura sembra ridondante essendo Z già implicitamente indicato nel simbolo.

Figura 10



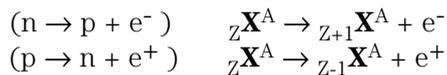
Relazione tra N e Z per i nuclei naturali (dati tratti da Walker)

Il decadimento α si può schematizzare, facendo riferimento alla simbologia nella nota 4, come



da cui si vede che il nucleo finale si colloca indietro di due posizioni nella tavola periodica degli elementi: è diventato cioè un nucleo diverso da quello di partenza.

Il decadimento β corrisponde alla trasformazione di un neutrone in un protone più un elettrone, oppure di un protone in un neutrone più un elettrone positivo⁵ secondo lo schema:

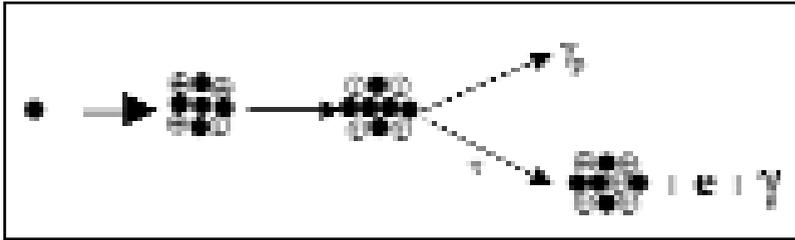


In queste disintegrazioni il nucleo prodotto è spostato di un posto in avanti o indietro, rispetto a quello iniziale, nella tavola degli elementi.

L'intero processo legato invece all'assorbimento di un neutrone può essere rappresentato come in figura 11. In questo caso si tratta di un nucleo di Be^9 , stabile, che assorbe un neutrone e diviene Be^{10} , instabile che emette immediatamente un raggio γ_p , detto γ pronto, e poi in un tempo medio τ decade in B^{10} più un elettrone e un nuovo raggio γ , detto *di decadimento*.

⁵ Non se ne è fatto cenno in precedenza, ma fra le particelle elementari esistono anche gli elettroni carichi positivamente, che però interagiscono rapidamente con quelli negativi annullandosi a vicenda.

Figura 11



**Rappresentazione
del decadimento
indotto
dall'assorbimento
di un neutrone
da parte del Be⁹**

Se si considera una certa quantità di un materiale radioattivo, di tipo sia naturale sia artificiale, e si indica con \mathbf{N} il numero di nuclei presenti, poiché si tratta di elementi instabili che si trasformano, \mathbf{N} decresce nel tempo, e sperimentalmente si verifica che varia con la *legge di decadimento* seguente

$$\mathbf{N}(t) = \mathbf{N}_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

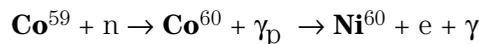
dove \mathbf{N}_0 è il numero presente all'inizio ($t=0$), e τ è una costante, che prende il nome di *vita media*, ed è caratteristica dell'elemento considerato, indipendentemente dalle condizioni fisiche in cui l'elemento si trova (stato di aggregazione, composto chimico di cui fa parte ecc.), ed $e = 2,718$ è una costante matematica⁶.

La vita media τ rappresenta il tempo che occorre attendere perché la quantità iniziale di nuclei radioattivi si riduca di un fattore e , cioè $\mathbf{N}(t) = \mathbf{N}_0/2,718$. Nell'uso pratico invece della vita media si usa il *tempo di dimezzamento* \mathbf{T} inteso come il tempo che bisogna attendere perché la quantità iniziale si dimezzi; è facile dimostrare che

$$\mathbf{T} = \tau \cdot 0,693$$

Nella figura 12 è riportato un grafico che illustra la legge di decadimento, cioè la variazione nel tempo del numero di nuclei radioattivi, e la relazione tra τ e \mathbf{T} . Come si vede dalla figura, inizialmente il decadimento è molto rapido e poi si attenua gradualmente: l'annullamento totale si ottiene solo dopo un tempo infinito.

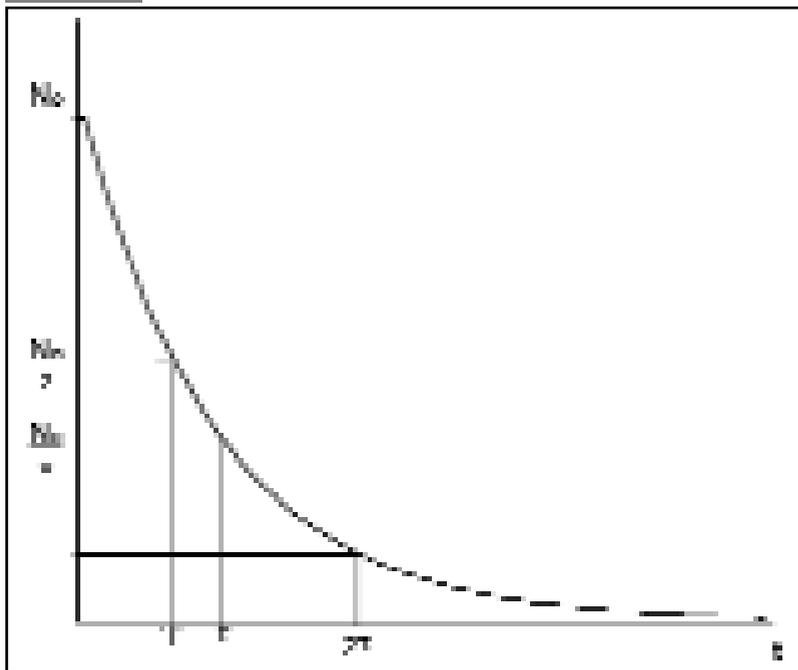
Si prenda come esempio di radioattività artificiale quella indotta nel cobalto ($Z=27$), che ha un solo isotopo stabile ($A=59$): l'irraggiamento con neutroni e il successivo decadimento possono essere scritti semplicemente come



Il decadimento porta alla trasmutazione del Co^{60} in Ni^{60} ed è caratterizzato da un tempo di dimezzamento $\mathbf{T} = 5,25$ anni.

⁶ È il *numero di Nepero*, cioè il numero dato dal limite della successione $(1+1/n)^n$, per n che tende all'infinito.

Figura 12



Curva di decadimento di una sostanza radioattiva

I tempi di dimezzamento dei vari nuclei radioattivi possono variare su uno spettro di valori molto ampio, dalla frazione di secondo fino alle centinaia di anni. Ovviamente i valori relativi agli isotopi naturalmente radioattivi, cioè quelli con $Z > 83$, sono enormemente più alti e dell'ordine delle decine di miliardi di anni. Fa eccezione solo il C^{14} che ha una vita media di 5730 anni, e si trova solo perché viene continuamente prodotto nell'alta atmosfera dai raggi cosmici; viene utilizzato per la datazione di materiali organici.

Come unità di misura dell'attività è stato scelto storicamente il Curie (**Ci**) che equivale al numero di disintegrazioni al secondo che avviene in un grammo di radio, elemento con simbolo Ra e $Z=88$, quindi naturalmente radioattivo con $T = 2220$ anni.

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ dis/sec}$$

Il Curie rappresenta una attività molto grande; attualmente nel Sistema Internazionale viene raccomandato l'uso del Becquerel

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dis/sec}$$

per cui

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Nello schema della figura 11, non solo τ , ma anche γ_p e γ sono legati al nucleo che

ha assorbito un neutrone, nel senso che nuclei di elementi e di isotopi diversi emettono γ_p e γ con energie diverse: questa circostanza viene utilizzata per l'analisi della composizione elementare di un materiale. Nel par. 4.5 si vedrà come, irraggiando una struttura con neutroni emessi da una sorgente e analizzando i γ_p emessi dalla struttura stessa, si possono ottenere informazioni sulla sua struttura e composizione. La caratteristica dei γ di decadimento viene invece impiegata nella tecnica di analisi per attivazione neutronica (NAA), nella quale un campione prelevato dal materiale di composizione ignota viene irraggiato in un reattore nucleare e reso radioattivo. Dall'analisi dei γ di decadimento si riesce a determinare le concentrazioni dei vari elementi presenti. Questo tipo di tecnica è molto sensibile, ed è largamente impiegato per lo studio di quegli elementi che si trovano in piccolissime quantità in un materiale (*elementi in tracce*) e che sono caratteristici della provenienza delle materie prime da una ben definita area geografica, o di una particolare tecnologia di produzione [Ferretti 1993].

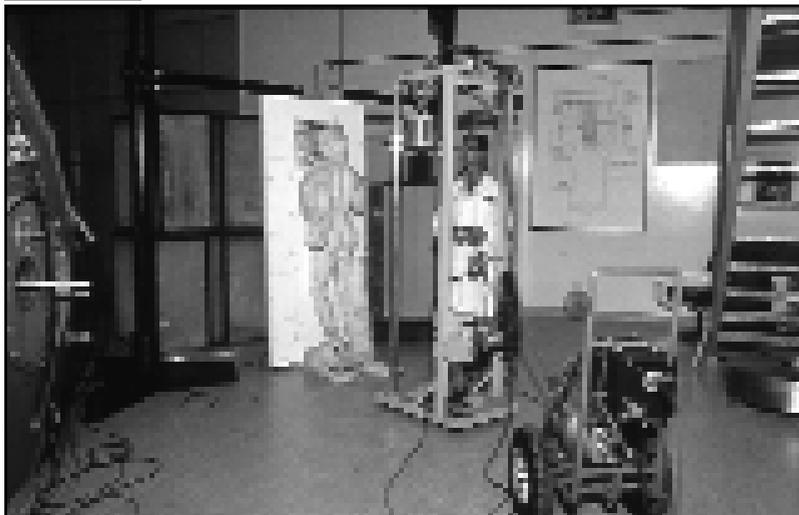
Per quanto riguarda l'impiego di sorgenti radioattive per l'esecuzione di gammagrafie, occorre tenere conto della necessità di avere raggi γ di energia relativamente elevata e di tempi di dimezzamento non troppo brevi, in modo che le sorgenti stesse non decadano troppo rapidamente. Quest'ultima condizione è imposta sia dal loro costo di acquisto sia dalle procedure necessarie per ottenere le autorizzazioni previste dalla legge per poterle utilizzare, soprattutto in campo, come si dirà nel cap. 5. In definitiva la scelta si riduce a pochissimi isotopi radioattivi: nella tabella 1 sono riportate le caratteristiche delle sorgenti più comunemente usate per le gammagrafie. Come si deduce facilmente dalla tabella, l'intensità di una sorgente di Co^{60} , che emette i raggi γ di energia maggiore, dopo circa venti anni si è ridotta quasi di un ordine di grandezza, diventando praticamente inutilizzabile per gli scopi cui era destinata; la cosa è ancora più problematica per Ir^{192} e Yb^{169} , che lo diventano nel giro di uno e due anni.

Nella figura 13 è mostrata una sorgente trasportabile di Co^{60} nella fase di preparazione dell'esecuzione di radiografie su una statua di marmo. La sorgente vera e propria è contenuta all'interno del cilindro montato sul carrello per il trasporto, costituito di U^{238} , che ha lo scopo di schermare l'ambiente circostante dai raggi γ emessi, ed è fissata all'estremità di un filo di acciaio. Su quest'ultimo agisce un mo-

Tabella 1 – Caratteristiche delle principali sorgenti radioattive

Elemento	Isotopo	T	Energia
Cobalto	Co^{60}	5,3 anni	1,17-1,33 MeV
Cesio	Cs^{137}	30 anni	660 keV
Iridio	Ir^{192}	74 giorni	316-468 keV
Itterbio	Yb^{169}	31 giorni	131-307 keV

Figura 13



Sorgente di Co^{60} durante la preparazione per l'esecuzione di radiografie su una statua di marmo

tore elettrico che fa scorrere la sorgente lungo un tubo guida, inserito all'altra estremità in un collimatore che va posizionato, con le modalità di cui si parlerà nel cap. 2, di fronte all'oggetto da irraggiare. Il suo scopo è quello di consentire l'emissione dei raggi X all'interno di un cono di circa 60° , il cui asse è diretto verso l'oggetto, e di schermare tutto il resto.

Il sistema è dotato di un pannello di controllo, che non compare in figura, e che deve essere posizionato, come per le macchine radiogene, al di fuori della zona interessata dalle radiazioni. Su questo è possibile impostare la durata dell'irraggiamento e comandare l'uscita della sorgente dallo schermo-contenitore, il cui rientro avviene automaticamente alla fine della durata impostata, ma può essere anche comandato manualmente in caso di necessità. Durante gli spostamenti della sorgente viene visualizzata istante per istante la sua posizione e segnalato il raggiungimento del collimatore al termine della fase di uscita, e dello schermo-contenitore al termine di quella di rientro. Il sistema è dotato di un certo numero di dispositivi di sicurezza per evitare la fuoriuscita e quindi l'irraggiamento accidentale di persone. La sequenza di operazioni da effettuare, legata al tipo di macchina in oggetto, ma che può essere trasposta, con piccoli cambiamenti, ad ogni altro tipo, è la seguente:

- posizionamento del collimatore nella posizione voluta, mediante opportuno supporto;
- posizionamento del carrello della sorgente vicino al collimatore e del pannello di controllo in zona di sicurezza, dopo averne tolta la chiave di accensione;
- inserimento del tubo guida nel collimatore e nello schermo-contenitore mediante una seconda chiave;

- apertura manuale dell'otturatore meccanico che chiude l'innesto del tubo e impedisce l'uscita della sorgente;
- controllo accurato che la zona di irraggiamento sia sgombra di persone e che gli accessi siano sbarrati;
- inserimento della chiave di accensione nel pannello di controllo;
- impostazione della durata dell'irraggiamento;
- comando di uscita della sorgente e verifica, sul display che indica la sua posizione, che sia effettivamente arrivata nel collimatore.

Durante l'irraggiamento è necessario controllare che nessun estraneo acceda alla zona interessata, e in caso di necessità va attuato il rientro manuale della sorgente.

Al termine dell'irraggiamento occorre assicurarsi che la sorgente sia effettivamente rientrata nello schermo-contenitore e che la spia dell'otturatore meccanico indichi la sua chiusura.

Il sistema è infine dotato di un ulteriore dispositivo di sicurezza che consente, in caso di mancanza di energia elettrica o di guasto al motore o ai circuiti che lo controllano, di far rientrare comunque la sorgente. Il filo di acciaio su cui essa è montata ha infatti un prolungamento afferrando il quale si tira manualmente indietro la sorgente; ovviamente l'estremità di questo prolungamento deve trovarsi in una posizione raggiungibile senza pericolo quando la sorgente è estratta.

L'uso di sorgenti di questo tipo, vista l'energia e l'intensità dei raggi γ emessi, può diventare molto pericoloso, soprattutto in applicazioni presso musei, laboratori di restauro ecc., se non vengono adottate tutte le precauzioni necessarie nella scelta del luogo in cui effettuare gli irraggiamenti e di quello in cui posizionare il pannello di controllo.

Particolare cura deve essere posta inoltre per evitare che persone estranee possano inavvertitamente introdursi nella zona di pericolo. Nel cap. 5 sono brevemente descritte le procedure di sicurezza da adottare e le disposizioni di legge vigenti in materia.

2. Radiografia e Gammagrafia

La radiografia e la gammagrafia si differenziano solo per il modo con cui viene generata la radiazione utilizzata per esaminare gli oggetti: nel seguito quindi, per semplicità di linguaggio, con il termine radiografia si intenderanno entrambe le tecniche, data la loro sostanziale unicità.

2.1 Interazione dei raggi X e γ con la materia

Non è questa la sede per un esame completo e rigoroso dei processi di interazione della radiazione elettromagnetica con la materia. Ai fini delle applicazioni in radiografia è sufficiente ricordare che i processi che ci interessano possono essere riassunti in due tipi:

a – *assorbimento*: il fotone cede tutta la sua energia ad un elettrone di un atomo e scompare; questo tipo di interazione è prevalente quando l'energia del fotone è bassa;

b – *diffusione*: il fotone cede una parte della sua energia all'atomo che incontra e nell'interazione viene deviato, cioè cambia la sua direzione di moto; questa interazione è tanto più frequente quanto maggiore è l'energia del fotone.

Come vedremo in seguito questi due tipi di interazione hanno effetti diversi nelle applicazioni radiografiche. A seguito di questi processi, se si invia un fascio di radiazioni elettromagnetiche su un qualsiasi oggetto, la loro intensità viene attenuata dall'oggetto stesso in funzione del materiale di cui è composto, in particolare della sua densità e dello spessore attraversato, secondo la legge:

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

dove I_0 è l'intensità della radiazione incidente, I quella della radiazione trasmessa, μ è il coefficiente di assorbimento, espresso in cm^{-1} , che dipende dalla composizione e quindi dalla densità del materiale, e riassume in sé tutte le caratteristiche del materiale stesso, x è lo spessore attraversato, espresso in cm. Il coefficiente di assorbimento non ha un valore costante, ma varia secondo l'energia della radiazione incidente: in letteratura si trova tabulato in funzione dell'energia per tutti gli elementi chimici [McMaster] e può essere calcolato per qualsiasi materiale, attraverso le concentrazioni dei singoli elementi contenuti e la densità del materiale stesso [Accardo].

2.2 Esecuzione delle radiografie

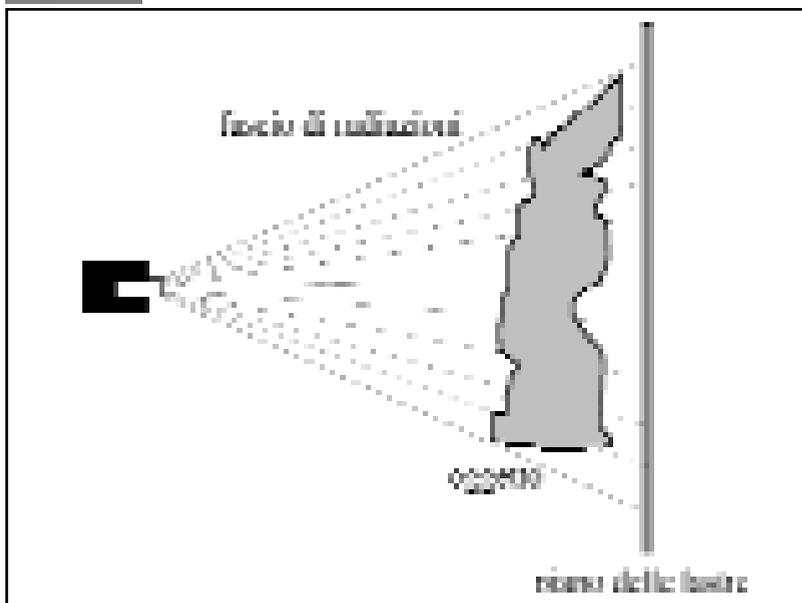
Quando un oggetto viene posto davanti a una sorgente di radiazioni, nella parte ad essa opposta, cioè nella zona d'ombra, il fascio di tali radiazioni attenuato può essere rilevato mediante registrazione su materiale sensibile (figura 14).

Il fascio proietta sulla lastra radiografica l'ombra dell'oggetto, producendovi l'immagine della sua struttura interna. L'attenuazione della radiazione infatti è maggiore nelle parti in cui incontra materiali più assorbenti, cioè nelle parti *più radiopache*, determinando in corrispondenza zone più chiare sulla lastra radiografica. In questo modo vengono evidenziati sulla lastra anche quei particolari che non possono essere rivelati da un'osservazione superficiale.

I raggi X o γ che incidono sulla lastra, per la maggior parte, la attraversano senza interagire con essa: la loro probabilità di interazione è cioè molto bassa. Questo appare abbastanza chiaro se si considera che la loro energia ha consentito loro di attraversare l'intero oggetto sotto osservazione, generalmente dotato di uno spessore e una densità ben maggiori di quelli della lastra.

Per avere un'immagine sufficientemente nitida occorre che su quest'ultima arrivi la quantità di radiazione richiesta dal tipo di lastra che si sta utilizzando, come si vedrà nel cap. 3, analogamente a quanto avviene per una normale fotografia. Quindi devono essere accuratamente scelti l'energia e l'intensità della radiazione incidente e il tempo di esposizione, secondo le caratteristiche dell'oggetto da esaminare e degli spessori.

Figura 14



Schema di
esecuzione di una
radiografia

L'aspetto cruciale è la scelta dell'energia, tenendo conto della necessità che quest'ultima sia tale da consentire alla radiazione stessa di attraversare l'oggetto e formare l'immagine sulla lastra, e tenendo conto anche di effetti indesiderati che l'aumento dell'energia comporta e che verranno chiariti nel seguito.

Ricordando quanto detto nel cap. 1, nel caso si utilizzi un generatore di raggi X la scelta dell'energia e dell'intensità può essere fatta con continuità, almeno entro i limiti imposti dal tipo impiegato, semplicemente agendo sul pannello di controllo. Nel caso invece di sorgenti radioattive le scelte possibili, come abbiamo visto, sono molto più limitate.

2.3 Scelta dell'energia della radiazione

Nella tabella 2 vengono riportati i coefficienti di assorbimento μ , espressi in cm^{-1} , a diverse energie (esprese in keV) per alcuni materiali: terracotta, gesso, malta, ferro, rame e piombo [Bellia]⁷.

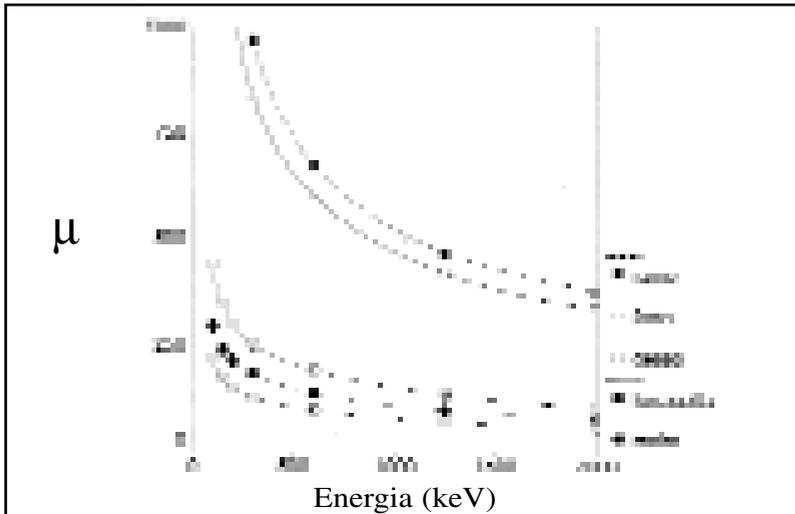
Per quanto concerne le energie prese in considerazione nella tabella, si ricorda che valori fino a 200 keV possono essere ottenuti con tubi radiogeni, mentre energie superiori, fino a 1250 keV, sono ottenibili mediante l'impiego di isotopi radioattivi. Energie di 2000 keV infine possono essere ottenute solo con macchine acceleratrici. Come si può dedurre dalla tabella 2, i coefficienti di assorbimento sono abbastanza diversi da consentire di distinguere tra loro i diversi materiali. I dati sono stati posti in grafico nella figura 15: in questo caso è stato escluso il piombo poiché i suoi co-

**Tabella 2 - Coefficienti di assorbimento μ [cm^{-1}]
della radiazione elettromagnetica al variare dell'energia**

Energia keV	Malta	Terracotta	Gesso	Ferro	Rame	Piombo
100	0,218	0,296	0,443	2,707	3,826	59,880
150	0,171	0,239	0,345	1,440	1,846	20,870
200	0,151	0,214	0,301	1,086	1,317	10,160
300	0,129	0,183	0,250	0,834	0,968	4,037
600	0,097	0,137	0,190	0,600	0,673	1,293
1250	0,068	0,097	0,134	0,418	0,467	0,645
2000	0,054	0,076	0,104	0,334	0,375	0,518

⁷ Per la ceramica è stata assunta la seguente composizione SiO_2 62,82%, Al_2O_3 18,31%, Fe_2O_3 6,33%, CaO 5,62%, K_2O 3,16%, MgO 2,82%, Na_2O 1,48%. Per la malta è stata considerata la composizione della malta di calce (40%) e sabbia (60%). Sono stati utilizzati i dati dei singoli elementi riportati in letteratura [McMaster].

Figura 15



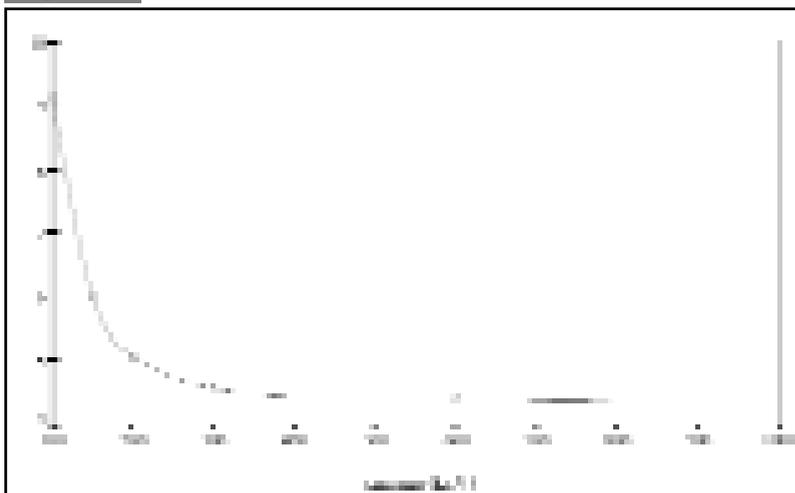
Coefficienti di assorbimento in funzione dell'energia per diversi materiali

efficienti, sensibilmente maggiori rispetto a quelli degli altri materiali, non avrebbero permesso di visualizzare differenze significative tra questi ultimi.

Come si vede nella figura, all'aumentare dell'energia le differenze tra i vari materiali tendono a diminuire, in particolare tali differenze sono molto meno marcate tra malta, gesso e terracotta da un lato e ferro e rame dall'altro. Sono state considerate le energie di 300 keV, 600 keV, e 1250 keV perché sono prossime alle energie dei raggi γ emesse rispettivamente dalle sorgenti di Ir^{192} , Cs^{137} e Co^{60} .

Nella figura 16 viene evidenziata, a titolo di esempio, la variazione del rapporto tra i coefficienti di assorbimento del ferro e della ceramica con l'energia. Si nota ad esem-

Figura 16



Andamento del rapporto tra i coefficienti di assorbimento della ceramica e del ferro

pio che a 100 keV tale rapporto è pari circa a 9, cioè per produrre nell'immagine radiografica lo stesso livello di grigio gli spessori della ceramica devono essere pari a nove volte quelli di eventuali perni in ferro. All'aumentare dell'energia questo rapporto diminuisce rapidamente per cui per energie superiori a 300 keV gli spessori della ceramica devono essere solo quattro volte maggiori di eventuali perni in ferro per produrre lo stesso livello di grigio.

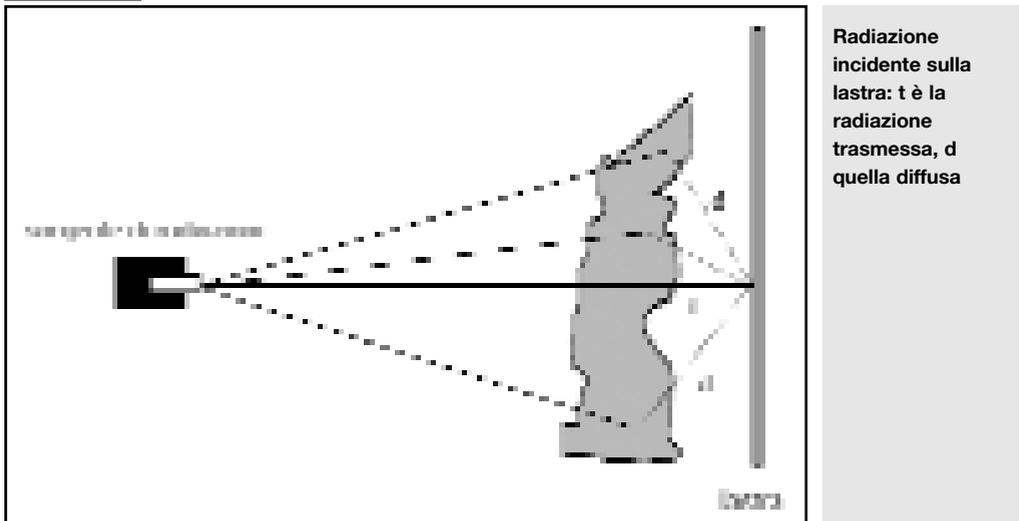
2.4 Contrasto radiologico o contrasto di assorbimento

È il rapporto fra le quantità di radiazione trasmesse da due aree adiacenti dello stesso oggetto. Chiaramente il contrasto radiologico è tanto maggiore quanto più bassa è l'energia delle radiazioni X o γ che vengono utilizzate per l'irraggiamento: infatti piccole variazioni di composizione nell'oggetto possono determinare sensibili differenze di assorbimento per le radiazioni di bassa energia. Quindi per avere immagini contrastate è preferibile usare radiazioni di bassa energia, compatibilmente con le caratteristiche, la composizione e le dimensioni dell'oggetto da radiografare.

2.5 Radiazione diffusa

Oltre alle considerazioni precedenti sulla scelta dell'energia della radiazione, occorre ricordare quanto abbiamo detto in precedenza a proposito dell'interazione della radiazione elettromagnetica con la materia. Per effetto dei due diversi tipi di processi coinvolti, come è mostrato dalla figura 17, la radiazione che arriva in una zona

Figura 17



**Radiazione
incidente sulla
lastra: t è la
radiazione
trasmessa, d
quella diffusa**

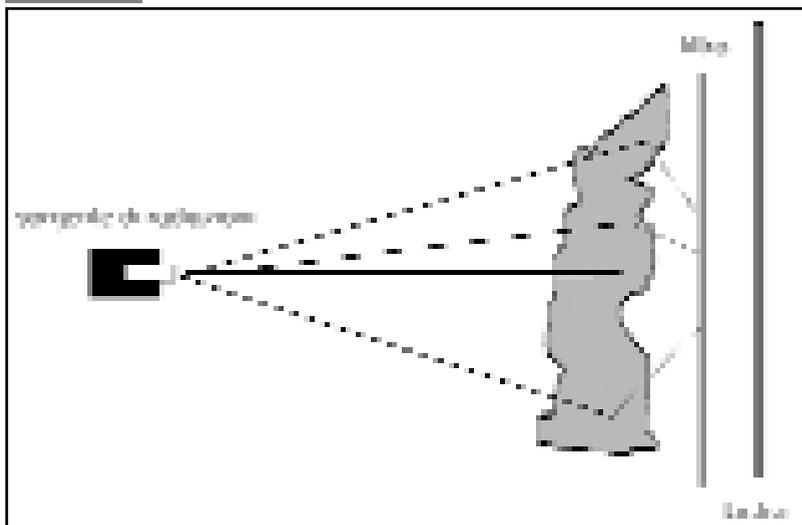
della lastra è dovuta in parte a quella trasmessa, cioè a quella che ha attraversato l'oggetto ed è stata attenuata dagli assorbimenti, che forma l'immagine reale dell'oggetto, e in parte a quella diffusa che determina la presenza di aloni e sfumature causando una perdita di definizione nei contorni dei vari particolari. Nella figura, per semplicità di disegno, è riportato quello che succede in un solo punto della lastra, lo stesso discorso vale naturalmente per tutti gli altri punti.

Questo effetto negativo è tanto più importante quanto maggiore è l'energia del fascio, ed è particolarmente significativo nel caso di impiego di sorgenti radioattive, cioè per le gammagrafie: l'immagine prodotta dai raggi γ , specie se confrontata con una radiografia a più bassa energia prodotta da raggi X, è generalmente di mediocre definizione e basso contrasto. Si confrontino a tale proposito, per esempio, le TAV. 27 e 25 nel cap. 6.

L'intensità della radiazione diffusa dipende inoltre dal tipo di materiale di cui l'oggetto è composto, ed è tanto maggiore quanto minore è il suo Z medio, cioè quanto più è leggero. Per esempio, a parità di energia l'intensità è maggiore per il marmo che non per il bronzo, quindi le immagini gammagrafiche di oggetti di bronzo presentano una definizione migliore che non quelle di oggetti di marmo.

Occorre però considerare che i singoli fotoni, come abbiamo detto in precedenza, quando vengono diffusi perdono parte della loro energia, quindi la radiazione diffusa è meno penetrante di quella trasmessa, e può essere ridotta proteggendo la lastra mediante filtri costituiti da sottilissimi fogli di piombo dello spessore di alcuni centesimi di millimetro (figura 18). In questo modo la definizione delle immagini può essere migliorata.

Figura 18



**Impiego di filtri
per schermare la
radiazione diffusa**

2.6 Criteri per la scelta dell'energia della radiazione

Sulla base di quanto fin qui detto, per la scelta dell'energia della radiazione più adatta per eseguire una radiografia occorre tenere presente che:

- sulla lastra deve giungere una quantità di radiazione sufficiente per avere una buona immagine, in funzione, come vedremo in seguito, del tipo di lastra da utilizzare; questo si può ottenere intervenendo sull'energia della radiazione, sulla sua intensità e/o sulla durata dell'irraggiamento;
- oggetti molto densi e assorbenti richiedono energie della radiazione più elevate rispetto a oggetti più "trasparenti";
- a parità di composizione oggetti più spessi richiedono energie più elevate o sorgenti più intense;
- aumentare l'energia della radiazione significa aumentare la diffusione e perdere in definizione dell'immagine;
- aumentare l'energia significa diminuire il contrasto radiologico, a scapito del contrasto sulla lastra.

Poiché alcuni dei fattori appena esposti sono in conflitto tra loro, sono necessarie scelte di compromesso, tenendo presente il criterio generale che l'energia dovrebbe essere la più bassa possibile compatibilmente con le caratteristiche dell'oggetto, l'intensità della sorgente e il tipo di lastra impiegato. Ovviamente la scelta è molto limitata nel caso delle gammografie, in modo particolare per quelle da eseguire in campo su oggetti che non possono essere trasportati in laboratori attrezzati. In questi ultimi è possibile infatti impiegare acceleratori di elettroni di potenza elevata, nei quali si può regolare l'energia agendo sull'alta tensione della macchina.

Se invece è necessario l'impiego di sorgenti radioattive, come succede per interventi in campo, la scelta è molto limitata perché i tipi di sorgente disponibili non sono molti (tabella 1), e per motivi di sicurezza non possono avere attività molto elevate. A titolo puramente indicativo nella tabella 3 vengono riportati gli intervalli di appli-

Tabella 3 – Intervalli di applicazione della tensione del generatore di raggi X

5-20 kV	20-40 kV	30-80 kV	80-250 kV	250-1500 kV
Disegni, stampe, pastelli, acquerelli, pergamene ⁸	Dipinti su tela, dipinti su tavola	Dipinti su tavola, statue lignee, vasi di ceramica, lamine metalliche	Piccoli bronzi, manufatti metallici, statue di terracotta	Bronzi di notevole spessore, manufatti lapidei

⁸ Nel caso di carte e pergamene l'irraggiamento va fatto in camera oscura, liberando la lastra dal cartoncino che la protegge dalla luce (cap. 3)

cazione della tensione del generatore normalmente impiegata su alcune tipologie di manufatti. L'ultimo intervallo, che riguarda bronzi di grandi dimensioni e statue di marmo, può essere sostituito da sorgenti γ .

2.7 Deformazione delle immagini radiografiche

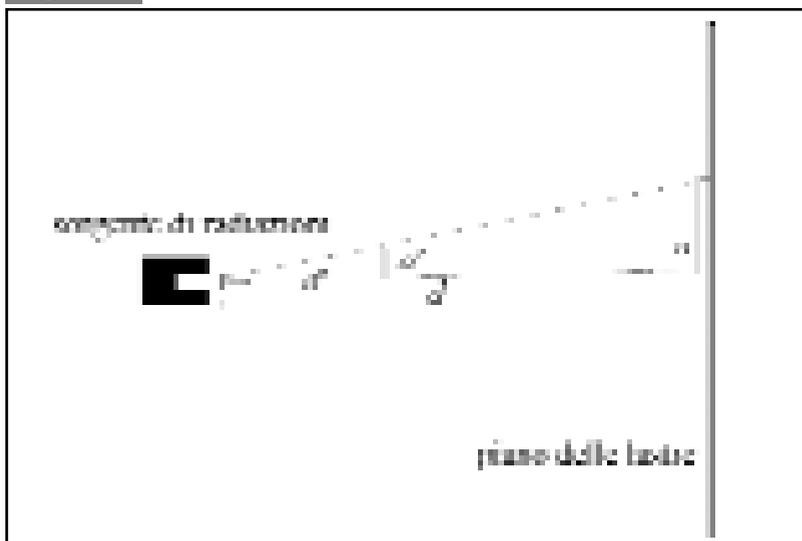
L'immagine radiografica corrisponde alla proiezione dell'oggetto osservato su un piano, illuminandolo con un fascio di radiazioni elettromagnetiche che non sono tra loro parallele ma divergenti, così come succede quando si proietta l'ombra di un oggetto su una parete utilizzando una sorgente puntiforme di luce.

La geometria e le distanze incidono pesantemente sulle dimensioni delle differenti parti dell'oggetto proiettate sul piano delle lastre, determinando in alcuni casi notevoli difficoltà nelle verifiche spaziali e nelle stime delle dimensioni effettive al variare delle posizioni di ciascun particolare. Come è visualizzato in figura 19, per un determinato particolare le dimensioni proiettate (a) risultano direttamente proporzionali, oltre alle dimensioni effettive (a') del particolare, alla distanza tra la sorgente e la lastra (d) e inversamente proporzionali alla distanza del particolare dalla sorgente (d'), secondo la seguente relazione:

$$a' = a \cdot \frac{d'}{d}$$

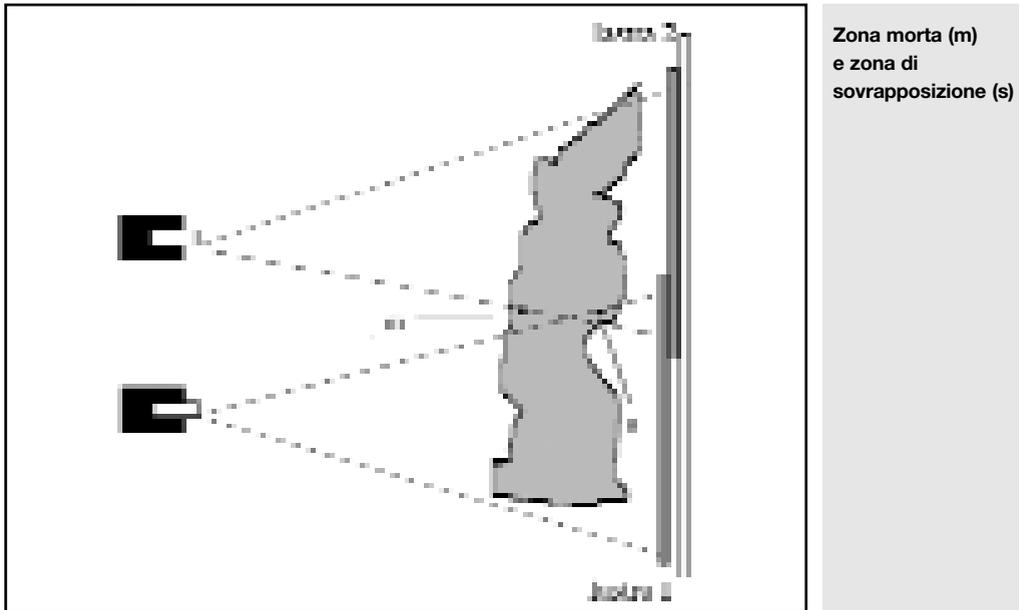
Affinché le dimensioni siano il più possibile prossime a quelle effettive, la lastra deve essere a contatto con il manufatto, per quanto ciò sia possibile nel caso di ogget-

Figura 19



Influenza delle distanze sulle dimensioni proiettate

Figura 20



ti di grandi dimensioni, aventi geometria complessa e parti aggettanti. La prossimità dell'oggetto al film, inoltre, migliora sensibilmente la definizione dell'immagine, come vedremo in seguito.

Nel caso di oggetti di grandi dimensioni occorre procedere eseguendo diversi irraggiamenti in corrispondenza delle diverse parti, a conclusione dei quali può essere utile a volte tentare una ricostruzione a mosaico dell'insieme.

Questo viene fatto correntemente nel caso di dipinti, ma nel caso di oggetti tridimensionali ricomporre il mosaico è spesso impresa impossibile, poiché l'immagine di ogni singolo particolare viene deformata in modo diverso secondo la sua posizione rispetto alla sorgente e alla lastra, ed alcuni particolari vengono addirittura perduti. Queste considerazioni sono illustrate nella figura 20, dalla quale si deduce che una parte dell'oggetto, indicata con *m*, non compare in nessuna delle due lastre, nonostante tra le due ci sia una zona di sovrapposizione, mentre un'altra parte (*s*) compare su entrambe, ma i particolari sono visti da angolazioni diverse (quindi le loro immagini sono deformate in modo differente e pertanto non sono sovrapponibili). Per ottenere angoli di proiezione adeguati a non deformare troppo le dimensioni dell'oggetto al variare della profondità e per non avere zone morte, la sorgente deve essere posta a distanza piuttosto elevata. Questo però comporta la scelta di sorgenti di attività elevata e di tempi di irraggiamento particolarmente lunghi⁹.

⁹ Infatti la quantità di radiazione che giunge sulla lastra dipende dalla distanza *d* dalla sorgente e varia come $1/d^2$ (cfr. par 3.4). Se per esempio con $d=1$ m l'intensità vale *I*, con $d=2$ m vale $I/4$, con $d=3$ m vale $I/9$ e così via; in corrispondenza si dovranno moltiplicare per 4 e per 9 rispettivamente i tempi di irraggiamento.

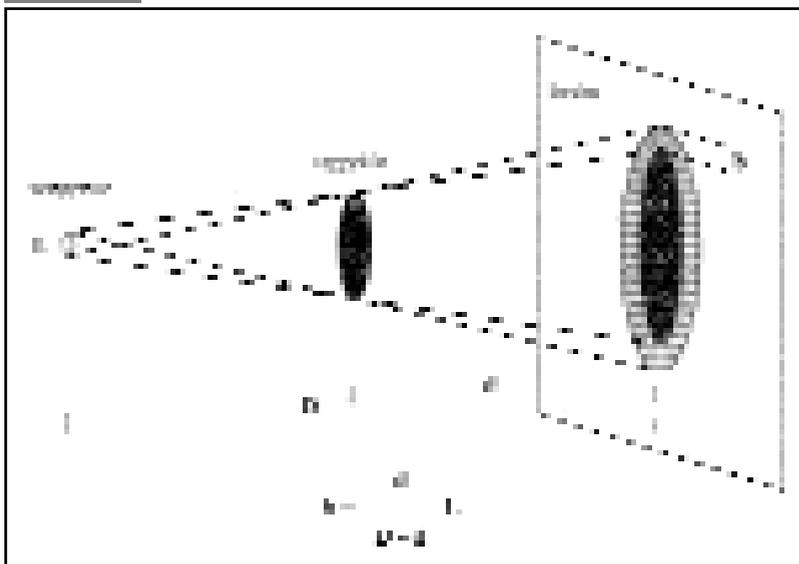
Per avere l'immagine dell'oggetto intero, è invece preferibile impiegare nello schema di figura 14 una singola lastra di grandi dimensioni, tali da coprire tutto l'oggetto, oppure diverse lastre di dimensioni più piccole fissate al piano di supporto a comporre un mosaico che copra tutta la proiezione dell'oggetto stesso. In questi casi la distanza sorgente-lastra deve essere determinata in modo che l'intero oggetto rientri nel cono di emissione delle radiazioni evidenziato nella figura 14, e viene eseguito un unico irraggiamento.

Benché ciò venga fatto in diverse applicazioni, è preferibile lavorare localmente sui particolari, scegliendo per ciascuna posa le energie, i tempi, l'orientamento e le distanze ottimali, rinunciando alla ricostruzione dell'insieme.

2.8 Condizioni geometriche

Da quanto appena detto risulta chiaro che le condizioni geometriche sorgente-oggetto-lastra dovrebbero essere tali da collocare la sorgente il più lontano possibile dall'oggetto e la lastra il più vicino possibile. In questo modo si riducono sia le deformazioni geometriche sia l'influenza delle dimensioni della *macchia focale* sulla indeterminazione dei contorni, di cui abbiamo detto a proposito dei generatori di raggi X (par. 1.2). Come si vede dalla figura 21 le dimensioni della zona indefinita b intorno ai contorni, detta *sfumatura geometrica* o *penombra*, a parità di dimensioni L della macchia focale, sono tanto più piccole quanto più grande è la distanza sorgente-lastra e quanto più piccola è quella oggetto-lastra. Lo stesso vale se si usa

Figura 21



**Sfumatura
geometrica in
funzione delle
distanze e delle
dimensioni della
sorgente**

una sorgente radioattiva: in questo caso la macchia focale del generatore è sostituita dalle dimensioni della sorgente.

Occorre però considerare che, aumentando la distanza tra sorgente e lastra, diminuisce fortemente la quantità di radiazione elettromagnetica che investe l'oggetto e la lastra, allungando molto i tempi di irraggiamento: questo vuol dire che in pratica si deve ricorrere a un compromesso tra immagine con deformazioni minime e contorni non sfumati e tempi di irraggiamento troppo lunghi.

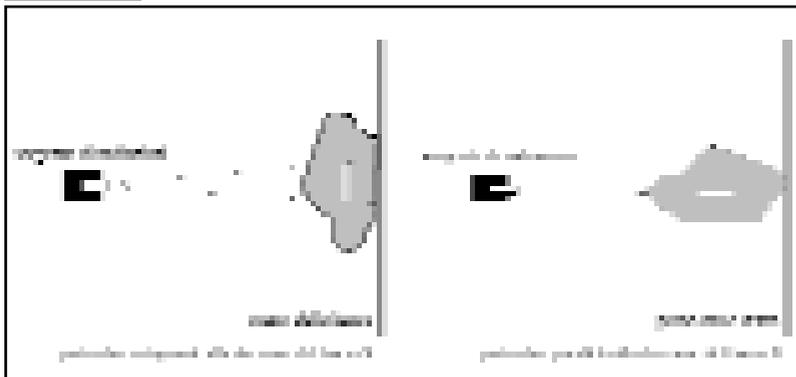
2.9 Localizzazione di particolari interni

Poiché l'immagine radiografica è la proiezione di oggetti tridimensionali su un piano, è difficile localizzare con precisione un qualsiasi particolare sotto la superficie dell'oggetto esaminato a partire dalla sua posizione sulla radiografia. Inoltre la sua forma può essere del tutto diversa a seconda del suo orientamento rispetto alla direzione sorgente-lastra: si pensi a tale proposito a come apparirebbe una moneta che venisse irraggiata in direzione parallela o ortogonale al suo asse. La figura 22 mostra le proiezioni di un difetto, o di un inserto, quando è visto da due angolazioni estreme.

A queste difficoltà si può in parte ovviare eseguendo, ove possibile, due irraggiamenti secondo due direzioni ortogonali tra loro e, se necessario, anche in direzioni intermedie: il confronto delle diverse immagini consente di localizzare i diversi particolari all'interno dell'oggetto e di definirne la forma reale.

Una tecnica di esecuzione di riprese secondo due direzioni incidenti permette, oltre che di localizzare tridimensionalmente i diversi punti, anche la loro possibile visualizzazione tridimensionale (*stereoradiografia*), che può avvenire anche dopo un'elaborazione al computer. Questa tecnica di presentazione dei dati è conosciuta da molto tempo ma non è stata quasi mai usata nella pratica perché macchinosa; at-

Figura 22



**Influenza della
orientazione di un
particolare
rispetto alla
direzione di
irraggiamento**

tualmente essa si può considerare sorpassata dalla tomografia, di cui parleremo più avanti, che, anche se più complessa e costosa, è in grado di fornire analisi di migliore qualità.

2.10 Radiografia di oggetti tridimensionali

In questo tipo di applicazioni generalmente la radiazione impiegata deve attraversare spessori relativamente grandi, quindi sono richieste energie piuttosto elevate che comportano, per quanto detto in precedenza, una diminuzione del contrasto radiologico e un aumento della radiazione diffusa. Confrontando immagini di oggetti con composizione simile, ma di spessori diversi, si nota pertanto una graduale perdita di definizione delle immagini stesse. Se poi si passa da materiali di densità elevata, quali il bronzo, a quelli di densità più bassa, quali il legno o il marmo, la perdita di definizione è ancora maggiore.

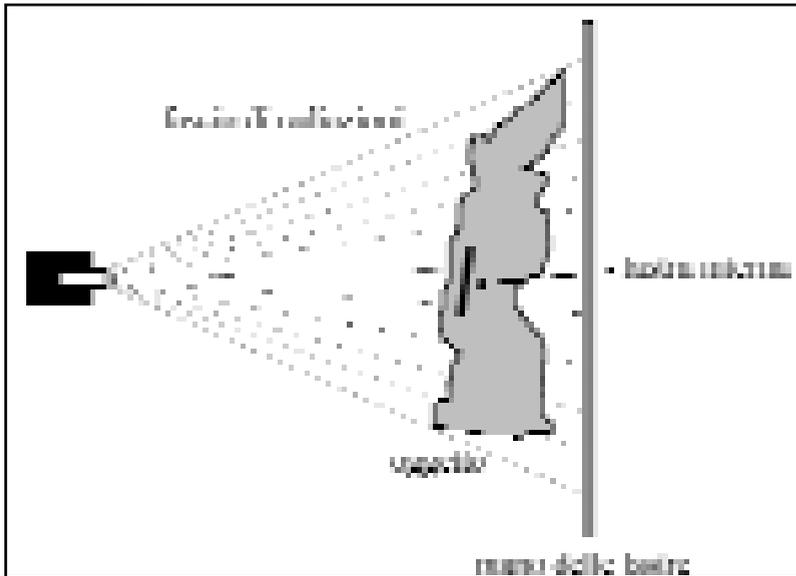
Per oggetti tridimensionali l'immagine dell'intera opera ottenuta con un unico irraggiamento, utilizzando una lastra di grandi dimensioni o un mosaico di lastre, come illustrato nella figura 20, riesce a dare una visione d'insieme della struttura interna, ma sfuggono i dettagli. Alcuni di questi, infatti, possono essere orientati in modo tale da non essere chiaramente rivelati con la direzione sorgente-lastra mostrata in figura; in tali circostanze, pertanto, è necessario effettuare più di un irraggiamento con angolazioni differenti. In alcuni casi, però, la configurazione che sarebbe la migliore per evidenziare un determinato dettaglio non è attuabile perché la presenza di elementi sporgenti impedisce di posizionare opportunamente sorgente e lastra; bisogna quindi adottare soluzioni di compromesso.

Nel caso di opere cave, come spesso avviene nei bronzi, soprattutto se di grandi dimensioni, la radiografia effettuata interponendo l'intero oggetto tra la pellicola e la sorgente, secondo lo schema della figura 14, mostra sovrapposti i particolari di tutte e due le pareti, e con maggiore definizione quelli della parete vicina alla lastra. Se le due superfici sono molto articolate, la lettura della radiografia può risultare difficile; in questi casi può essere conveniente assumere una geometria di irraggiamento differente da quella mostrata nella figura 14. Ciò è possibile se si può in qualche modo accedere all'interno dell'oggetto, ponendo la lastra a contatto di una parete sulla sua superficie interna e irraggiando ovviamente quest'ultima dall'esterno, come mostrato nella figura 23; tale accorgimento consente così di eliminare l'immagine della seconda parete.

Quest'operazione richiede l'impiego di lastre di dimensioni tali da poter essere introdotte all'interno dell'oggetto e in qualche caso è necessario addirittura sagomare opportunamente la lastra, ritagliandola in camera oscura prima dell'introduzione, in modo che possa aderire alla superficie interna aggirando eventuali particolari sporgenti verso l'interno.

Se si impiega una sorgente γ queste operazioni risultano agevolate dal fatto che le

Figura 23



Irraggiamento di una lastra all'interno di un'opera cava

dimensioni della sorgente stessa sono molto più piccole di quelle di un generatore di raggi X: in questo caso si può introdurre la sorgente all'interno dell'oggetto ponendo la lastra all'esterno, aderente alla parete che si vuole esaminare. Tale accorgimento, ad esempio, è stato utilizzato per esaminare la grossa riparazione sulla pancia della *Chimera di Arezzo*, introducendo all'interno la sorgente γ di Co^{60} attraverso la bocca (TAV. 30) [Massimi 1992], altrimenti l'esame di questo particolare sarebbe risultato inattuabile. Un assetto di irraggiamento tradizionale avrebbe infatti richiesto il posizionamento della lastra a contatto della pancia, sulla superficie esterna, e quello della sorgente dalla parte della groppa; l'immagine ottenuta secondo quest'ultima configurazione sarebbe però risultata confusa dalla sovrapposizione delle proiezioni della testa di capro e della coda di serpente all'immagine della riparazione sulla pancia.

Quanto detto però presuppone che si possa in qualche modo accedere all'interno, cosa non sempre possibile.

Se l'opera in esame è una scultura in marmo e si impiega radiazione di alta energia, occorre fare attenzione alla radiazione diffusa, di cui si è già parlato nel par. 2.5, dove abbiamo detto che vengono impiegati sottili schermi di piombo per attenuarla.

Succede spesso però di dover posizionare la lastra in modo che essa abbia di fronte, verso la sorgente, il particolare da esaminare e subito dietro, spesso quasi a contatto, un altro elemento della statua. La materia retrostante diffonde in tutte le direzioni, quindi anche verso la lastra, la radiazione che passa attraverso la lastra. Questa radiazione diffusa, ovviamente, non ha nulla a che fare con l'immagine del parti-

colare che si vuole ottenere e determina un alone sull'immagine stessa, con conseguente perdita di definizione: va quindi eliminata il più possibile ponendo sul retro della lastra schermi di piombo di spessore dell'ordine del millimetro.

Una situazione di questo tipo si è presentata più volte durante, ad esempio, l'esame della *Pietà* di Michelangelo del Museo dell'Opera del Duomo di Firenze [Moioli 2003]: trattandosi di un gruppo di quattro figure, la superficie e la struttura dell'opera erano particolarmente articolate, circostanza che da un lato ha richiesto in più posizioni l'impiego di schermi posteriori, e dall'altro alcune volte ha impedito di adottare la direzione di irraggiamento migliore per la visualizzazione dei perni usati per ricomporre le fratture.

Le immagini radiografiche di sculture o di oggetti tridimensionali forniscono informazioni sull'omogeneità/disomogeneità del materiale costitutivo di un'opera e sulla presenza di eventuali elementi o vuoti, al suo interno (TAV. 6).

In merito all'omogeneità/disomogeneità si possono evidenziare variazioni di spessore (TAV. 25) o grandi variazioni sia di composizione sia di densità, in particolare quelle dovute a cavità, inclusi (TAVV. 1 e 2), bolle o soffiature all'interno della fusione di manufatti metallici (TAVV. 22 e 23).

Se il manufatto non è costituito da un unico elemento strutturale è possibile individuare tutti gli elementi costitutivi, identificandone le modalità di assemblaggio (saldature, ribattini, viti, chiodi ecc.; TAVV. 23, 24, 27, 28, 29, 30, 33, 34).

Allo stesso modo possono essere visualizzate le particolarità tecniche di realizzazione: ad esempio tasselli o perni distanziatori nel caso di una statua bronzea. In un manufatto ceramico la presenza di bolle schiacciate e fortemente orientate denuncia una lavorazione al tornio (TAVV. 4 e 5), mentre una struttura a bande orizzontali dovute a variazioni di spessore indica l'impiego della tecnica del colombino o cercine, ossia dell'accrescimento mediante successiva aggiunta di cordoni di materiale (TAV. 3). Su questo tipo di manufatti sono facilmente leggibili anche i segni di lavorazione lasciati al suo interno da utensili quali stecche o spatole¹⁰ (TAVV. 6 e 7).

Il rilevamento di discontinuità strutturali consente di individuare eventuali fratture, fessurazioni, cricche, non sempre identificabili mediante un'attenta visione della superficie, o di valutare a pieno l'entità reale di tali disomogeneità nel caso in cui esse siano visibili o parzialmente ispezionabili direttamente dall'esterno.

L'immagine dei particolari interni di un manufatto mostra l'eventuale presenza di armature, strutture o elementi di sostegno (TAVV. 8-21), nonché di elementi di rinforzo o assemblaggio (perni, grappe, distanziatori ecc., TAV. 29), e consente di dedurre le modalità esecutive dell'assemblaggio stesso (alloggiamenti, presenza di materiale di riempimento tra perno e alloggiamento, canali di adduzione di una colata di piombo per bloccare il perno ecc., TAVV. 13, 14, 21, 29, 17).

Nel caso di statue lignee policrome, la presenza della preparazione e degli strati cro-

¹⁰ Per ulteriori approfondimenti in merito alla lettura dei segni di lavorazione nei manufatti ceramici dalle immagini radiografiche si rimanda alla bibliografia [Meduri].

matici rende la superficie più radiopaca della struttura interna, agevolando il riconoscimento dei volumi (TAV. 32).

Le immagini radiografiche di statue bronzee consentono di localizzare la presenza e l'accumulo di materiale di natura differente rispetto a quello delle colate con cui sono state realizzate, ad esempio di materiale di riempimento, come la terra di fusione, o di leghe metalliche usate in interventi di restauro antichi per bloccare pezzi disgiunti o fratturati.

Il fatto che le terre di fusione non siano state rimosse, o lo siano state solo parzialmente nei luoghi meno accessibili dalle aperture solitamente presenti in una statua (ad es. gli occhi o la pianta dei piedi), può compromettere una conservazione ottimale del manufatto. Esse possono infatti dar luogo, in presenza di umidità e sali, a pericolosi processi corrosivi: risulta quindi utile la loro localizzazione.

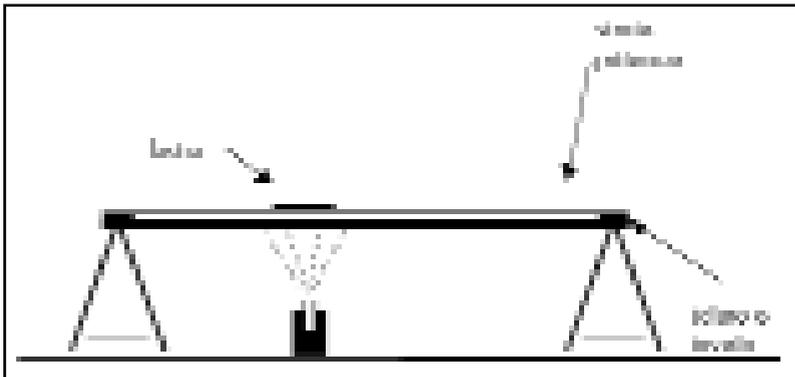
Allo stesso modo è importante, per verifiche strutturali e per il restauro, la conoscenza dell'esistenza o meno di colate interne per bloccare pezzi disassemblati, solitamente eseguite in leghe di stagno e piombo (il cosiddetto metallone), nonché la stima delle quote che raggiungono tali colate (TAV. 29).

Sempre facendo riferimento a materiale di apporto estraneo alle fasi originarie di realizzazione di un'opera, le immagini radiografiche consentono di visualizzare riempimenti, inserti, tamponature, stuccature, rifacimenti ecc.

2.11 Radiografia di dipinti

Per queste opere, se si intende utilizzare una serie di lastre per coprire l'intera superficie del dipinto, si può adottare una configurazione del tipo della figura 14, ma ruotata di 90°, con la sorgente sul pavimento e il dipinto posto su cavalletti in modo che la distanza sorgente-lastra sia dell'ordine di un metro. Quest'ultima è posta a contatto della superficie pittorica e quindi la direzione di irraggiamento sarà dal basso verso l'alto (figura 24).

Figura 24



Esecuzione della radiografia di un dipinto

Nella configurazione della figura 24, prima di effettuare gli irraggiamenti occorre sovrapporre allo strato pittorico una sorta di griglia, le cui maglie tengano conto delle dimensioni delle lastre; ciò consente di posizionare ciascuna lastra garantendo una sovrapposizione di qualche centimetro tra lastre contigue. Tale griglia deve essere realizzata con un sottile filo di cotone che, essendo trasparente alla radiazione, non lascia tracce sulle immagini radiografiche. La sequenza delle operazioni è la seguente: si posiziona una lastra su una maglia della griglia, si sposta la sorgente sul pavimento in corrispondenza del centro della lastra, si effettua l'irraggiamento, si toglie la lastra irraggiata e se ne pone una nuova sulla maglia seguente e così via fin quando tutta la superficie del dipinto è stata esaminata.

Nel caso di opere di dimensioni notevoli la ricostruzione del mosaico di lastre è più agevole se si identifica ciascuna di esse con un numero o una lettera, a seconda della posizione nella griglia utilizzata. Si può, per esempio, partire dall'angolo in alto a sinistra e procedere per righe successive fino a quello in basso a destra. La numerazione viene impressa applicando, prima dell'irraggiamento, dei piccoli caratteri in piombo sull'involucro esterno di ciascuna lastra dal lato rivolto verso la sorgente. Deve essere posta attenzione perché quest'identificazione vada a cadere nella zona di sovrapposizione con la lastra contigua, in modo che possa essere eliminata in fase di ricomposizione. I moderni programmi di elaborazione e trattamento delle immagini agevolano questa operazione, consentendo di attenuare o eliminare del tutto le disomogeneità nei livelli di grigio alla giunzione tra le varie riprese.

Nel caso di dipinti su tavola, quando si procede alla ricostruzione del mosaico sorgono difficoltà del tipo di quelle descritte al par. 2.7. Infatti solo lo strato pittorico si trova a contatto con le singole lastre ed è facilmente ricostruibile, mentre i particolari della struttura di supporto vengono progressivamente deformati in funzione della loro distanza dallo strato pittorico e dal centro della lastra. Ciò è più evidente per quei particolari che si trovano nelle zone di sovrapposizione di due lastre contigue, che vengono proiettati su ciascuna di esse in modo diverso perché visti da angolazioni diverse. Una situazione di questo tipo è rappresentata nella TAV. 43, in cui sono riportate le immagini di uno stesso chiodo su due lastre adiacenti: come si vede sia la forma che la posizione appaiono differenti.

L'unico modo per ovviare a questi problemi è quello di utilizzare un'unica lastra di dimensioni tali da coprire l'intero oggetto, oppure impiegare più lastre applicate su un opportuno supporto e adottare una configurazione del tipo di quella in figura 14. Il dipinto viene posto in posizione verticale e si assume una distanza tra sorgente e piano delle lastre tale che quest'ultimo rientri per intero nel cono di emissione della sorgente di radiazioni. Si effettua così un unico irraggiamento e vengono automaticamente aggirati tutti i problemi relativi alla ricomposizione del mosaico.

2.11.1 Supporto: dipinti su tela

La radiografia agevola sensibilmente lo studio delle caratteristiche della tela di supporto, soprattutto nei casi in cui essa non è direttamente visibile, perché non scoperta lungo i bordi del dipinto o all'interno di cadute di materia pittorica, o perché foderata sul retro.

L'immagine della tela è dovuta alla radiopacità sensibilmente più elevata della materia con cui è realizzata la preparazione, rispetto a quella delle fibre vegetali. Infatti la penetrazione della preparazione nella tela ne pone in evidenza la struttura mediante un'alternanza, in senso orizzontale e verticale, di righe chiare dovute alla preparazione e di righe scure dovute ai fili veri e propri.

La presenza di una *foderatura* non incide sull'immagine radiografica poiché la radiopacità della tela impiegata e quella degli adesivi utilizzati per la sua applicazione, analogamente a quella della tela originale, sono trascurabili. È stato infine verificato che le caratteristiche delle tele originali sono in genere evidenziate anche nelle immagini radiografiche di opere che hanno subito un trasporto [Ravaud 2001].

Lo studio della tela consente di stabilirne l'armatura o intreccio: tela, saia ecc. In quei casi in cui essa è sufficientemente estesa, oppure comprende una cimosa, è inoltre possibile riconoscere la direzione della trama e dell'ordito.

Per quanto riguarda i fili, è possibile misurarne con buona approssimazione il diametro medio e la riduzione nelle due direzioni. Con quest'ultima grandezza s'intende la densità, o numero per centimetro (n/cm). Sulla base del diametro medio e della riduzione è possibile ricavare degli indicatori per il grado di spazio libero all'interno delle maglie della tela.

Se il dipinto è costituito da più teli (TAV. 72) è infine possibile valutarne il numero, le dimensioni, le caratteristiche di ciascuno, nonché le modalità e lo schema di assemblaggio.

Le caratteristiche di tessitura delle tele, e tra queste la riduzione dei fili per trama e ordito, possono essere confrontate con quanto noto in merito alla produzione tessile di determinati periodi storici o aree geografiche; a questo riguardo si segnalano alcuni lavori riguardanti soprattutto dipinti del seicento, anche se ancora non esistono statistiche ampie e repertori facilmente accessibili [Bourriot, Ravaud 1994, Martin, van de Wetering].

In genere, in prossimità del perimetro, l'andamento dei fili è perturbato dalla trazione impartita dai chiodi con cui la tela è stata fissata originariamente al telaio prima di ricevere la preparazione. Nel caso che il dipinto non sia più tensionato sul telaio originale è quindi possibile verificare il posizionamento dei chiodi originari. L'assenza di queste perturbazioni ad archetti potrebbe, in molti casi, essere indice di una riduzione delle misure originali oppure del fatto che la tela, dopo essere stata ricoperta dalla preparazione (magari su un telaio interinale), è stata ricavata da una di dimensioni maggiori. A queste conclusioni porta ad esempio lo studio delle radiografie del *Narciso*, attribuito a Caravaggio e conservato presso la Galleria Nazionale

le di Arte Antica di Palazzo Barberini a Roma. In questo caso, infatti, sui lati destro, sinistro e inferiore appaiono perfettamente leggibili le deformazioni ad archetto impartite dal tensionamento dei chiodi, con un passo medio di circa 10 cm sui lati verticali e di circa 8-9,5 cm su quello inferiore. Sul lato superiore, al contrario, compare un'unica deformazione ad arco riconoscibile anche a distanze considerevoli dal bordo del dipinto, la cui altezza raggiunge al centro 6 cm circa, ad indicare che la preparazione è stata applicata sulla tela tirata su un telaio interinale e che su questo lato probabilmente è stata lasciata libera.

2.11.2 Supporto: dipinti su tavola

Nei dipinti su tavola, la presenza del supporto ligneo tende ad appiattire il contrasto radiologico: infatti, l'assorbimento ad essa dovuto è relativamente forte e rende difficile l'osservazione di piccole differenze di assorbimento tra zone diverse dello strato pittorico. La conseguenza è che generalmente l'immagine che si riesce ad ottenere è meno contrastata di quella di un dipinto su tela.

Nella pittura italiana l'essenza ligneo impiegata più frequentemente è il pioppo, soprattutto in Italia centrale dove, a partire dal Trecento, essa è stata utilizzata nella quasi totalità dei casi. Differente è la situazione per il periodo precedente il Trecento, dove ad esempio in area toscana sono stati rilevati numerosi casi di dipinti eseguiti su tavole di castagno. Allo stesso modo sono documentati, sempre per l'Italia centrale, rarissimi ma significativi casi relativi all'impiego di altre essenze lignee¹¹. Per l'Italia settentrionale, soprattutto in area alpina e lagunare, la prevalenza del pioppo nella scelta dei supporti lignei è ancora meno marcata; in questo caso compaiono spesso le conifere e il tiglio, in analogia con quanto riscontrato al di là delle Alpi, in Germania e in Francia. Nelle Fiandre e in Olanda, invece, è stata usata pressoché sistematicamente la quercia.

Nella figura 32 (par 3.6) è mostrata la relazione tra la radiopacità di diverse essenze e la loro densità, derivata dall'analisi della radiografia di una serie di cubetti (TAV. 31). Sebbene dall'immagine radiografica siano leggibili alcune caratteristiche dell'essenza legnosa impiegata, nel caso del pioppo ad esempio è facilmente riconoscibile una fitta tramatura di sottilissimi aghi dovuta alla penetrazione del gesso della preparazione negli interstizi tra le fibre della superficie del legno (TAVV. 47 e 48), non è tuttavia consigliabile impiegare a tale scopo la radiografia al posto di indagini più specifiche. D'altra parte l'identificazione del pioppo in un dipinto realizzato in Italia non costituirebbe una novità rispetto alle attese; di ben altro interesse a fini statistici sarebbe la possibilità di scendere nel dettaglio di tale riconoscimento, identificando la

¹¹ Il cipresso, ad esempio, è documentato per alcuni dipinti altomedievali, ma anche per la pala d'altare della cappella Cerasi in Santa Maria del Popolo a Roma, opera di Annibale Carracci, e per almeno una delle prime versioni dei laterali della stessa cappella, dipinte dal Caravaggio.

specie (ad esempio pioppo bianco o gattice, pioppo nero ecc.). Per questa ragione, nello studio del supporto, un uso corretto della radiografia dovrebbe essere limitato al riconoscimento delle anomalie strutturali, dei segni di lavorazione e alla valutazione dello stato di conservazione.

Per quanto riguarda struttura, numero, dimensioni e disposizione delle tavole (facilmente osservabili dal retro) la radiografia può dare un contributo significativo solo in alcuni rari casi, come quelli concernenti opere dipinte su entrambi i lati, dove gli strati pittorici potrebbero mascherare alcune giunzioni. In merito all'assemblaggio, l'esame radiografico è invece indispensabile per verificare l'eventuale presenza di elementi di collegamento inseriti all'interno delle giunzioni o di ulteriori sistemi di fissaggio, come farfalle (TAV. 49), ranghette (TAV. 42) o cavicchi (TAVV. 44 e 65). Del supporto la radiografia evidenzia anche eventuali disomogeneità nell'andamento delle fibre, i nodi ecc., e la presenza di interventi volti a contrastarne gli effetti negativi sul supporto stesso, per evitare concentrazioni di tensioni superficiali che si ripercuotono sulla conservazione del dipinto sotto forma di un cretto accentuato e, soprattutto, di un rischio di distacco.

Nei supporti di grandi dimensioni poteva risultare difficile il reperimento di tavole del tutto prive di nodi: questi venivano spesso eliminati dal lato da dipingere inserendo tasselli rettangolari, che comunque non interessavano l'intero spessore e venivano applicati prima di stendere la preparazione (TAV. 55).

Anche una lavorazione non accurata del supporto è facilmente leggibile in radiografia grazie alle variazioni di spessore del gesso di preparazione che colma dislivelli o cavità (TAVV. 45, 46, 54). In genere si tratta di impronte fortemente caratterizzate: a seconda degli utensili impiegati possono presentare tracce dentate e leggermente arcuate (TAV. 56).

Altre volte si evidenzia la presenza di ispessimenti della preparazione dovuti all'asportazione non omogenea del legno della superficie in corrispondenza del cambiamento di orientamento delle fibre. Questo tipo di anomalia si riscontra in genere se la fibratura del supporto è irregolare o tende a intrecciarsi: ciò rende difficile la lavorazione della tavola perché la parte più dura del legno, meno cedevole, viene asportata a schegge, che richiedono la stuccatura prima della stesura della preparazione (TAV. 54).

In alcuni casi, per contrastare e minimizzare i movimenti del supporto, sulla superficie da dipingere veniva applicata una tela (*incamottatura*), prima della stesura della preparazione a gesso e colla (TAVV. 37, 38, 40, 41). Tale pratica caratterizza pressoché sistematicamente opere realizzate sino alle soglie del Trecento, mentre in epoche successive è stata impiegata sempre meno, anche se a Firenze è ancora abbastanza usuale nel Quattrocento. Anche in questo caso è possibile studiare nell'immagine radiografica le caratteristiche salienti di tessitura (armatura, diametro medio dei fili e tessitura).

In alcuni casi il rinforzo con una tela è stato apportato solo localmente, in corrispondenza delle giunzioni tra le tavole o di forti disomogeneità (ad es. nodi, TAV.

64); al posto di strisce di tela potevano anche essere impiegate pergamena o fibre vegetali (stoppa, canapa ecc.) o animali (lana) non tessute.

Di facile individuazione è la presenza di elementi metallici, come chiodi, viti, staffe, ecc., che, avendo densità molto maggiore del legno, appaiono di colore più chiaro del resto; dall'immagine si può in genere dedurre se la loro manifattura sia antica (forgiatura a mano) o moderna, nonché lo stato di conservazione (TAV. 35). In alcuni casi la presenza di aloni o di infiltrazioni che si dipartono dal metallo mostra la diffusione di prodotti di corrosione, visibili anche quando il metallo che li ha prodotti è stato rimosso (TAV. 36).

Per quanto riguarda lo stato di conservazione del legno, i canali dei tarli appaiono di colore più scuro, trattandosi di mancanze di materiale; i fori d'uscita invece risultano bianchi o neri a seconda che siano stati stuccati o no in precedenti interventi di restauro. Inerti di altri materiali sul retro del supporto, a causa di risanamenti strutturali come ad esempio sverzature o listelli, interferiscono fortemente nella resa dell'immagine radiografica, in alcuni casi compromettendo la leggibilità dell'insieme.

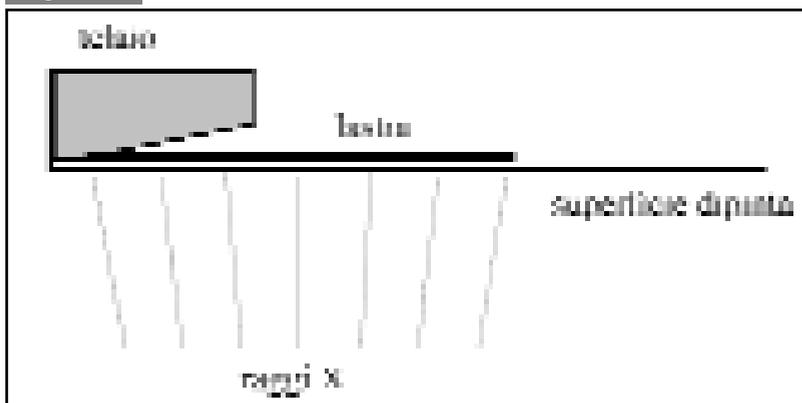
2.11.3 Strutture di sostegno o di irrigidimento del supporto

Un discorso a sé stante deve essere effettuato per le strutture di sostegno o di irrigidimento, poiché esse interferiscono pesantemente sulla resa radiografica (TAV. 63) e solo in alcuni casi il disturbo che esse arrecano alla leggibilità dell'immagine degli strati pittorici può essere eliminato o minimizzato.

Nel caso di dipinti su tela, per eliminare l'impronta del telaio e delle traverse, occorre adottare una configurazione diversa da quella rappresentata in figura 24, disponendo il dipinto con lo strato pittorico verso il basso ed inserendo la lastra a contatto con la tela, come mostrato in figura 25.

Prima di procedere come appena detto, è necessario verificare che il dipinto possa

Figura 25



Assetto per eliminare l'immagine del telaio di un dipinto su tela

essere effettivamente capovolto senza danno, soprattutto se di grandi dimensioni. Ciò comporta, comunque, la perdita di una piccola fascia perimetrale d'immagine, poiché la lastra non può essere infilata sotto alla battuta del telaio.

Nel caso si possa operare durante il restauro, può essere ottimale eseguire la radiografia a dipinto smontato dal telaio o montato su telaio interinale.

Nelle immagini radiografiche di alcune opere si vede l'impronta più scura, ossia meno radiopaca, di un telaio non corrispondente a quello attuale. Questo effetto non può essere spiegato come una consunzione e usura della tela a causa dello sfregamento contro il telaio, ma deve invece essere collegato al telaio originale. La minore radiopacità indica infatti spessori minori di preparazione dovuti alla resistenza offerta dal telaio durante la sua stesura, che ha determinato l'applicazione di quantitativi di materia leggermente minori rispetto a quelli assorbiti nelle zone in cui l'assenza della struttura di sostegno rendeva la tela più cedevole e assorbente (TAV. 71).

Più complessa è invece la situazione per i dipinti su tavola: qui lo spessore del legno è sensibilmente maggiore in corrispondenza di traverse o parchettature e determina sulle immagini delle fasce fortemente più chiare. Questo inconveniente non può essere eliminato, ma solo attenuato, registrando due differenti immagini radiografiche della stessa zona a differenti condizioni di irraggiamento (tensione, corrente e durata), in modo da ottenere, nei due casi, intensità di grigio confrontabili per le zone all'interno e all'esterno dell'ombra proiettata dalla traversa. A questo punto si procede alla ricomposizione dell'immagine utilizzando parti ottenute nelle due condizioni.

Un altro espediente consiste nel montare la sorgente di raggi X su un carrello mobile che la mantenga in movimento, durante tutta la durata dell'irraggiamento, lungo una traiettoria oscillante, oppure rotante, oppure oscillante e rotante contemporaneamente. Con questa tecnica, nota come *radiografia stratigrafica* o *stratoradiografia*, cambia continuamente l'angolo di proiezione di tutti i particolari del supporto, che si trovano a distanza dalla lastra; di conseguenza la loro immagine viene, per così dire, diluita su tutte le zone circostanti e quindi sfuocata, contribuendo a migliorare la leggibilità dello strato pittorico che si trova invece a contatto della lastra. In realtà questo contatto non è molto stretto, come si vedrà nel cap. 3, per la presenza dell'involucro che protegge la lastra dalla luce, e questo di per sé è sufficiente a far diminuire la definizione dell'immagine. A quest'effetto si somma quello dovuto alla presenza dello strato sensibile su entrambi i lati del supporto (cfr. figura 27 par. 3.1): lo spessore di quest'ultimo determina la formazione di immagini leggermente differenti sui due lati. In definitiva si riesce ad attenuare la presenza del supporto e delle strutture di rinforzo, ma l'immagine che ne risulta è meno nitida di quella che si ottiene con un irraggiamento diretto.

Un metodo diverso è quello di far scomparire, in un certo senso, gli elementi di rinforzo come le parchettature riempiendo gli spazi tra un elemento e l'altro con materiale che simuli il legno dal punto di vista dell'assorbimento. In questo modo si ottiene una struttura di supporto di spessore e di assorbimento costante, e nell'immagine radiografica che ne deriva si riesce ad attenuare l'effetto di quadrettatura.

2.11.4 Strati preparatori

Gli strati preparatori contribuiscono in maniera pressoché omogenea all'immagine radiografica, con un velo grigio la cui opacità aumenta con l'aumentare dello spessore. Nel caso delle preparazioni a gesso e colla dei dipinti su tavola, abbastanza raro è il riscontro di microdisomogeneità costituite da granuli, riconducibili ad impurezze non eliminate nel *gesso grosso* impiegato negli strati più profondi di preparazione (TAVV. 57, 61, 62). Nel caso dei dipinti su tela, la loro individuazione è ostacolata dall'interferenza generata dall'immagine della struttura della tela.

Grosse disomogeneità sono in genere dovute, come si è visto, a discontinuità superficiali del supporto, colmate dalla preparazione stessa.

Rari sono i casi in cui sono visibili segni degli strumenti impiegati per la stesura o la lisciatura degli strati preparatori. Nel caso dei dipinti su tavola essi possono essere rappresentati da una serie di segni paralleli lasciati da spatole dentate con cui è stata rasata la preparazione (TAVV. 57, 58, 59).

Nei dipinti su tela l'applicazione veniva eseguita con pennelli o, in tele di grandi dimensioni, con spatole, stecche o coltelli con grande lama, come descritto in varie fonti secentesche e settecentesche; in quest'ultimo caso nell'immagine radiografica risultano evidenti i segni delle spatolate (TAV. 71). Più difficile è invece il riscontro dei segni lasciati da una stesura a pennello, poiché si cercava sempre di regolarizzare il più possibile la superficie; in genere appare evidente quando i segni lasciati non interferiscono con la struttura delle immagini dipinte¹².

2.11.5 Disegno

Materiali per tracciare i disegni, quali la grafite, il carbone, gessetti o pastelli a base di carbonato o solfato di calcio, non sono visibili, poiché la loro radiopacità e i loro spessori risultano del tutto trascurabili rispetto alla radiopacità dei pigmenti minerali ed agli spessori degli strati pittorici.

Sebbene sia stata ipotizzata una buona leggibilità radiografica per disegni realizzati con punte metalliche (solitamente argento, piombo o leghe piombo-stagno), misure effettuate allo scopo su campioni appositamente realizzati hanno indicato che non è possibile evidenziarne la presenza. Ciò è dovuto agli spessori estremamente sottili, come si può riscontrare direttamente osservando disegni realizzati con tali materiali su carta preparata.

L'unica traccia di disegno radiograficamente leggibile in un dipinto su tela o tavola è costituita dalle incisioni. A tale scopo potevano essere impiegate punte metalliche o

¹² Un esempio di ciò è stato rilevato in un ritratto virile di Gerolamo da Carpi conservato presso la Galleria Nazionale di Arte Antica di Palazzo Barberini a Roma, nelle cui radiografie è evidente la stesura degli strati preparatori, con un pennello largo circa 3 cm, applicati in maniera molto regolare, con passate successive ad andamento ortogonale.

lignee (tra cui il manico del pennello) e si poteva ricorrere all'ausilio di strumenti quali la riga, il compasso o sagome e maschere appositamente realizzate.

Queste incisioni possono apparire come linee scure, se non sono state colmate dal materiale pittorico, o, più facilmente, chiare, se il materiale pittorico le ha riempite e livellate.

Incisioni relative ai contorni delle figure sono in genere presenti nelle tavole con i fondi dorati, in cui delimitavano le zone da ricoprire con la foglia, che veniva applicata prima di dipingere le figure.

L'impiego d'incisioni, inoltre, è particolarmente frequente nella definizione dei particolari architettonici o geometrici, solitamente con l'ausilio di una riga o del compasso (TAVV. 40, 58, 60, 66). Meno frequentemente si trovano incisioni che definiscono, in fase di progettazione, linee di riferimento o assi per la costruzione delle figure.

2.11.6 Strati pittorici: materiali

Per quanto riguarda lo strato pittorico, a pigmenti di diversa composizione, quindi di diverso coefficiente di assorbimento della radiazione incidente, corrispondono differenti tonalità di grigio: più chiare per quelli più assorbenti, come la biacca, il cinabro ecc. Nella tabella 5 è riportata una classificazione dei vari pigmenti da questo punto di vista. Si possono anche calcolare i coefficienti di assorbimento per alcuni pigmenti ad una energia ben definita; nella tabella 4 sono riportati, ad esempio, i dati calcolati [DeWild] all'energia di circa 15 keV. Per molti pigmenti i calcoli sono stati ripetuti considerando l'aggiunta della quantità di olio di lino necessaria alla miscelazione. Il confronto dei dati riportati nelle due tabelle mostra comunque alcune discordanze.

Si può infine tentare di mettere sperimentalmente in relazione la radiopacità di una campitura e la composizione del pigmento impiegato per realizzarla, ricorrendo a campioni di composizione nota appositamente preparati in laboratorio [Accardo]. Questi ultimi sono stati ottenuti stendendo su tele con differenti preparazioni uno strato di spessore costante e uguale per tutti i pigmenti. La garanzia della costanza dello spessore è stata ottenuta adottando una tecnica serigrafica, ossia facendo filtrare il colore con una spatola attraverso una tela a fili sottili (organza) posta sul supporto. Per alcuni colori sono state inoltre realizzate zone con 1, 2 e 3 strati sovrapposti per verificarne il comportamento all'aumentare dello spessore. Le tele sono state poi radiografate ed è stata misurata la densità sia in corrispondenza dei singoli pigmenti sia in corrispondenza del solo supporto.

Questo modo di procedere funziona abbastanza bene sui campioni; quando però si tenta di applicarlo ai dipinti veri e propri entrano in gioco una serie di fattori incontrollabili quali la variabilità degli spessori, la miscelazione o la sovrapposizione di pigmenti diversi, la natura del supporto e della preparazione, che rendo-

Tabella 4 – Coefficienti di assorbimento di alcuni pigmenti

Pigmento	μ (pigmento puro)	μ (pigmento con olio)
Oro	100,9	
Litargirio	94,5	
Cinabro	88,5	70,9
Biacca	81,7	72,7
Bianco di zinco	44,5	37,9
Malachite	27,0	
Azzurrite	26,0	
Blu di cobalto	14,7	7,0
Smalto	12,0	
Bianco sangiovangi	8,6	
Ocra	7,8	4,6
Oltremare	4,0	
Nerofumo	0,7	0,7
Olio di lino	0,7	

Tabella 5 – Classificazione dei pigmenti in base alla radiopacità

Colore	Pigmento	Composizione	Radiopacità
Bianchi	Biacca	$2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$	Molto elevata
	Bianco di zinco	ZnO	Elevata
	Bianco di titanio	TiO_2	Medio-elevata
	Bianchi a base di carbonato di calcio	CaCO_3	Media
Azzurri	Azzurrite	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	Elevata
	Azzurro di smalto	Vetro potassico colorato con ossido di cobalto	Medio-elevata
	Blu di cobalto	$\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	Medio-elevata
	Blu di Prussia	$\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{Cn})_6]_3$	Media
	Oltremare (lapislazzuli)	Silico alluminati di sodio e potassio	Media
	Indaco	Pigmento di origine organica	Bassa

Verdi	Acetato di rame (verdigris)	$2\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Elevata
	Malachite	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	Elevata
	Verde di cromo	Cr_2O_3	Medio-elevata
	Resinato di rame	$\text{Cu}(\text{C}_{19}\text{H}_{29}\text{COO})_2$	Medio-elevata
	Terra verde	Silicoalluminati di Fe(II), Mg, K	Media
Gialli	Giallo di piombo e stagno	Pb_2SnO_4 e PbSnO_3	Molto elevata
	Giallo di Napoli	$\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{O}_6(\text{O},\text{OH})$	Molto elevata
	Litargirio - massicot	PbO	Molto elevata
	Giallo di cromo	PbCrO_4	Molto elevata
	Giallo di cadmio	CdS	Elevata
	Orpimento	As_2S_3	Elevata
	Ocra, terre	Terre naturali contenenti $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ e silice	Media
	Lacche gialle	Pigmento di origine organica	Bassa
Rossi	Minio	Pb_3O_4	Molto elevata
	Cinabro - vermiglione	HgS	Molto elevata
	Rosso di cadmio	CdSeS	Elevata
	Realgar	As_2S_2	Elevata
	Bolo	Caolino contenente ossidi di ferro	Media
	Terre rosse, ocra	Pigmenti a base di Fe_2O_3	Media
	Lacche rosse	Pigmento di origine organica	Bassa
Marroni	Terre	Terre naturali contenenti ossidi di ferro e silice	Medio-elevata
	Terre d'ombra	Terre naturali contenenti Fe_2O_3 , MnO_2 e silice	Medio-elevata
	Seppia	Pigmento di origine organica	Bassa
	Bitume	Pigmento di origine organica	Bassa
Neri	Nero di avorio, nero di ossa	Carbonio ottenuto dalla combustione di sostanze di origine animale	Bassa
	Nero di vite	Carbonio ottenuto dalla combustione di sostanze di origine vegetale	Bassa
	Nero fumo	Carbonio ottenuto dalla combustione di oli o cere	Bassa
	Lamine metalliche	Oro, argento, stagno	Molto elevata ¹³

¹³ In genere le lamine metalliche hanno però spessori molto più sottili degli strati pittorici, circostanza che ne attenua molto la radiopacità.

no di fatto inapplicabile qualsiasi tentativo di determinazione quantitativa per un riconoscimento dei materiali sulla base della loro radiopacità. Si possono tuttavia ottenere indicazioni qualitative, almeno sulla presenza di tutta quella classe di pigmenti fortemente assorbenti quali biacca, minio, cinabro ecc.

2.11.7 Strati pittorici: stesure

La caratteristica saliente delle immagini radiografiche dei dipinti, che fa maggiore effetto e immediata presa anche presso i non addetti ai lavori, concerne la presenza di sovrapposizioni di differenti stesure, pentimenti, ridipinture parziali (TAVV. 50, 51, 53, 67), utilizzo di tele già dipinte ecc. (TAV. 68).

L'attenta lettura di una radiografia può però fornire un'elevata messe di informazioni di altra natura, ad esempio sulla tecnica di esecuzione di un dipinto e sulle modalità di stesura: andamento, lunghezza e corposità delle pennellate (TAVV. 73 e 74), passaggi da zone in ombra a quelle in luce ecc. Tali informazioni risultano ancora più interessanti se esiste la possibilità di confrontare più versioni, redazioni o derivazioni da una stessa opera. In primo luogo le differenze nelle modalità di stesura, analogamente con quanto avviene nell'esame visivo e in quello delle immagini riflettografiche, è indicativo di cambiamenti di mano o, perlomeno, di scelte tecniche differenti. A questo proposito vengono mostrati, nelle TAVV. 69 e 70, alcuni esempi che riguardano le indagini eseguite sulla tela con *San Giovanni Battista* del Caravaggio, conservata nella Pinacoteca Capitolina a Roma, e su una copia antica conservata presso la Galleria Doria Pamphilj a Roma. Per lungo tempo si è ritenuto originale il dipinto della Galleria Doria Pamphilj, ma la scoperta della versione capitolina ha messo in crisi tale ipotesi. Il dibattito è stato comunque complesso e articolato, fino a relegare il dipinto Doria Pamphilj allo stato di copia, ipotesi ampiamente confermata dal confronto delle immagini radiografiche dei due dipinti [Massimi 1990].

Già a un veloce esame appaiono evidenti le differenze fra le due tele, a partire dal supporto. Altrettanto evidenti sono le modalità di stesura delle campiture; gli incarnati, ad esempio, nel dipinto capitolino sono realizzati in maniera molto sciolta e sono facilmente leggibili le modalità di abbozzo della figura. Nella gamba destra, ad esempio, si osservano la sovrapposizione di due differenti tipi di stesura: uno caratterizzato da pennellate larghe e brevi, disposte in senso ortogonale all'andamento della gamba e più disordinate all'altezza del ginocchio, l'altro con lunghe e sottili pennellate che assecondano i contorni della figura (TAV. 70). La costruzione volumetrica degli incarnati della tela Doria Pamphilj risulta molto differente, con un procedimento accurato e non altrettanto sciolto. Nelle immagini radiografiche della tela capitolina compaiono inoltre delle macchie di colore stese in maniera estremamente veloce, senza nessuna relazione con l'immagine visibile, di difficile interpretazione, assenti nella tela Doria Pamphilj. Le considerazioni che han-

no portato a relegare definitivamente la tela Doria Pamphilj allo stato di copia sono però legate ad altre caratteristiche leggibili nelle radiografie: l'assenza di pentimenti in questo dipinto e la loro presenza in quello capitolino, soprattutto nel drappeggio del panno sotto la figura del santo. Un altro particolare, infine, che documenta inequivocabilmente la precedenza del dipinto capitolino rispetto a quello Doria Pamphilj è localizzato nella zona in cui il corno dell'ariete si sovrappone al braccio del giovane. In questo caso non si tratta di un pentimento, ma della modalità con cui è stata pensata e realizzata la figura (TAV. 69). Nella tela capitolina la materia pittorica del corno si sovrappone a quella dell'incarnato, ad indicare che prima è stata costruita la figura del giovane (completa nella prima fase di abbozzo) e poi sono stati aggiunti i dettagli che legano questa figura a quella dell'ariete. Al contrario, nella tela Doria Pamphilj la stesura del braccio si interrompe in corrispondenza del corno, il che denuncia una realizzazione che segue strettamente un modello preesistente; è infatti normale trovare perfettamente eseguita l'anatomia di una figura, anche se poi coperta dal panneggio.

Alcune volte i contorni delle figure appaiono meno radiopachi delle zone circostanti; ciò è dovuto al fatto che durante l'esecuzione di un dipinto le prime stesure, più veloci e sommarie, hanno campito le figure senza lambirne il profilo, mentre le ultime stesure, più rifinite, hanno seguito nel dettaglio i contorni. Questo modo di procedere poteva essere motivato, oltre che dalla necessità di eseguire più speditamente la fase di impostazione e di abbozzo, anche da quella di evitare di applicare il colore in zone dove la precedente stesura era ancora fresca. L'accorgimento di non sovrapporre, anche se solo parzialmente o marginalmente, due stesure di colori differenti, quando quella applicata per prima non era ancora asciugata, è relativamente frequente e non necessariamente testimonia una maniera di procedere veloce: è invece un accorgimento comune nella tecnica della pittura ad olio, dove i tempi di essiccazione sono notevolmente più lunghi che in quella a tempera (TAVV. 61 e 62). Per quanto riguarda lo stato di conservazione, nelle immagini radiografiche si evidenziano facilmente cadute di colore o lacune negli strati pittorici originali, anche se ritoccate, stuccature e cretto. Le cadute di colore e le lacune appaiono più scure, le stuccature più chiare, a meno che non siano state realizzate con materiali di origine organica, ad esempio la cera, nel qual caso esse sono visibili come macchie molto più scure delle zone adiacenti (TAV. 67).

Il cretto appare invece come una ragnatela di sottili linee scure. Su di esso incidono molto i processi di conservazione, ma le sue caratteristiche morfologiche e la sua entità dipendono anche dai materiali impiegati negli strati pittorici (pigmenti e leganti) e dal supporto, in quanto responsabile degli stati tensionali.

Un eccesso di legante facilita lo scorrimento del colore, accelerando e accentuando la formazione del cretto; analogamente, la sua formazione è agevolata da un difetto di legante, in quanto conferisce scarsa elasticità alla pellicola pittorica. Soprattutto in opere realizzate nella fase di messa a punto della tecnica della pittura ad olio, quindi alla fine del Quattrocento, può essere evidenziata la presenza di

cretti accentuati nelle stesure di alcuni colori (TAVV. 52 e 53). Rispetto a quanto osservato sinora, sostanziali differenze caratterizzano i dipinti moderni e contemporanei da quelli antichi: si ha infatti l'impiego da un lato di pigmenti di basso potere assorbente nei confronti della radiazione, e dall'altro di assemblaggi di materiali di natura totalmente eterogenea (metallo, stoffa, carta ecc.) che sono impossibili da analizzare con un unico irraggiamento. Inoltre non sussiste più, in generale, lo schema stratigrafico del dipinto antico costituito da supporto, preparazione, imprimitura, strato pittorico, vernice. Si possono però leggere nello strato più profondo dell'opera "i tratti spontanei e il percorso evolutivo dell'artista, i suoi intenti comunicativi, le idee accennate e poi abbandonate", che rappresentano anche una "opportunità per accertare eventuali falsificazioni" [Althöfer].

Occorre infine osservare come tutti i dati desunti dalle radiografie di un dipinto, sia quelli riguardanti il supporto che quelli riguardanti lo strato pittorico, possono fornire in molti casi elementi oggettivi per verificare un'attribuzione del dipinto stesso ad un determinato autore, a una scuola o a un'epoca [Marijnissen].

2.12 Fluoroscopia, intensificatori d'immagine

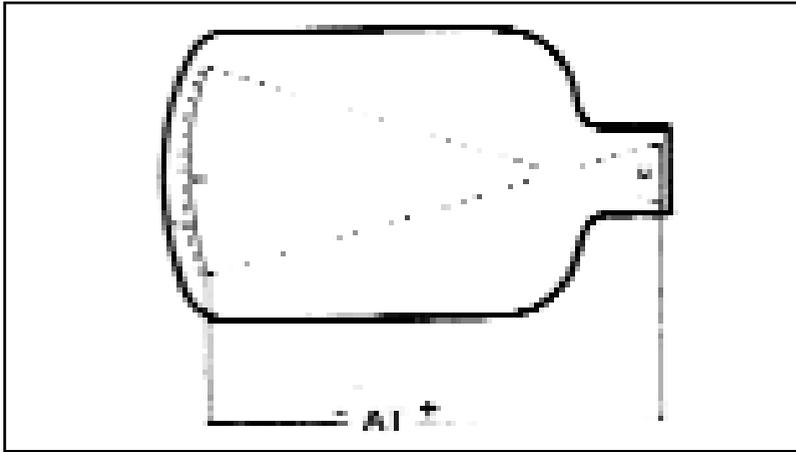
In alcuni casi si tende a sostituire la pellicola fotografica con uno schermo fluorescente costituito di ioduro di cesio, che emette luce nei punti colpiti dalla radiazione trasmessa dall'oggetto. Lo schermo, indicato con *s* nella figura 26, è posto in un sistema sotto vuoto, detto *intensificatore di immagine*, a contatto con un secondo strato *a* di antimoniato di cesio, che ha la proprietà di emettere elettroni nei punti colpiti dalla luce. Questi elettroni vengono accelerati dall'alta tensione *AT* e incidono sullo schermo di uscita (*u*) sul quale si forma l'immagine. Questa viene trasferita da un sistema ottico ad una telecamera, visualizzata su monitor e registrata su opportuno supporto oppure inviata direttamente alla memoria di un computer. In quest'ultimo caso l'immagine viene memorizzata in forma digitale, cioè numerica, nel senso che ad ogni punto dell'immagine viene associato un numero che rappresenta il livello di grigio in quel punto.

L'immagine ottenuta con questi sistemi, anche se di risoluzione inferiore a quella su pellicola, presenta rispetto a quest'ultima il vantaggio di offrire una immediata visione, eliminando il passaggio per le fasi di sviluppo; inoltre non è soggetta ad alterazioni nel tempo, come avviene generalmente per le lastre (ingiallimento) e risulta di più semplice archiviazione.

2.13 Trattamento digitale delle immagini

Alle radiografie in genere ed in particolare alle gammagrafie di statue di marmo, per le quali, come abbiamo avuto già modo di accennare, si ottengono delle im-

Figura 26

Schema di un
intensificatore
di immagine

magini sbiadite e poco definite a causa della diffusione della radiazione, può essere applicato un trattamento digitale delle immagini [Ferretti; Gilardoni 1992]. Quest'ultimo consente il loro miglioramento qualitativo mediante l'aumento del contrasto tonale e il filtraggio passa banda. Successivamente si possono evidenziare i contorni di particolari come fratture, perni e loro sedi di alloggiamento, mediante un algoritmo di ricerca del contorno attraverso l'individuazione della linea di massima variazione locale del livello di grigio. Infine con la tecnica dei falsi colori si può rendere più evidente la distribuzione delle densità e da questa ottenere dati quantitativi come la valutazione delle dimensioni apparenti dei perni e dei relativi alloggiamenti; da queste dimensioni apparenti si deducono immediatamente quelle reali tenendo conto della geometria di irraggiamento, come è stato indicato nel par. 2.7.

Per fare questo occorre che l'immagine venga memorizzata in un computer, riprendendola con una telecamera o acquisendola con uno scanner. Questa operazione ovviamente viene evitata se l'immagine è stata ottenuta con uno schermo fluorescente, in quanto si trova già registrata.

2.14 Campioni per la datazione

Se si deve effettuare una datazione mediante termoluminescenza degli oggetti archeologici o dei manufatti in studio si deve rammentare che il prelievo del campione da datare deve essere eseguito preliminarmente ad indagini che utilizzino radiazioni elettromagnetiche in genere. Infatti l'esposizione a fasci di radiazioni ionizzanti altera notevolmente la dose assorbita dal pezzo a partire dal momento della cottura, vanificando così la possibilità di una datazione.

2.15 Centri di colore

Durante l'esecuzione di prove in laboratorio su campioni di marmo, in preparazione delle indagini su statue di marmo, è stata notata una temporanea colorazione bruna sulla superficie investita dalle radiazioni quando la loro quantità diveniva piuttosto massiccia. Nel corso di queste prove si tentava di vedere quali spessori di marmo potevano essere radiografati impiegando fasci di raggi X da 150 keV di energia, aumentando al massimo l'intensità del fascio stesso e allungando il tempo di irraggiamento. Procedendo in questo modo, all'aumentare dello spessore la superficie del marmo riceveva quantità di radiazioni sempre maggiori, fino ad acquistare una colorazione bruna, dovuta all'attivazione dei cosiddetti *centri di colore*. L'irraggiamento infatti può provocare nel reticolo cristallino dei corpi solidi delle alterazioni temporanee, che consistono nella dislocazione di elettroni in certe posizioni del reticolo stesso. Questa dislocazione conferisce alla zona irraggiata una particolare colorazione che dipende dalla natura del solido. Il fenomeno è però temporaneo: gli elettroni dislocati tendono a riportarsi nella loro configurazione normale e la pigmentazione scompare. In ogni caso è evidente la necessità di evitare la produzione di macchie colorate su un manufatto, anche se reversibili.

3. La lastra radiografica e le condizioni di irraggiamento

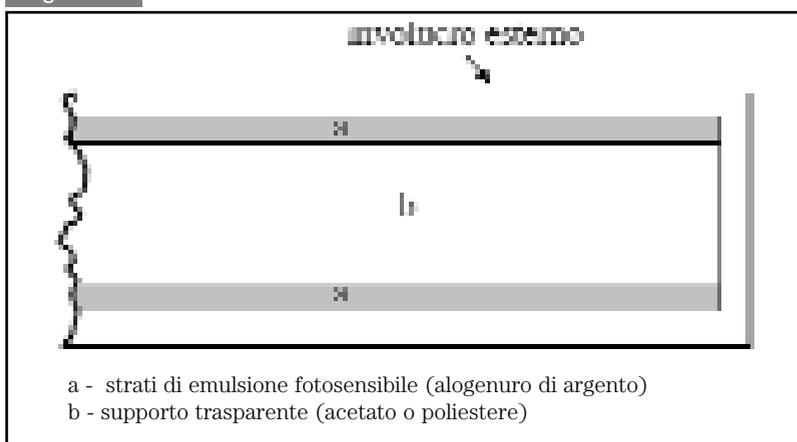
3.1 Struttura della lastra

La lastra è costituita essenzialmente di due parti: un supporto trasparente (base) e due strati sensibili di emulsione; la presenza di due strati consente di raddoppiare la quantità di materiale sensibile e quindi di ottenere una maggiore sensibilità, come verrà detto più diffusamente nel seguito, e immagini più contrastate.

Il supporto ha la funzione meccanica di sostenere l'emulsione stessa ed è normalmente di plastica trasparente (figura 27).

L'emulsione è invece costituita da cristalli di alogenuri di argento, come il bromuro, che costituiscono la parte sensibile, in sospensione gelatinosa. Poiché l'emulsione è sensibile alla luce, la lastra è contenuta in un involucro che la schermi e ne permetta l'uso in ambienti illuminati. I cristalli di alogenuro di argento vengono trasformati dalla radiazione elettromagnetica in argento metallico. La formazione di queste particelle di argento in ogni punto della lastra è tanto maggiore quanto maggiore è la quantità di radiazione¹⁴, detta anche *esposizione* (E), che ha colpito la lastra in quel punto. I punti che corrispondono a parti dell'oggetto poco *radiopache*, quindi poco dense e poco assorbenti, ricevono una maggiore quantità di radiazione e contengono pertanto una maggiore quantità di particelle di argento metallico. In questo modo sulla lastra si forma la cosiddetta *immagine latente*.

Figura 27



Struttura di una lastra radiografica

¹⁴ La quantità di radiazione, o esposizione E, è data dal prodotto dell'intensità per il tempo di irraggiamento (par. 3.4): la dose assorbita dalla lastra è data quindi dal prodotto dell'intensità trasmessa dall'oggetto per il tempo di irraggiamento e pertanto varia da una zona all'altra.

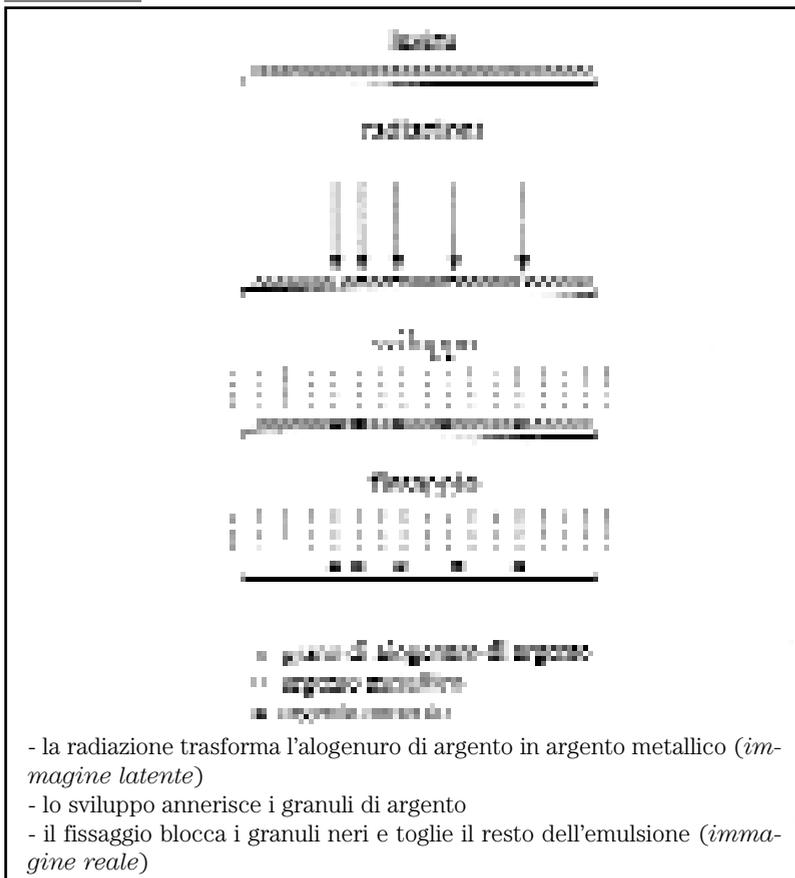
3.2 Trattamento delle lastre

Al termine dell'irraggiamento le lastre vengono sottoposte a trattamenti chimici che consentono di ottenere l'immagine definitiva e sono schematicamente indicati nella figura 28.

Sviluppo. È il trattamento che permette di trasformare l'immagine latente in immagine reale, mediante l'annerimento delle particelle di argento, attraverso l'uso di soluzioni di prodotti chimici detti *sviluppatore*. Nella fase di sviluppo sulla lastra si formano zone più scure in corrispondenza delle parti dell'oggetto meno radiopache, perché in queste zone si è formata una maggiore quantità di particelle di argento. Questo è il trattamento più delicato perché se non eseguito correttamente altera le caratteristiche della lastra.

Fissaggio. Mediante questo trattamento si assicura la conservazione dell'immagine ottenuta dallo sviluppo, eliminando dallo strato di emulsione i residui di alogenuro di argento.

Figura 28



Rappresentazione schematica della formazione dell'immagine (per semplicità è visualizzato un solo strato di emulsione)

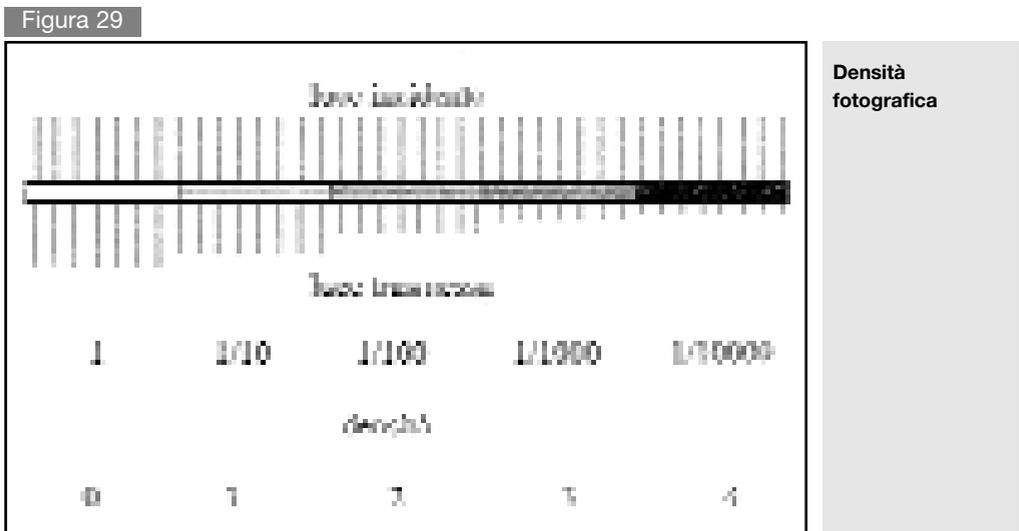
Lavaggio. Dopo il fissaggio la lastra viene lavata in acqua corrente per eliminare le impurezze solubili che si formano sulla superficie durante il fissaggio.

Per ottenere buoni risultati questi trattamenti vanno effettuati seguendo procedure molto rigorose, secondo il tipo di lastre utilizzate. In genere si ricorre a *sviluppatrici automatiche* che eseguono in sequenza tutte le operazioni descritte nel seguito: in camera oscura si estrae la pellicola dalla custodia e la si introduce nella macchina; dopo alcuni minuti la sviluppatrice restituisce la lastra, che a questo punto può essere esposta alla luce, sulla quale è fissata l'immagine definitiva.

3.3 Densità fotografica

Osservando in trasparenza l'immagine sulla lastra si nota che varie zone hanno una luminosità diversa, cioè trasmettono una diversa quantità di luce: la *densità fotografica* di una zona è legata al rapporto tra l'intensità della luce che incide sulla zona e l'intensità di quella trasmessa dalla zona stessa¹⁵ (figura 29).

Poiché la quantità di luce trasmessa da una zona dipende da quanto è scura la zona stessa, cioè dalla quantità di particelle di argento annerite che vi si sono formate, quindi dalla quantità di radiazione che essa ha assorbito, per avere un determinato valore della densità fotografica è necessario che su quella zona arrivi il corrispondente valore della quantità di radiazione.



¹⁵ In realtà la densità è data dal logaritmo del rapporto tra le due intensità, cioè

$$D = \log (\Phi^{\circ} / \Phi)$$

dove Φ° e Φ sono le intensità rispettivamente della luce incidente e di quella trasmessa.

3.4 Esposizione o dose assorbita

Analogamente a quanto si fa con una macchina fotografica, nella quale si regolano la durata dello scatto e l'apertura del diaframma per avere la giusta quantità di luce sulla pellicola, per ottenere delle buone immagini radiografiche occorre regolare la quantità di radiazione che giunge sulla lastra.

La dose assorbita, detta anche impropriamente *esposizione*, è l'energia che viene impartita dalla radiazione incidente all'unità di massa del materiale sensibile della lastra, e viene misurata in *Gray* (Gy) o in *rad*¹⁶. Come vedremo questa grandezza è molto importante perché da un lato i fabbricanti di lastre fotografiche forniscono, per i vari tipi prodotti, la dose che deve essere assorbita dalla lastra per avere un determinato valore della densità radiografica, e dall'altro per le sorgenti γ e per i generatori di raggi X si può facilmente calcolare o misurare la dose prodotta.

Nel caso di generatori di raggi X, l'esposizione dipende dal tempo d'irraggiamento, dalla corrente che circola tra anodo e catodo e, molto più fortemente, dall'alta tensione utilizzata, e le relazioni tra queste grandezze sono tali che un raddoppio dell'esposizione si può ottenere sia raddoppiando il tempo o la corrente, sia aumentando del 25% l'alta tensione¹⁷.

Nel caso di sorgenti radioattive, invece, l'unico parametro su cui si può intervenire, una volta scelto il tipo da impiegare, è il tempo d'irraggiamento.

Naturalmente in entrambi i casi si può ottenere un aumento dell'esposizione, a parità di altre condizioni, riducendo la distanza dalla lastra: in questo caso una riduzione del 30% provoca un raddoppio dell'esposizione.

3.5 Curva caratteristica o di densità

Come è stato detto in precedenza, la densità radiografica varia con la quantità di radiazione assorbita. Nel grafico della figura 30 sono riportate in ordinate la densità e in ascisse la quantità di radiazione assorbita.

La curva di figura 30, ottenuta sottoponendo parti della lastra a quantità crescenti di radiazione e misurandone la densità con strumenti chiamati appunto *densitometri*, riassume tutte le caratteristiche della lastra stessa. Nella figura 31 è riportato un densitometro.

Sensibilità o rapidità. Una lastra è tanto più sensibile, o *rapida*, quanto più è breve il tratto indicato con *a* nella figura 30, che vuol dire che necessita di una minore quantità di radiazione per iniziare a scurirsi.

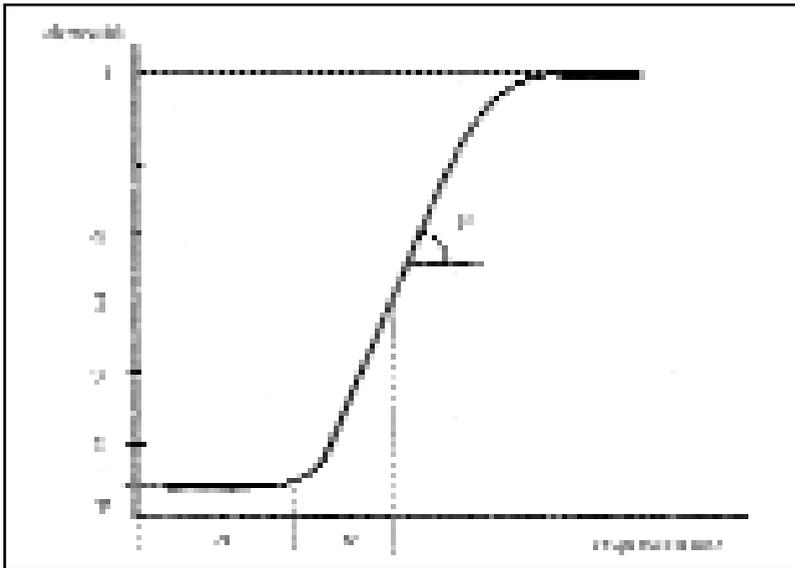
¹⁶ 1 Gy = 1 joule/kg; 1 rad = 0,01 joule/kg

¹⁷ La relazione tra queste grandezze è data da:

$$E = (K \cdot I \cdot t \cdot kV^3) / d^2$$

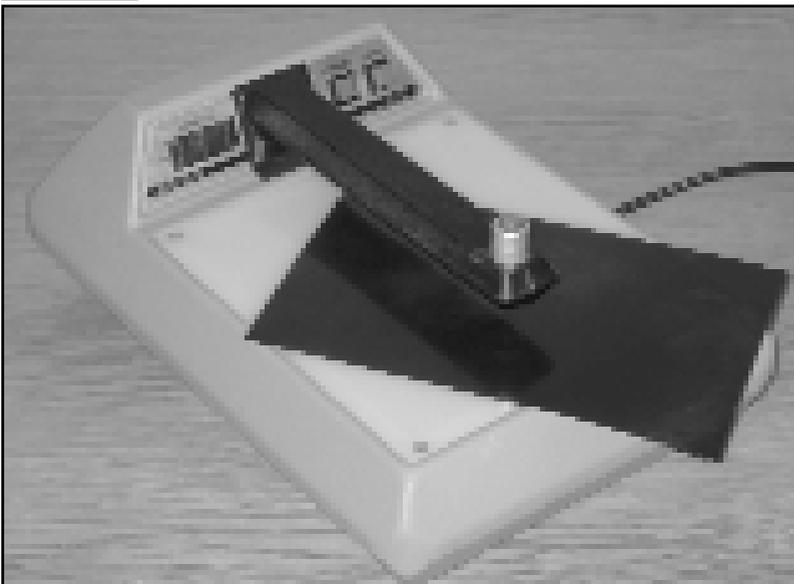
dove K è una costante, I il valore della corrente, t il tempo di irraggiamento, kV il valore dell'alta tensione, e d la distanza sorgente-lastra [Gilardoni 1994].

Figura 30



Curva caratteristica, o di densità, di una lastra radiografica

Figura 31



Densitometro ottico

Contrasto fotografico. È la pendenza p della parte centrale della curva: se la pendenza è grande vuol dire che sono sufficienti piccole variazioni di esposizione per avere grandi variazioni di densità e quindi un maggiore contrasto. Una pellicola di questo tipo consente di evidenziare più facilmente piccole differenze di composizione. Ricordiamo quanto detto in precedenza a proposito del contrasto radiologico

(par. 2.4): è evidente che il contrasto radiografico, cioè quello che si vede sulla lastra, è il risultato della combinazione del contrasto radiologico, o di assorbimento, dovuto alla composizione dell'oggetto e all'energia della radiazione, e del contrasto fotografico intrinseco della lastra.

Velo. È la densità a bassissime esposizioni v , dovuta alla non perfetta trasparenza del supporto della lastra, e costituisce una sorta di rumore di fondo.

Densità limite. È la massima ottenibile con grandi valori dell'esposizione (l). Nella pratica però densità superiori a 3, che corrisponde all'assorbimento del 99,9% della luce incidente, non sono di alcuna utilità.

Intervallo di densità utile. L'intervallo di densità pratica è quello indicato con u : va da 0,4 a 3 rispettivamente per le zone ad esposizione trascurabile corrispondenti a parti dell'oggetto molto dense e radiopache, e per le zone più scure corrispondenti alle parti di più basso assorbimento.

3.6 Determinazione della densità

La densità D di una zona di una lastra può essere misurata con apparecchi detti *densitometri* costituiti da una sorgente luminosa, che produce un sottile raggio, e da un sistema di misura dell'intensità di luce. Quando tra la sorgente e il sistema di misura viene interposta la zona della lastra di interesse, il sistema determina la frazione di luce trasmessa, e fornisce direttamente la densità.

Un altro metodo, meno preciso, ma portatile, consiste nel confrontare visivamente l'annerimento della zona di interesse con quelli di una serie di campioni di densità nota, così come si determina il colore di un oggetto per confronto con una serie di cartoncini colorati e numerati.

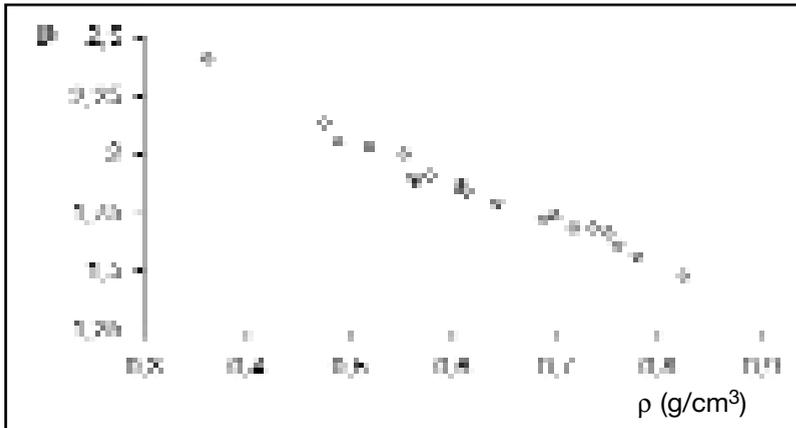
A titolo puramente orientativo si può dire, grossolanamente e schematicamente, che [Gilardoni 1994]:

- $D = 0,2-0,4$ corrisponde alla opacità intrinseca del supporto (velo);
- $D = 1$ è quella che consente di leggere i caratteri dattiloscritti di 1-2 mm di un libro attraverso la lastra poggiata sopra;
- $D = 2$ consente di vedere l'ombra di un dito posto al di là della lastra;
- $D = 3$ non consente più di vedere l'ombra del dito.

Normalmente per le radiografie di tipo industriale e per quelle su oggetti molto assorbenti, una immagine di buona qualità, che fornisce il massimo di informazioni possibile, ha una densità media pari a 1,5-2 nelle zone di maggiore interesse. Per i dipinti invece si utilizza una densità media di 0,7-1, che consente di avere immagini con un'ampia gamma di tonalità di grigio.

Nella TAV. 31 è riportata la radiografia di una serie di cubetti di legno di essenze diverse. Per ognuno di essi è stata determinata la densità ρ del materiale (g/cm^3) ed è stata misurata la densità radiografica D . I dati sono mostrati nella figura 32, dalla quale si deduce l'elevato grado di correlazione tra le due grandezze.

Figura 32



Relazione tra densità del legno ρ e densità fotografica D per essenze legnose diverse

3.7 Influenza dello sviluppo

La curva caratteristica di una lastra è determinata non solo dal tipo di emulsione con cui è stata realizzata, ma anche da come viene condotta la fase di sviluppo [Halmshaw], nella quale intervengono diversi parametri che interferiscono tra loro:

- durata;
- temperatura;
- attività del liquido sviluppatore (tipo, concentrazione, grado di esaurimento);
- agitazione del liquido.

La durata dipende dal tipo di lastra, dal tipo di sviluppatore e dalla sua temperatura. Se il tempo di sviluppo è troppo breve rispetto a quello previsto in base a questi parametri (*sottosviluppo*), viene ridotto l'intervallo di densità utile e si ottiene una lastra molto sbiadita e priva di contrasto. Questo difetto può avvenire anche nelle sviluppatrici automatiche, in cui durata e temperatura sono strettamente controllate, se il liquido di sviluppo ha perso le sue caratteristiche originali, perché esaurito o invecchiato.

Se invece si eccede nei tempi di sviluppo (*sovrasviluppo*) aumenta la radiopacità del supporto e si ottengono immagini troppo scure e contrastate.

La temperatura di sviluppo varia a seconda che il processo avvenga in modo manuale o automatico. Nel primo caso in genere è di 20 °C con una durata di 5 min; se si usano temperature maggiori occorre ridurre la durata, e ricordare che il liquido si ossida più rapidamente. Le sviluppatrici automatiche impiegano invece temperature un po' più alte, intorno a 30 °C.

Durante tutta la fase la lastra deve essere mossa, in particolare durante i primi 30 secondi, per evitare che piccole bolle d'aria aderiscano alla superficie, provocando la formazione di macchie; l'agitazione periodica è necessaria anche in seguito per garantire uniformità di sviluppo.

3.8 Tipi di lastre radiografiche

I produttori di lastre commercializzano diversi tipi di prodotti che si differenziano tra loro per alcune caratteristiche.

La prima è la *grana*, cioè la dimensione dei cristalli di alogenuro di argento dispersi nell'emulsione: più sono grandi i grani maggiore è la sensibilità o rapidità della pellicola, cioè questa richiede l'assorbimento di una dose minore per ottenere una determinata densità. Le dimensioni dei grani però provocano la *granulosità*, cioè una disomogeneità dell'immagine sviluppata tanto maggiore quanto maggiori sono le dimensioni dei grani.

Se quindi le esposizioni che si possono raggiungere sono deboli, occorre ricorrere a pellicole molto rapide, a scapito della qualità dell'immagine. Da questo punto di vista le pellicole si classificano in *grana ultrafine*, *grana finissima*, *grana fine*, *grana media* ecc. o, che è lo stesso, in *velocità bassissima*, *bassa*, *media*, *rapida* ecc.

Nella tabella 6 [Gilardoni 1994] sono riportate le dosi necessarie per alcuni tipi di pellicole a raggiungere la densità 0,7-1 che, come accennato nel par. 3.6, è quella ottimale per i dipinti.

In genere le più utilizzate sono quelle che richiedono una dose di 0,3-0,4 rad, o quelle leggermente più rapide.

Un'altra classificazione riguarda la presenza o meno degli schermi di piombo per ridurre la radiazione diffusa; una ulteriore riguarda infine le dimensioni delle lastre. Ne esistono infatti in commercio di formati diversi, il più diffuso dei quali è 30x40 cm.

3.9 Scelta dei parametri di irraggiamento

La prima scelta da effettuare è quella del tipo di lastra, e può essere effettuata solo sulla base della propria esperienza personale, ricavata dalle applicazioni fatte in precedenza su oggetti di caratteristiche confrontabili con quello da studiare. Questa può essere integrata con semplici calcoli sulla base della relazione che lega l'inten-

Tabella 6 - Dose necessaria per avere densità 0,7-1 in funzione del tipo di lastra

KODAK		GEVAERT		DUPONT	
Tipo	Dose (rad)	Tipo	Dose (rad)	Tipo	Dose (rad)
		D8	0,003-0,006		
AA	0,005-0,1	D7	0,005-0,1	NDT75	0,005-0,1
T	0,1-0,2	D4	0,3-0,4	NDT65	0,1-0,2
M	0,3-0,4	D2	1-1,5	NDT55	0,3-0,4

sità della radiazione trasmessa allo spessore e al tipo di materiale (par. 2.1), per tenere conto della diversa composizione e dei diversi spessori in gioco. A questo scopo sono di particolare utilità misure di taratura effettuate su campioni di materiali differenti e di diversi spessori.

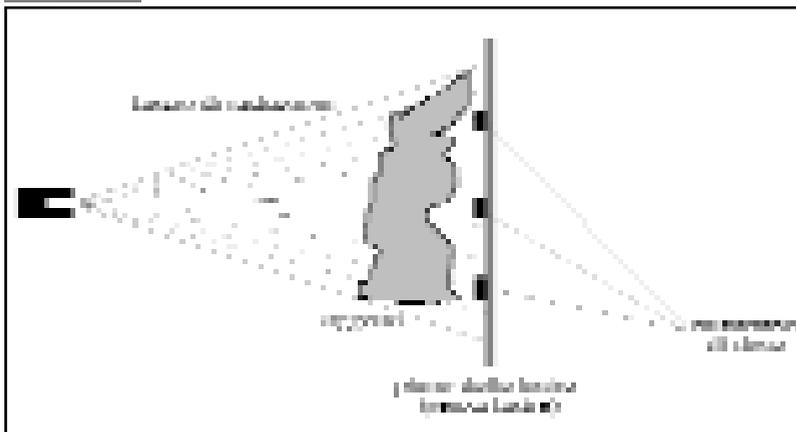
Una volta scelto il tipo di lastra da utilizzare occorre far in modo che sulla lastra stessa arrivi la giusta dose di radiazione per ottenere la densità voluta: questo si può fare variando i parametri del sistema d'irraggiamento che si sta usando. È stato già detto che nel caso di un generatore di raggi X questi sono l'alta tensione, la corrente, la durata e la distanza dalla lastra, ed è stato mostrato come questi influenzano la dose assorbita dalla lastra. Nel caso di sorgenti radioattive i parametri che possono variare sono solamente: tipo di sorgente, che determina l'energia dei raggi gamma, durata dell'irraggiamento e distanza dalla lastra.

Generalmente quando si inizia a radiografare un oggetto si parte per tentativi, cioè in base all'esperienza precedente si stabiliscono le condizioni iniziali, si effettua un irraggiamento e si sviluppa la lastra. Se la densità ottenuta non è quella desiderata si fanno variare i parametri appena indicati per aumentare o diminuire la dose, si effettua un secondo irraggiamento e così via, fino a raggiungere il tipo di immagine, cioè la definizione e il contrasto, desiderato. In genere due o tre tentativi sono sufficienti, e a questo punto si eseguono le radiografie su tutto l'oggetto.

Un metodo diverso è quello di disporre di uno strumento per misurare la dose che arriva, attraverso l'oggetto da radiografare, nella zona in cui saranno posizionate le lastre (figura 33): si effettuano misurazioni di dose in alcuni punti, si esegue la media, e se questa non è quella desiderata si fanno variare i parametri del sistema fino a raggiungerla; quindi si posizionano le lastre e si eseguono le radiografie vere e proprie. I punti in corrispondenza dei quali misurare le dosi vanno scelti in modo che siano rappresentativi di tutto l'oggetto, e quindi devono comprendere sia zone a basso assorbimento che zone ad alto assorbimento.

Questo sistema è molto comodo se non è disponibile nelle vicinanze una camera

Figura 33



**Misura della dose
sul piano delle
lastre**

oscura, e quindi non si può procedere per tentativi. Ovviamente, se si dispone di questo tipo di apparecchiature e si effettuano misure preliminari, è facilitata anche la scelta del tipo di lastre da impiegare.

Quando si fanno variare i parametri del sistema, in particolare per le radiografie, occorre tenere presenti alcuni criteri generali, dettati dall'esperienza, che tengono conto della differente influenza che i diversi parametri hanno sul risultato finale: in particolare l'alta tensione. Piccole variazioni di quest'ultima, infatti, provocano forti variazioni dell'energia media dei raggi X e della dose, e di conseguenza variazioni nel contrasto ottenibile.

Radiografie a contrasto standard. Si definiscono così quelle ottenute ponendo tempo (t), corrente (I) e distanza generatore-lastra (d) ai valori $t = 1-2$ min, $I = 5-10$ mA, $d = 1$ m, e come alta tensione quella necessaria per ottenere la dose richiesta dalla lastra, determinata procedendo per tentativi, come sopra accennato. La lastra ovviamente è posta a contatto dell'oggetto, almeno per quanto lo consenta la sua conformazione: in queste condizioni e con $d = 1$ m, sono trascurabili le alterazioni prodotte dalla sfumatura dovuta alla geometria della macchia focale.

Radiografie ad alto contrasto. Sono quelle ottenute allungando il tempo di esposizione e mantenendo corrente e distanza come nel caso precedente, e al solito ricercando il valore opportuno dell'alta tensione.

Questo tipo di radiografia è quindi ottenuto con tempi di esposizione più lunghi e raggi X di energia minore o, come anche si dice, *più molli*. Poiché energie più basse, come è stato osservato, forniscono generalmente immagini più contrastate, si ottiene un'elevata definizione, cioè si possono distinguere particolari molto sottili e si possono apprezzare piccole differenze di densità. Questo tipo di radiografia si applica normalmente ad oggetti molto sottili e trasparenti ai raggi X, come pergamene, francobolli ecc.

Radiografie a basso contrasto. Vengono ottenute con gli stessi dati di quella a contrasto standard, ma con tempi di esposizione più brevi e con l'alta tensione aumentata di conseguenza, quindi raggi X *più duri* rispetto a quelli utilizzati per la radiografia a contrasto standard. Questo tipo può essere utilizzato per eseguire radiografie di dipinti di grandi dimensioni. Se si utilizza allo scopo non una lastra unica, ma una serie di lastre, la densità media che si ottiene in genere varia lievemente da una all'altra, anche se tutti gli irraggiamenti sono stati eseguiti nelle stesse condizioni. Se infine si ricostruisce l'intero mosaico, su di esso saranno evidenti disomogeneità di densità in corrispondenza delle diverse zone del dipinto. Può essere utile in questi casi l'applicazione della tecnica a basso contrasto, che tende ad omogeneizzare tra loro le singole immagini.

Tutte le considerazioni precedenti sono valide solo nel caso che si utilizzi come fonte di radiazioni un generatore di raggi X che, come è stato detto nel par. 1.2, consente di variare con continuità, entro i limiti imposti dal modello impiegato, la corrente e la tensione di alimentazione, cioè intensità ed energia della radiazione. Nel caso invece delle gammagrafie, quello che si può fare è solo scegliere fra pochi tipi

di sorgenti, e cioè fra pochi valori dell'energia (par. 1.6), e poi giocare sui tempi d'irraggiamento per avere l'opportuna densità radiografica.

Nei casi di irraggiamento unico con mosaico di lastre o con lastra di grandi dimensioni di cui si è parlato nei par. 2.7, 2.10 e 2.11, la determinazione dei parametri di irraggiamento viene effettuata per gradi. Dapprima si individuano, con le modalità descritte in precedenza, i parametri stessi a una distanza ravvicinata, dell'ordine di un metro, posizionando in zone rappresentative dell'intero oggetto misuratori di dose (figura 33) o lastre di dimensioni normali e dello stesso tipo di quelle impiegate nell'irraggiamento definitivo. Si allontana poi la sorgente in modo tale che tutto il piano delle lastre dell'irraggiamento unico rientri nel cono di emissione della sorgente; in queste condizioni occorre aumentare la durata dell'esposizione tenendo conto che la dose di radiazione che raggiunge il piano delle lastre dipende dall'inverso del quadrato della distanza di quest'ultimo dalla sorgente. Se quindi indichiamo con t_r il tempo di esposizione determinato alla distanza di riferimento r , e con t_d il tempo a quella definitiva d , si ha la relazione

$$t_d = t_r (d/r)^2$$

Se, ad esempio, ad 1 metro t_r è 2 minuti, a 4 metri t_d sarà pari a 32 minuti. Si possono poi irraggiare nella configurazione definitiva due o tre lastre di verifica e svilupparle per correggere, se necessario, il tempo di esposizione calcolato; in alternativa le lastre di verifica si possono posizionare sopra il mosaico o sopra la lastra unica, in modo che siano facilmente rimovibili, e svilupparle in successione durante l'irraggiamento per decidere sulla necessità o meno di correggere il tempo di esposizione [Aldrovandi].

4. Altre tecniche radiografiche

4.1 Betaradiografia

Nel par. 2.4 abbiamo parlato del contrasto radiologico, o contrasto di assorbimento, ed abbiamo detto che questo aumenta al diminuire dell'energia della radiazione impiegata. Se però l'oggetto da analizzare è un documento cartaceo, si riesce ad ottenere un effettivo contrasto solo nelle zone in cui sono contenuti elementi pesanti, come ad esempio le miniature dipinte con colori minerali, mentre il supporto rimane del tutto trasparente. Infatti la carta e la pergamena presentano coefficienti di assorbimento molto bassi, anche a basse energie, a causa della loro composizione, che comprende quasi esclusivamente elementi leggeri (carbonio, ossigeno, idrogeno, azoto).

Ciascuna parte ha infatti di per sé un basso assorbimento, e diviene pressoché impossibile percepire la differenza tra parti diverse, cioè il contrasto radiologico diviene così piccolo che l'immagine radiografica del supporto praticamente non fornisce informazioni.

In questi casi come radiazione primaria vengono utilmente impiegati non più i raggi X, ma gli elettroni, o raggi β . Questi ultimi infatti vengono facilmente assorbiti anche da materiali leggeri, permettendo di ottenere buone immagini anche del supporto. Gli elettroni utilizzati vengono emessi da sorgenti radioattive, del tipo di quelle di cui

Tabella 7 - Sorgenti β utilizzabili in radiografia

Elemento	Isotopo	T	Energia max (keV)
Idrogeno	H ³	12,26 anni	18,6
Nichel	Ni ⁶³	92 anni	67
Carbonio	C ¹⁴	5730 anni	156
Zolfo	S ³⁵	88 giorni	167
Promezio	Pm ¹⁴⁷	6,23 anni	224
Calcio	Ca ⁴⁵	165 giorni	252
Kripton	Kr ⁸⁵	10,8 anni	670
Tellurio	Tl ²⁰⁴	3,6 anni	764
Fosforo	K ³²	14,3 giorni	1710
Stronzio-Ittrio	Sr ⁹⁰ + Y ⁹⁰	27,71 anni	2270

abbiamo parlato nel par. 1.6; nella loro scelta occorre tener conto del fatto che esse devono avere, come quelle per la gammagrafia, una vita media sufficientemente lunga. Fra tutte le sorgenti possibili poi sono da preferire quelle che emettono esclusivamente elettroni, quelle cioè per le quali nello schema di decadimento di figura 11 sono assenti i raggi γ . Questi ultimi infatti hanno un'interazione pressoché nulla con la carta, ma impressionano la lastra, generandovi una sorta di rumore di fondo, allo stesso modo della radiazione diffusa di cui abbiamo parlato nel par. 2.5.

In definitiva le sorgenti utilizzabili si riducono a quelle riportate nella tabella 7 [Butaine, Sciuti 1974].

Nella pratica sono largamente impiegate sorgenti di C^{14} , e non solo per la vita media molto lunga, ma anche perché si possono ottenere sotto forma di fogli sottili di polimero organico radioattivo (polimetil- C^{14} -metacrilato oppure polibutil- C^{14} -metacrilato) e questo consente di evitare i problemi di contaminazione durante la manipolazione. Inoltre si possono ottenere fogli flessibili dello spessore da 0,2 mm a 1 mm, che possono essere agevolmente infilati tra le pagine di un volume rilegato. Il flusso di elettroni di cui si dispone con questo tipo di sorgenti è dell'ordine di $2 \cdot 10^4$ elettroni/cm².sec.

Le betaradiografie vengono eseguite ponendo in intimo contatto la sorgente, il documento da esaminare e un'emulsione fotografica del tipo di quelle descritte nel cap. 3. Naturalmente quest'ultima non può essere contenuta in un involucro come mostrato nella figura 27, che avrebbe l'effetto di assorbire gran parte degli elettroni che hanno attraversato il documento, ma va posta essa stessa a diretto contatto del documento; l'irraggiamento va quindi effettuato direttamente in camera oscura.

La durata dell'irraggiamento dipende, come nel caso della radiografia classica, dall'intensità della sorgente, dallo spessore del documento e dal tipo di emulsione impiegato: in genere va da qualche minuto a qualche ora.

Questa tecnica viene impiegata soprattutto per lo studio della filigrana e delle tracce lasciate dal metodo di fabbricazione della carta [Ruggiero, Guida].

4.2 Tomografia assiale computerizzata

Come abbiamo visto nel cap. 3, la radiografia e la gammagrafia presentano alcune difficoltà per quanto riguarda la determinazione della localizzazione, della forma e delle dimensioni di particolari all'interno dell'oggetto esaminato. Queste difficoltà vengono risolte, almeno in linea di principio, dalla tomografia assiale computerizzata (TAC).

Anche quest'ultima si basa sulla proprietà di tutti i materiali di attenuare un fascio di radiazioni elettromagnetiche in funzione della loro composizione e della loro densità. Un tomografo, nella sua configurazione più semplice (figura 34), è costituito da una sorgente di radiazioni X o γ di opportuna energia, da un apparato elettronico in grado di rivelare la radiazione trasmessa attraverso l'oggetto esaminato e da un si-

Figura 34



Schema di un sistema per tomografia

stema meccanico che consente di traslare e di ruotare l'oggetto stesso rispetto all'asse sorgente-rivelatore.

La sorgente è dotata di un collimatore che permette di inviare sull'oggetto un fascio molto sottile di radiazioni, accorgimento che porta ad una migliore definizione dell'immagine ricostruita. Anche il rivelatore è munito di collimatore, che ha la funzione di limitare la radiazione diffusa dalle altre parti dell'oggetto, allo stesso modo del filtro della figura 18.

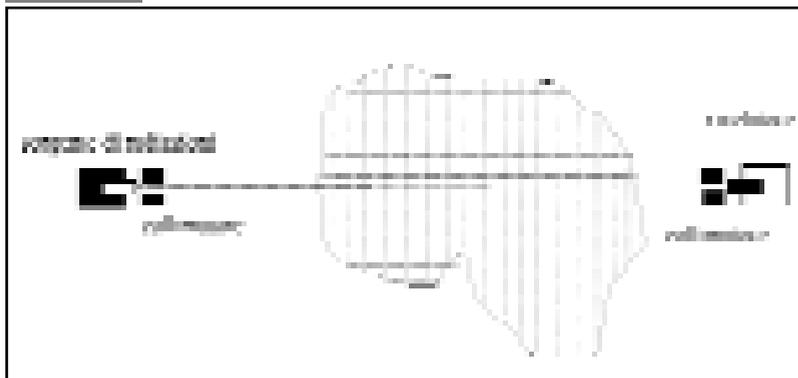
La riproduzione dell'immagine della struttura interna di un oggetto tridimensionale avviene in tre fasi:

- l'oggetto viene idealmente suddiviso in una serie di sezioni orizzontali;
- si ricostruisce l'immagine di ciascuna sezione;
- infine si ricostruisce tridimensionalmente l'oggetto intero.

La terza fase restituisce una visione panoramica dell'oggetto, ma non sempre è necessaria.

Per comprendere il funzionamento della tomografia si consideri la sezione dell'oggetto che si trova sull'asse sorgente-rivelatore, e si immagini di suddividerla idealmente in tanti "elementi unitari" uguali tra loro (figura 35). Per qualsiasi posizione dell'oggetto una misura della radiazione trasmessa consente di determinare l'attenuazione complessiva di tutta la fila di elementi unitari che si trovano sull'asse sorgente-rivelatore, cioè la somma dell'attenuazione di ciascun elemento. Se si esegue una serie di traslazioni, ognuna seguita da piccole rotazioni fino a coprire un arco di 180° (figura 36), e si misura ad ogni spostamento la radiazione trasmessa, ogni elemento unitario sarà "visto" in combinazione con tutti gli altri, ed eseguendo una lunga serie di calcoli si può risalire all'attenuazione prodotta da ognuno di essi. A que-

Figura 35



Suddivisione di una sezione dell'oggetto in elementi unitari

sto scopo il tomografo è gestito da un computer che comanda la sequenza degli spostamenti, l'esecuzione delle misure, l'acquisizione dei dati e infine provvede alla ricostruzione della sezione. Quest'ultima viene rappresentata attribuendo ad ogni elemento il livello di grigio corrispondente al proprio coefficiente di assorbimento.

Evidentemente la ricostruzione sarà tanto più dettagliata quanto più piccole saranno le dimensioni degli elementi cioè, almeno in prima approssimazione, quanto più piccoli sono i passi di traslazione e di rotazione. L'immagine finale rappresenta una sezione dell'oggetto come se fosse stato tagliato secondo il piano di scansione e permette di visualizzare come è fatto internamente.

Un ulteriore sistema di spostamento verticale permette infine di esaminare tutte le sezioni di interesse, e un opportuno programma di calcolo esegue, se necessario, la sua ricostruzione tridimensionale [D'Aversa].

Occorre infine aggiungere che, come nel caso della radiografia e gammagrafia, l'intensità e l'energia della sorgente devono essere scelte accuratamente in funzione del tipo di materiale e delle dimensioni dell'oggetto da analizzare.

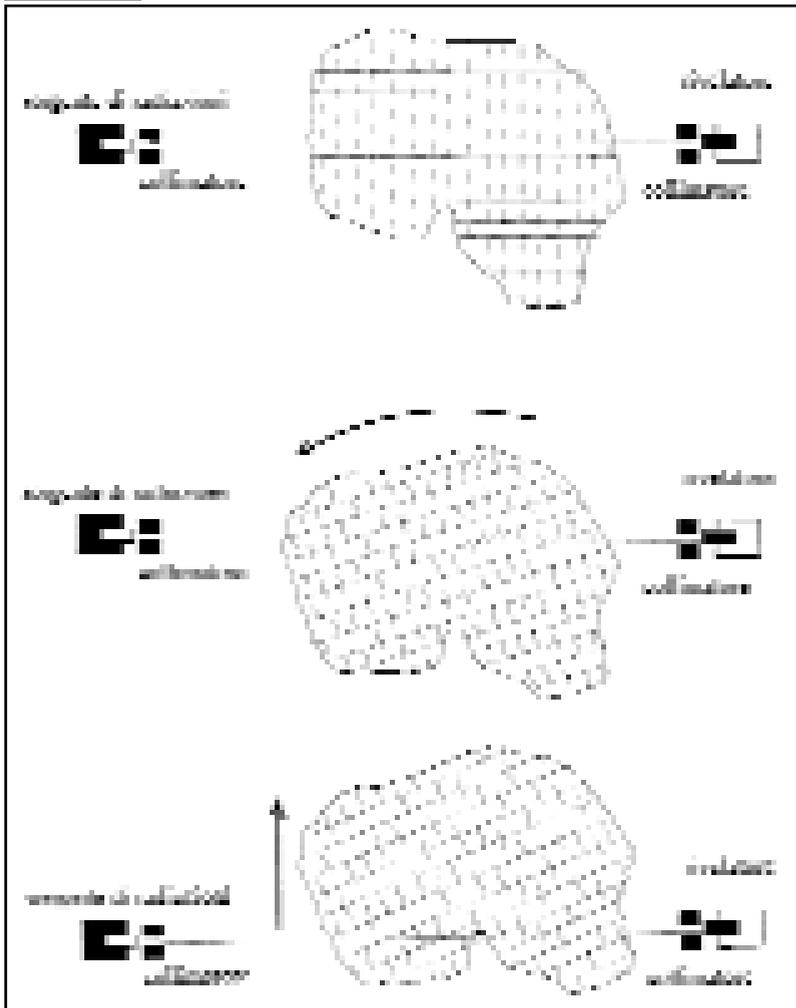
Quello fin qui descritto è il tipo di tomografo detto *a fascio parallelo*. Un secondo tipo è detto *a fascio aperto*: il suo funzionamento è concettualmente uguale al precedente, con le differenze seguenti:

- non esiste il collimatore sulla sorgente, e per questo è detto a fascio aperto;
- invece di un solo rivelatore ne esiste una schiera posta su un arco di cerchio con centro sulla sorgente;
- non viene effettuato il movimento traslatorio, ma solo quello rotatorio.

Ognuno dei rivelatori vede una combinazione diversa di elementi unitari dell'oggetto e questo in qualche modo sostituisce la serie di traslazioni necessarie nel tomografo a fascio parallelo.

Questo secondo tipo può essere progettato in modo da essere smontato ed assemblato intorno ad oggetti inamovibili, in modo che non sia l'oggetto a ruotare, ma l'insieme della sorgente e della schiera di rivelatori. Naturalmente in questo caso diventa difficile far ruotare un generatore di raggi X e inoltre l'oggetto da esa-

Figura 36



Passi di traslazione e rotazione in un tomografo a fascio parallelo

minare è generalmente di dimensioni piuttosto grandi, pertanto sono necessarie energie elevate. In questi casi quindi è possibile operare solo con sorgenti radioattive.

4.3 Radiografia neutronica

Con la radiografia tradizionale vengono messi in evidenza tutti quei materiali densi e pesanti che attenuano un fascio di raggi X o γ mentre non si riesce a dare informazioni sui materiali leggeri, in particolare su quelli contenenti idrogeno, come i composti organici, i materiali plastici ecc.

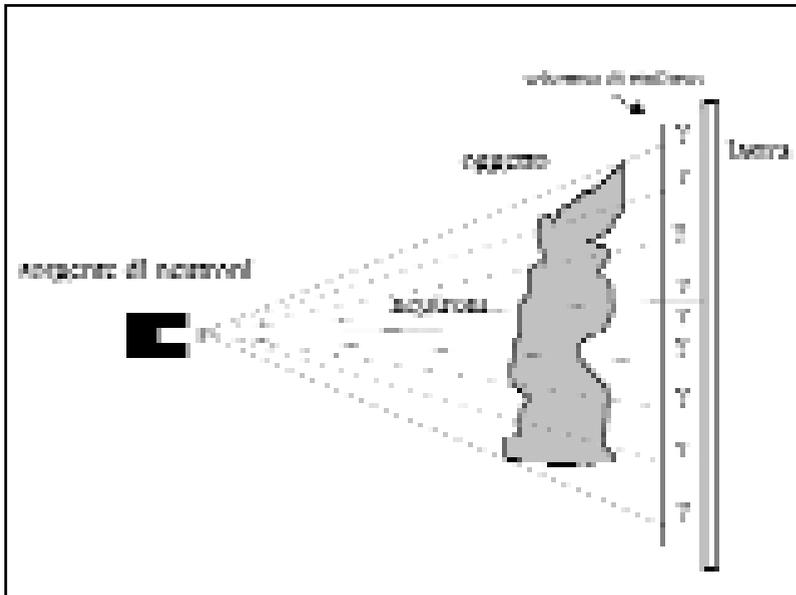
Questo elemento, così come il boro, il litio e altri, è un assorbitore di neutroni più forte di molti elementi più pesanti, quindi se si irraggia un oggetto con neutroni invece che con raggi X o γ , si possono mettere in evidenza quei particolari che sono sfuggiti all'indagine radiografica tradizionale.

Esistono diverse possibili sorgenti per l'emissione di intensi fasci di neutroni: acceleratori, sorgenti radioattive, come il californio (Cf^{252}), reattori nucleari [Diana]. Questi ultimi in pratica sono gli unici che riescono a fornire fasci di neutroni utilizzabili per le radiografie neutroniche.

La disposizione è del tutto identica a quella per le radiografie: i neutroni emessi da una sorgente attraversano l'oggetto da radiografare, vengono in parte assorbiti e la parte trasmessa va a formare l'immagine. Le lastre normali non sono molto sensibili ai neutroni, per cui bisogna ricorrere ad alcuni accorgimenti, i più usati dei quali sono i due descritti nel seguito.

Utilizzo di schermi di rinforzo. Tra l'oggetto e la lastra, e a contatto con questa (figura 37), viene posto un foglio di un metallo, come il gadolinio o il cadmio, che sono forti assorbitori di neutroni e a seguito dell'assorbimento emettono un raggio γ , (si tratta del *γ pronto* di cui abbiamo parlato nel par. 1.6). Sulla lastra non arrivano quindi i neutroni trasmessi dall'oggetto, ma solo i γ emessi dallo schermo di rinforzo. Nelle zone in cui non sono presenti materiali idrogenati verranno trasmessi più neutroni, dalle zone corrispondenti dello schermo di rinforzo verranno emessi più raggi γ , e quindi sulla lastra si avrà una zona più scura.

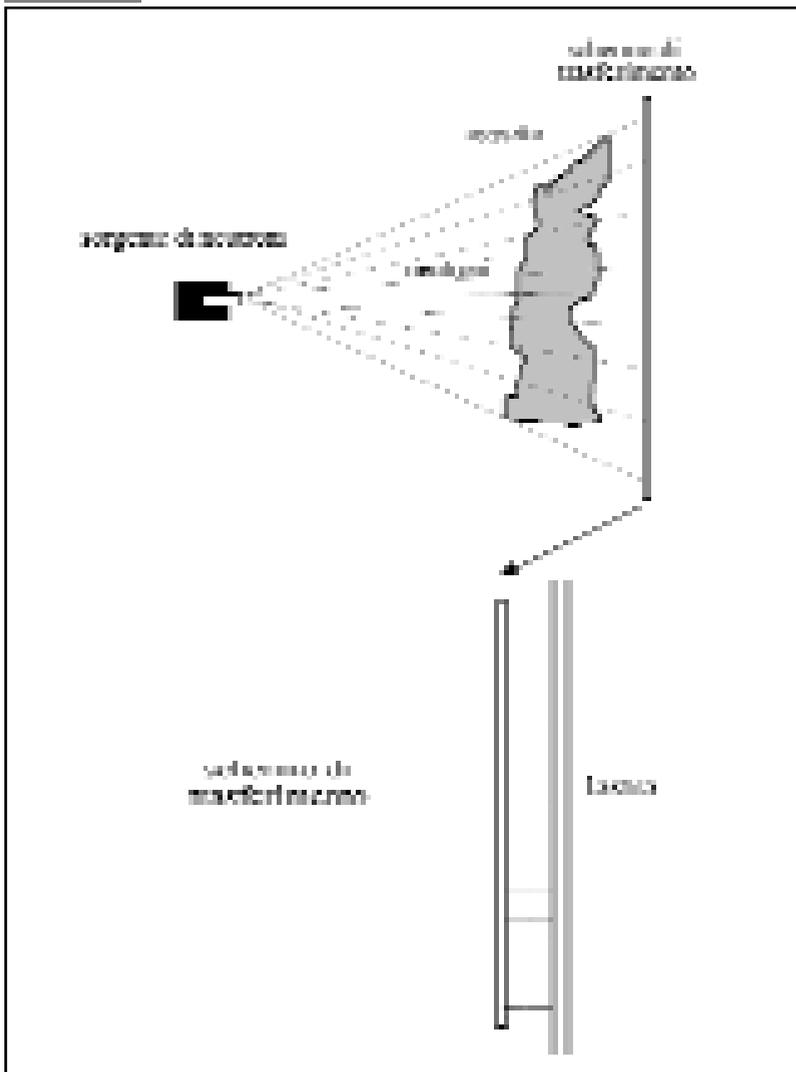
Figura 37



**Neutronografia
con schermo di
rinforzo**

Utilizzo di schermi di trasferimento. Le sorgenti cui abbiamo accennato, insieme ai neutroni emettono anche raggi γ , che costituiscono una radiazione di fondo indesiderata che arriva sulla lastra, come la radiazione diffusa nelle radiografie tradizionali. Per ovviare a questo inconveniente, la neutronigrafia viene eseguita in due tempi, come in figura 38. La lastra viene sostituita da un foglio di materiale metallico, come il disprosio, che diviene radioattivo quando assorbe un neutrone. Sul foglio avremo quindi delle zone più radioattive in corrispondenza alle zone dell'oggetto in cui non sono presenti materiali idrogenati e viceversa. Se dopo un opportuno tempo di irraggiamento si toglie lo schermo di trasferimento e lo si lascia per un certo

Figura 38



Le due fasi della neutronigrafia con schermo di trasferimento

tempo a contatto con una lastra radiografica, i γ emessi dal decadimento radioattivo del disprosio impressioneranno la lastra: in questa fase avviene appunto il trasferimento alla lastra dell'immagine primaria che si era formata sullo schermo.

Con questo sistema si elimina la radiazione γ di fondo emessa dalla sorgente, ma sono necessari tempi complessivamente più lunghi.

4.4 Autoradiografia neutronica

Questa tecnica consiste nel sottoporre l'oggetto da studiare ad un irraggiamento di neutroni, in modo da rendere radioattivi i nuclei dei diversi atomi di cui è composto, come mostrato nella figura 11, e di metterlo poi a contatto con una lastra radiografica in modo che su quest'ultima venga riprodotta la sua immagine. Ricordando quanto detto nel par 1.6, i nuclei radioattivi prodotti decadono infatti emettendo raggi γ che impressionano la lastra, e dopo un tempo più o meno lungo la radioattività dell'oggetto diventa trascurabile.

È una tecnica usata per esempio per recuperare le immagini di fotografie ormai sbiadite o danneggiate dalla sovrapposizione di macchie di origine biologica, quindi inutilizzabili [Sciuti 1979]. Come abbiamo detto, l'immagine su una lastra radiografica è formata da granuli di argento metallico resi neri dallo sviluppo: lo stesso avviene per una fotografia. Questa, così come la lastra, con il tempo tende ad alterarsi, ad ingiallire e sbiadire, finché l'immagine non si vede più. Questo succede perché si producono delle alterazioni chimiche, favorite dall'assorbimento di luce, che tendono ad alterare la colorazione nera dei granuli di argento. Gli atomi di argento però rimangono lì dove li aveva bloccati il fissaggio dell'immagine. Se ora si sottopone la fotografia all'irraggiamento con neutroni, poiché l'argento è un forte assorbitore di neutroni, i suoi atomi diventano radioattivi e decadono emettendo un raggio γ ; se dopo l'irraggiamento si pone la fotografia a contatto con una lastra radiografica, l'immagine della foto, che era divenuta latente, viene recuperata sulla lastra. Il trasferimento deve essere effettuato molto velocemente perché l'argento decade molto rapidamente¹⁸; la vecchia foto già dopo un'ora circa ha una radioattività residua praticamente nulla e può essere maneggiata senza pericolo.

Questo processo può essere impiegato per lo studio dei pigmenti nei dipinti [Sayre]. In questa applicazione l'intero dipinto viene sottoposto al flusso di neutroni presente in alcuni dispositivi di irraggiamento disponibili in un reattore nucleare, rendendo radioattivi i materiali contenuti nello strato pittorico secondo lo schema della figura 11.

Dopo l'irraggiamento, il dipinto viene messo a contatto con la lastra radiografica, che viene impressionata, come in una normale radiografia, dalla radiazione emessa dai nu-

¹⁸ L'argento è costituito in parti quasi uguali di due isotopi: Ag^{107} (51,8%) e Ag^{109} (48,2%), che per assorbimento di un neutrone si trasformano, per quanto interessa l'autoradiografia, rispettivamente in Ag^{108} e Ag^{110} ; il tempo di dimezzamento del primo è $T = 2,42$ minuti, quella del secondo è $T = 24,6$ secondi.

clei che si sono attivati, i cui prodotti di decadimento sono, come mostrato nella figura 11, sia i raggi γ che altre particelle¹⁹. Queste particelle hanno una forte interazione con la materia su cui incidono, tanto che riescono ad attraversare solo spessori molto piccoli, al contrario dei raggi γ la maggior parte dei quali, come abbiamo accennato nel par. 2.2, passa indenne attraverso la lastra. Poiché è necessario rendere lo strato pittorico meno radioattivo possibile sia per evitare danneggiamenti, sia per renderlo fruibile nel più breve tempo, occorre far in modo che l'emulsione fotografica venga impressionata anche da queste particelle. A questo scopo, in camera oscura, la lastra viene tolta dal suo involucro protettivo e messa a diretto contatto con lo strato pittorico attivato. Inoltre dipinto e lastra vengono introdotti in una busta di materiale plastico nella quale viene fatto il vuoto per migliorarne il contatto. Dopo un opportuno tempo di irraggiamento, la lastra viene recuperata e sottoposta a sviluppo e fissaggio come una normale lastra radiografica, ottenendo un'immagine molto simile ad una radiografia.

L'operazione viene ripetuta ad intervalli di tempo: subito dopo l'irraggiamento e poi dopo ore, giorni e settimane, per un periodo complessivo dell'ordine di un paio di mesi. In questo modo con il passare del tempo, i nuclei a tempo di dimezzamento più breve lentamente scompaiono e si riduce progressivamente il numero di elementi radioattivi che rimangono all'interno dello strato pittorico. Ciò vuol dire che le immagini successive sono dovute ad un numero sempre più piccolo di nuclei radioattivi, quindi di elementi, quindi di pigmenti, impiegati nelle diverse campiture. In linea di principio si può cioè ricavare, confrontando le immagini ottenute a tempi diversi, una sorta di mappatura della distribuzione dei pigmenti impiegati. A questo scopo, prima e dopo la registrazione di un'immagine viene effettuata un'analisi delle energie dei raggi gamma emessi, e poiché, come abbiamo detto nel cap. 1, ogni energia è caratteristica di un determinato nucleo, quindi di un determinato elemento, si riesce a determinare quali sono i nuclei, quindi gli elementi, quindi i pigmenti, che hanno contribuito alla formazione delle immagini.

Oltre al riconoscimento e alla mappatura dei pigmenti impiegati, si possono ottenere anche informazioni sulla stesura, osservando l'andamento delle pennellate, e sugli spessori, valutando e confrontando i diversi livelli di annerimento sulla lastra. Non si possono invece avere indicazioni sulla distribuzione stratigrafica, per la quale occorre ricorrere al prelievo di un campione.

Anche questa tecnica, come tutte, ha le sue limitazioni, infatti alcuni pigmenti non possono essere evidenziati. Tra questi ci sono quelli di origine organica perché gli isotopi più abbondanti degli elementi che vi compaiono, come ad esempio il carbonio, l'idrogeno e l'ossigeno, non si attivano, nel senso che danno luogo ad un altro isotopo stabile, e quelli meno abbondanti sono presenti in quantità troppo piccole per contribuire significativamente all'immagine. Altri elementi non osservabili sono il piombo e il ferro; ciò esclude dall'osservazione, ad esempio, la biacca, il minio, il litargirio e tutte le terre.

Per quanto riguarda la radioattività residua, è stato osservato che essa diventa tra-

¹⁹ In realtà possono essere emessi elettroni, positroni e particelle α .

scurabile, ossia confrontabile con quella del fondo naturale (vedi cap. 5), già dopo un paio di mesi. Per quanto riguarda invece la possibilità di danneggiamento a seguito sia dell'irraggiamento di neutroni in reattore, sia della radioattività indotta, tele di riferimento appositamente realizzate sono state sottoposte all'assorbimento di dosi di alcuni ordini di grandezza più grandi di quelle necessarie per ottenere buone immagini e sono stati tenuti sotto controllo negli anni successivi il colore, la fragilità, la flessibilità dello strato pittorico e la solubilità delle vernici senza riscontrare variazioni apprezzabili²⁰.

Con questa tecnica sono stati studiati dipinti di Rembrandt, Van Dyck e Vermeer al Metropolitan Museum of Art di New York [MMA], utilizzando per gli irraggiamenti il Brookhaven Medical Research Reactor.

4.5 Cattura radiativa di neutroni

Questa tecnica di analisi non distruttiva si caratterizza in modo del tutto differente rispetto a tutte quelle sin qui viste, per il fatto di non produrre alcuna immagine; dall'analisi dei dati che fornisce si possono però ottenere indirettamente informazioni sulla struttura dell'oggetto indagato, come si vedrà dagli esempi di applicazione illustrati nel seguito.

La tecnica si basa sul processo di interazione tra un neutrone e il nucleo di un elemento descritto nel cap. 1 e mostrato nella figura 11. Quando un neutrone viene assorbito dal nucleo di un elemento stabile si ha la formazione del cosiddetto *nucleo composto* che si trova in uno stato eccitato, nel senso che contiene in sé un eccesso di energia. Questo eccesso viene espulso dal nucleo quasi istantaneamente con l'emissione di un raggio γ , indicato con γ_p nella figura 11, detto *γ pronto* proprio perché viene emesso immediatamente dopo la cattura, ed è caratteristico del nucleo stesso, nel senso che ogni nucleo lo emette con una sua propria energia. Il nucleo che rimane contiene un neutrone in più di quello di partenza e quindi è instabile e decade con una sua propria *vita media* τ , in genere mediante un decadimento β , seguito immediatamente da un ulteriore raggio γ .

Per le applicazioni della cattura radiativa si tratta di inviare un flusso di neutroni sull'oggetto da esaminare e di analizzare i gamma pronti emessi: dalla loro energia si individua il nucleo, e quindi l'elemento chimico, che ha interagito con il neutrone. Da questo si possono ottenere informazioni, come vedremo in seguito, sulla composizione dell'oggetto sotto esame.

La tecnica di misura è stata originariamente messa a punto dalla NASA, l'Ente spaziale americano, per studi di geologia planetaria, più esattamente per condurre *in*

²⁰ Tenendo conto delle dosi dovuti ai γ provenienti dal reattore, che sono la componente più grande, ai neutroni e al decadimento dei radionuclidi attivati, è stata stimata una dose di 17,4 Gy, mentre le tele di riferimento sono state irraggiate fino a 10^5 Gy senza notare variazioni di flessibilità, fragilità e solubilità e fino a 10^6 Gy senza notare variazioni di colore [MMA].

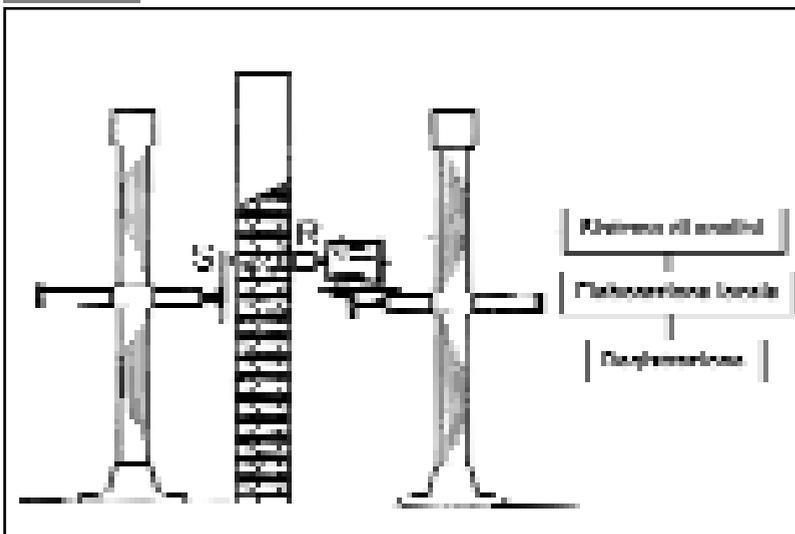
situ l'analisi geologica delle superfici planetarie [Fichtel]. Successivamente è stata applicata alla diagnosi dello stato di degrado di edifici [Evans 1982], in particolare a costruzioni in mattoni del XVII secolo a Williamsburg (Virginia, USA) [Evans 1986] e in Italia a Venezia [Moioli 1985, Moioli 1988].

In quest'ultimo tipo di applicazioni si possono ottenere informazioni sulla distribuzione di diversi elementi lungo la parete osservata, in modo particolare sulla risalita di umidità e sull'accumulo di sali veicolati dall'acqua, e sulla presenza sotto la superficie di materiali da costruzione quali pietre, mattoni e barre di ferro. Il metodo permette inoltre di evidenziare dettagli interni della struttura, in particolare variazioni locali di densità dovute a vuoti o fessure, oppure alla presenza di materiali leggeri, come il legno, non visibili all'esame della superficie.

L'applicazione della tecnica all'esame non distruttivo di strutture di edifici si basa, alla luce di quanto sin qui detto, sull'utilizzo di una sorgente di neutroni e sulla rivelazione dei γ pronti risultanti dalla loro interazione con gli elementi presenti. Nella figura 39 è riportato uno schema della strumentazione necessaria.

Poiché in genere oggetto dell'indagine sono manufatti di grandi dimensioni che devono essere studiati senza il prelievo di campioni, è necessario che la radioattività residua dell'oggetto irraggiato alla fine delle analisi sia trascurabile, e in effetti la tecnica, come vedremo, richiede l'applicazione di flussi neutronici poco intensi per tempi abbastanza brevi, con conseguente trascurabile accumulo di materiale radioattivo. La radioattività indotta è in ogni caso inferiore a quella dovuta agli isotopi naturalmente radioattivi (cap. 1) presenti nel manufatto. Da un lato della parete da analizzare viene posta una sorgente di neutroni (S) e dall'altro un rivelatore dei raggi γ pronti (R) seguito da un sistema di analisi, di elaborazione e di registrazione

Figura 39



**Schema
dell'apparato
sperimentale**

dei dati. Opportuni sistemi di sostegno permettono di spostare solidalmente sorgente e rivelatore da un punto di misura all'altro.

La sorgente è costituita da una piccola quantità di californio e più precisamente di Cf^{252} , il cui numero atomico (98) ne tradisce l'origine artificiale, infatti appartiene alla famiglia degli elementi *transuranici* così chiamati perché l'elemento naturale col più alto numero atomico (92) è l'uranio. Questi elementi, che ovviamente non sono stabili, hanno un nucleo molto grande che tende ad assumere una forma non sferica, ma a goccia (figura 40) sempre più allungata fino a dividersi in due nuclei più piccoli con la contemporanea emissione di due o tre neutroni. Questo processo, detto di *fissione spontanea*, avviene con un *tempo di dimezzamento* $T = 2,64$ anni. I neutroni emessi in questo tipo di decadimento del californio costituiscono la nostra sorgente.

Un γ che penetra nel rivelatore provoca l'emissione da parte di quest'ultimo di un impulso elettrico la cui ampiezza è proporzionale all'energia del γ stesso.

Nella tabella 9 sono riportati i gamma di maggiore interesse pratico per lo studio di strutture murarie [Lone]; si noti che in realtà in ogni singola interazione i gamma che un nucleo (escluso l'idrogeno) emette sono caratterizzati da diverse energie, a cui corrispondono diverse probabilità di emissione, intese come numero di γ emessi ogni 100 interazioni. Si ricordi anche che in ogni interazione possono essere emessi più γ pronti.

Nella tabella 8 sono invece riportati i principali γ emessi dai nuclei naturalmente radioattivi che sono, anche se in piccolissima parte, normalmente contenuti nella parete analizzata. Anche questi raggiungono il rivelatore, che non ha ovviamente modo di distinguere tra questi e i γ pronti ed è quindi costretto ad elaborarli come gli altri.

Tutti questi impulsi vengono selezionati dal sistema di analisi, il quale fornisce al termine della misura, che ha in genere una durata dell'ordine di un ora, uno *spettro* degli impulsi registrati, come quello riportato in figura 41, cioè un grafico del numero di γ registrati per ciascuna energia.

Nello spettro si osservano alcuni sottili picchi (*righe*) la cui altezza rispetto al fondo sottostante è proporzionale alla quantità dell'elemento corrispondente. Nella fi-

Tabella 8 - Principali γ emessi dagli elementi naturalmente radioattivi

Elemento	Energia (MeV)	Elemento	Energia (MeV)
K^{40}	1,461	U^{235}	0,925
Th^{232}	0,239		0,352
	0,338		0,609
	0,583		1,120
	0,727		1,238
	0,911		2,204
	0,969		2,615

Tabella 9 - Principali γ pronti emessi per interazione di neutroni con materiali da costruzione

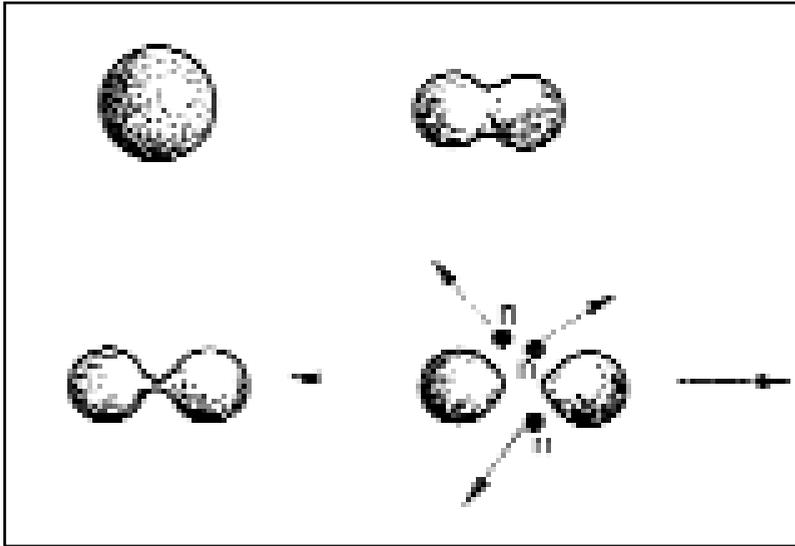
Elemento	Energia (MeV)	Prob. emiss.	Elemento	Energia (MeV)	Prob. emiss.
H	2,223	1,000	Al	2,960	0,080
Mg	0,585	0,256		7,724	0,274
	1,809	0,300	Cl	0,788	0,150
	2,828	0,425		1,165	0,199
	3,054	0,129		1,951	0,217
	3,917	0,486		1,959	0,146
1,273	0,159	2,864		0,069	
Si	2,092	0,215	3,062	0,040	
	3,539	0,680	4,980	0,040	
	4,934	0,627	5,715	0,055	
	6,381	0,124	6,111	0,200	
	1,942	0,726	6,620	0,080	
Ca	2,001	0,100	7,414	0,104	
	4,419	0,149	7,790	0,086	
	6,420	0,389	K	0,770	0,515
	0,341	0,263		1,159	0,084
1,381	0,691	2,074		0,108	
6,418	0,301	5,381		0,089	
6,760	0,242	7,770		0,067	

gura sono evidenziati, tra gli altri, i picchi relativi a idrogeno, cloro, calcio, silicio e ferro. Si notano anche il picco a 2,615 MeV del decadimento naturale del Th²³², tra quello dell'H e il terzo del Si, e quello del K⁴⁰.

L'intensità delle singole righe dello spettro gamma è influenzata, oltre che dalla quantità di elemento presente, dalle variazioni locali di diverse grandezze quali la densità, la presenza di elementi forti assorbitori di neutroni. Per compensare l'influenza delle variazioni di questi fattori all'interno della struttura in esame, piuttosto che considerare le intensità delle singole righe, se ne considera il loro rapporto rispetto ad una dovuta ad un elemento dominante, che si suppone rimanere in concentrazione costante ovunque, tipicamente il silicio.

Infine, per rivelare variazioni della densità del mezzo, insieme alla sorgente di neutroni viene posta una sorgente di Cs¹³⁷, e viene determinata in ogni punto di misura l'intensità della riga a 662 keV, che si vede ovviamente comparire nello spettro di figura 41.

Figura 40



**Schema di
fissione
spontanea**

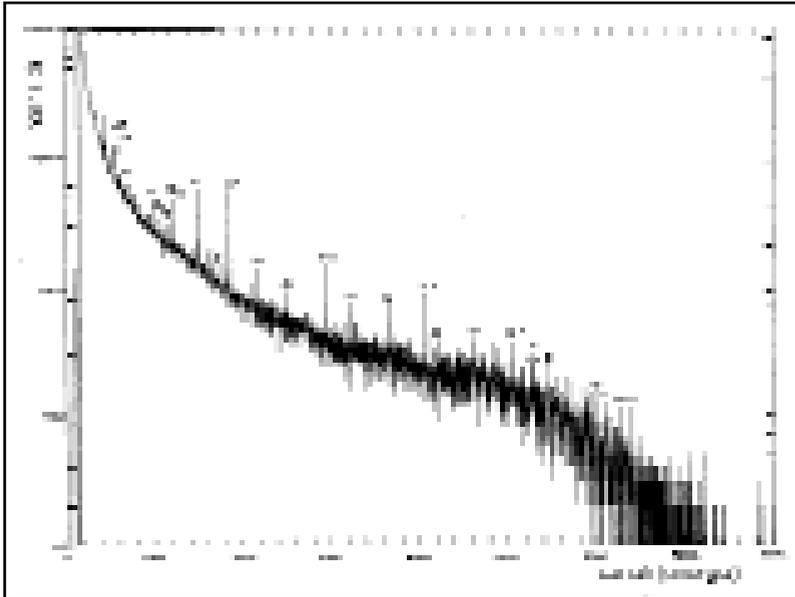
Risoluzione spaziale. I neutroni possono diffondere attraverso larghi spessori di materiale prima di interagire con un nucleo e produrre le righe gamma caratteristiche. Il percorso della radiazione gamma è invece meno esteso e dell'ordine di circa 15-20 cm. Ciò significa che i risultati di una misura sono mediati su un volume semisferico di raggio 15-20 cm intorno al rivelatore (figura 42).

In genere sono sufficienti una sorgente di neutroni di circa $3 \mu\text{g}$ di Cf^{252} con un'emissione pari a circa $8 \cdot 10^6$ n/sec, e una sorgente di Cs^{137} con un'attività di circa $100 \mu\text{Ci}$. Il tempo di misura dipende evidentemente dall'intensità della sorgente, dalla concentrazione nella parete degli elementi di interesse e dalla radiazione di fondo. Nelle condizioni descritte ogni punto richiede normalmente circa un'ora di misura per avere un numero di conteggi accettabile per tutte le righe.

Elaborazione degli spettri. Il sistema di analisi e di elaborazione locale è dotato di un programma di elaborazione degli spettri in grado di fornire rapidamente, al termine di ogni singola misura, le intensità delle righe di ciascun elemento. Questo tipo di elaborazione non è molto sofisticato e, a volte, non è in grado di risolvere tutte le righe dello spettro; in generale però i risultati forniti sono in accordo con quelli ottenuti con codici di calcolo più complessi. La sua importanza deriva dal fatto che si possono ottenere praticamente in linea importanti indicazioni sull'andamento delle misure in corso.

L'elaborazione definitiva viene eseguita normalmente al termine della campagna di misure, su elaboratori remoti e utilizzando codici più complessi, a partire dagli spettri trasferiti su opportuno supporto mediante il sistema di registrazione.

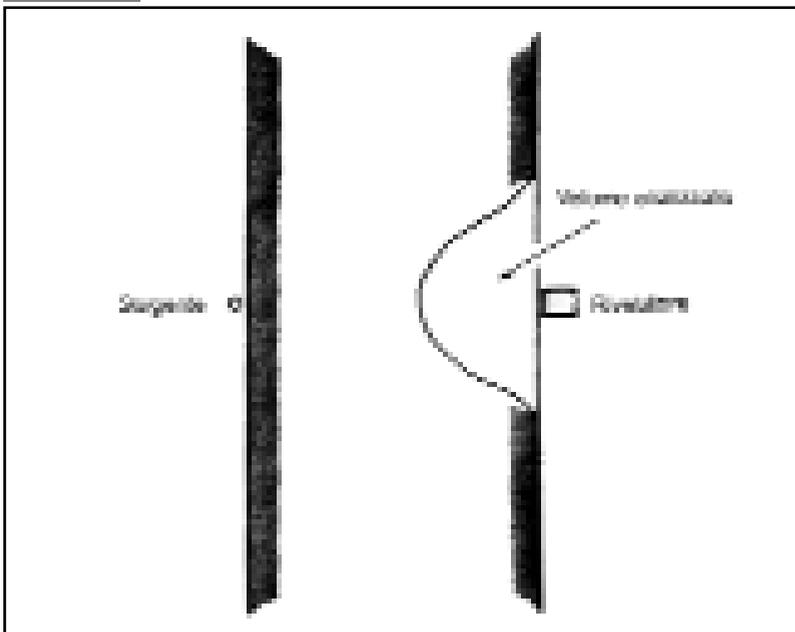
Figura 41



Spettro dei raggi γ
prodotti
dall'irraggiamento
di una parete

Esempi di applicazione: Basilica di S. Marco (Venezia). Sono stati esaminati due pilastri disponendo sorgente e rivelatore su due facce ortogonali dei pilastri, poiché le loro dimensioni non consentivano la disposizione come in figura 39.

Figura 42



Volume analizzato

1-Pilastro della Cappella della Madonna Nicopeia

La collocazione della sorgente e del rivelatore nei vari punti di misura è riportata nella figura 43. Sul muro scoperto è stata eseguita una sola misura con la sorgente e il rivelatore alla stessa quota. Ad una quota più alta, sulla parte ricoperta dal paramento marmoreo, sono state eseguite due scansioni, una orizzontale e una verticale tenendo la sorgente fissa.

I risultati sono riportati nelle tabelle 10 e 11 in funzione della distanza tra sorgente e rivelatore: nella prima le intensità delle singole righe sono riferite, come è stato detto in precedenza, a quella del Si, con l'eccezione di quella del Cs, nella seconda sono riportate in valore assoluto.

L'esame delle due tabelle mostra che:

- l'intensità dell'H diminuisce di un fattore 2 tra la parte scoperta e quella coperta dal paramento marmoreo, e ciò non può essere spiegato con un effetto di schermo da parte di quest'ultimo. Inoltre la differenza, sempre di un fattore 2, tra il punto 4 e 5 non può essere attribuita alla diversa distanza sorgente-rivelatore;
- il rapporto Cl/Si aumenta passando dal punto 1 al punto 2 e al punto 3: ciò può essere dovuto ad un aumento della concentrazione di sale sotto il paramento marmoreo passando dal punto 1 al punto 3. L'andamento di questo rapporto è comunque molto simile a quello di H/Si.

Tabella 10 - Pilastro della Nicopeia. Intensità riferite al silicio

Punto	Distanza S-R (cm)	Na/Si	Cl/Si	H/Si	Ca/Si	Cs
1	47	0,79	1,4	6,9	1,8	2,5
2	47	0,57	2,3	5,4	2,7	1,4
3	51	0	2,5	5,1	2,1	0,41
4	62	0	2,0	3,7	1,9	0,13
5	60	0,63	1,8	5,2	2,3	0,16
6	72	0	1,6	4,3	2,1	0

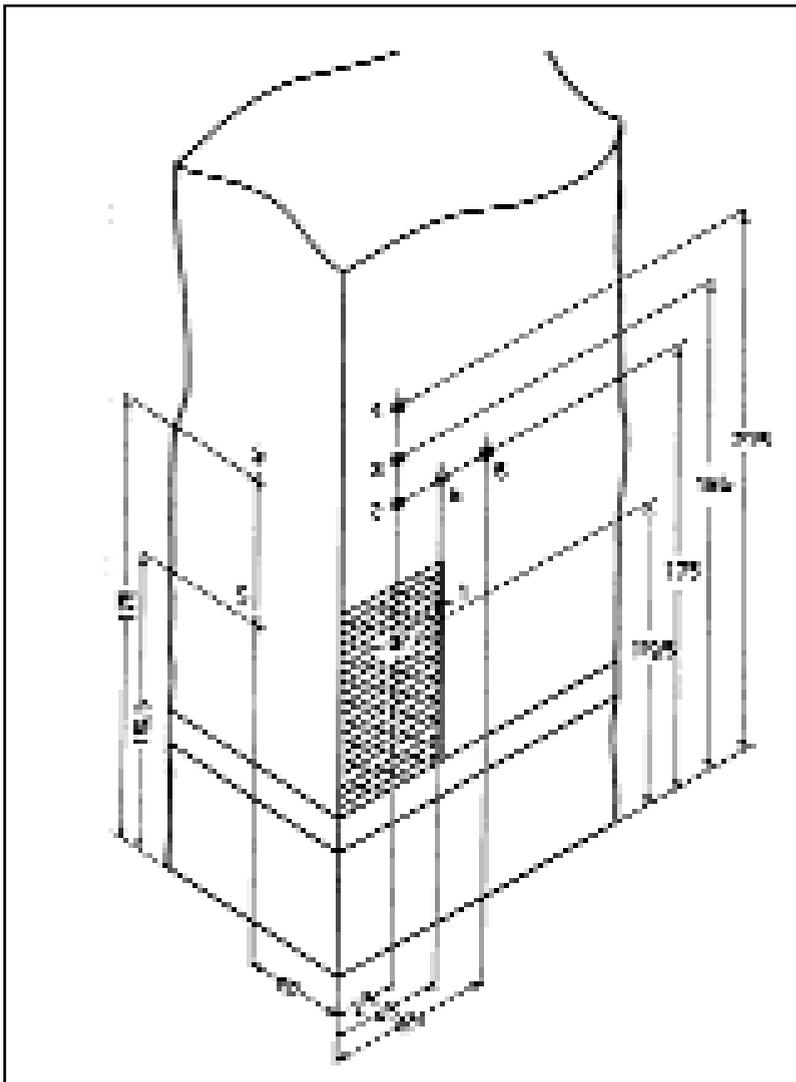
Tabella 11 - Pilastro della Nicopeia. Intensità assolute

Punto	Distanza S-R (cm)	Na	Cl	H	Si	Ca	Cs
1	47	0,11	0,63	1,8	0,142	0,46	2,5
2	47	0,049	0,50	0,83	0,085	0,37	1,4
3	51	0	0,44	0,62	0,072	0,24	0,41
4	62	0	0,19	0,25	0,049	0,15	0,13
5	60	0,037	0,21	0,49	0,058	0,21	0,16
6	72	0	0,075	0,22	0,032	0,11	0

Il rapporto Na/Si diminuisce tra il punto 1 e il punto 2 e poi scompare, eccettuato il punto 5. Poiché questo è alla stessa quota del punto 2, ma ad una distanza dalla sorgente molto più grande, ciò suggerisce la presenza di una forte concentrazione di sale a questa quota, presumibilmente subito al di sotto del paramento marmoreo.

Da queste considerazioni si può dedurre che il contenuto di sale raggiunge un massimo verticalmente fra i punti 1 e 3, intorno alla quota 175 cm, ed è probabilmente intrappolato tra i mattoni e il paramento di marmo. Anche l'umidità sembra raggiungere il massimo in corrispondenza di questo livello.

Figura 43



Basilica di San Marco, punti di misura sul pilastro della cappella della Madonna Nicopeia

Un'approfondita analisi degli andamenti delle intensità di Si, Ca e del rapporto Ca/Si mostrano che deve esserci un aumento di densità intorno alla quota 175 cm dovuta ad una variazione del materiale di riempimento del pilastro, da materiali sabbiosi o pezzi di mattone a pietre (quest'ultimo infatti veniva costruito con un perimetro di mattoni e riempito a sacco all'interno).

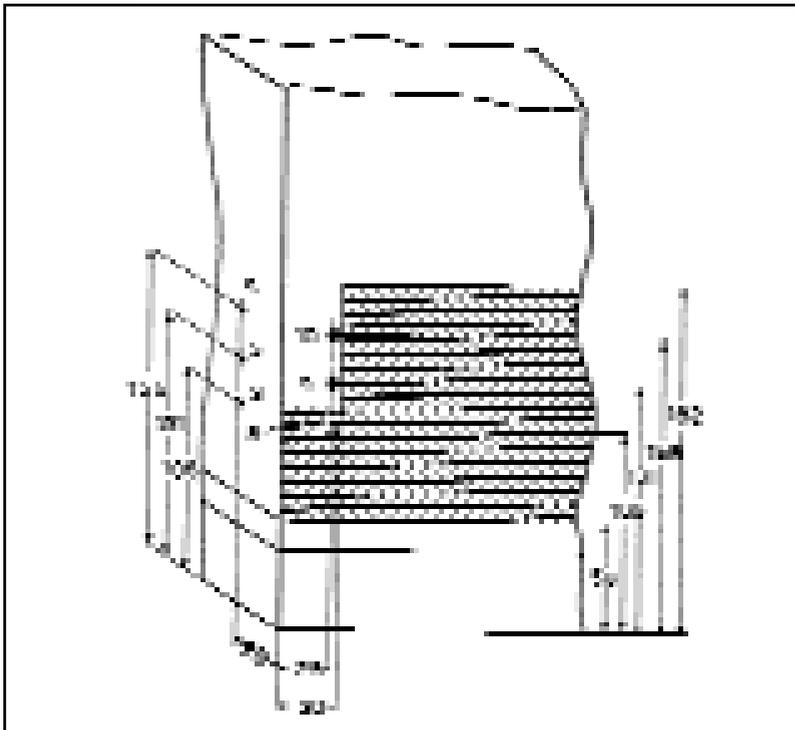
Ciò è coerente con l'aumento di densità mostrato dall'andamento del Cs.

Probabilmente l'umidità e il sale sono imprigionati all'interfaccia tra il materiale meno denso e sabbioso della parte inferiore e quello più denso e pietroso superiore.

2 - Pilastro della Cappella del Santissimo (figura 44)

- I rapporti Ca/Si e Mg/Si aumentano con l'altezza in relazione all'uso di cemento per gli interventi di consolidamento che il pilastro aveva subito qualche tempo prima.
- L'andamento dei rapporti Na/Si e Cl/Si suggerisce anche in questo caso che il sale si sia accumulato subito sotto il paramento marmoreo.
- Infine l'esame dei dati della riga del Cs¹³⁷ rivela una cavità intorno alla quota 106 cm.
- L'aumento del rapporto Fe/Si dal punto 8 ai punti 9 e 10 è dovuto alla presenza di ematite che conferisce al marmo il suo colore rosso cupo.

Figura 44



Basilica di San Marco, punti di misura sul pilastro della Cappella del Santissimo

Palazzo Marcello (Venezia). L'edificio era in fase di restauro, consistente, fra l'altro, nell'isolamento delle pareti dalle fondamenta mediante introduzione di una lastra di piombo e di fogli di carta catramata. Sono state esaminate diverse pareti, in particolare la parete destra del vano d'ingresso dalla parte del Canal Grande, dove era possibile eseguire misure sia al di sopra che al di sotto dell'isolamento.

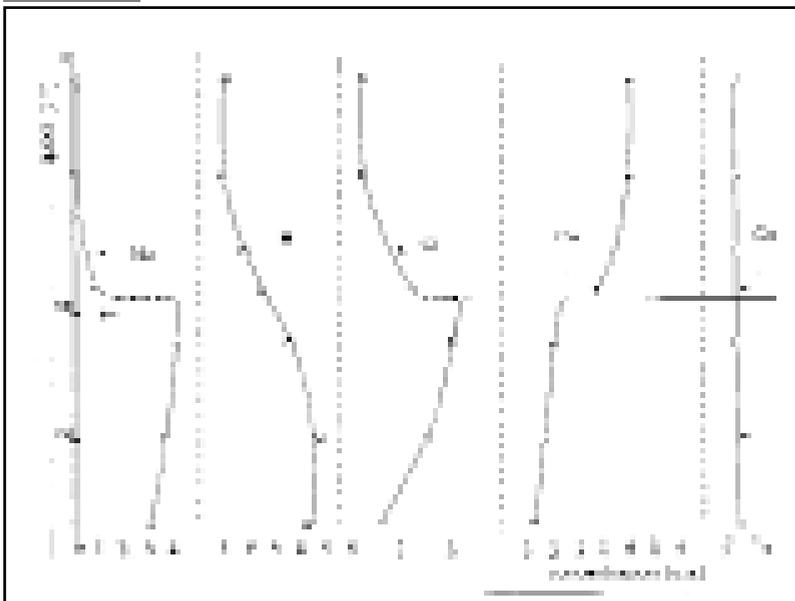
I risultati sono riportati nei grafici della figura 45, dai quali si può dedurre che:

- il contenuto di sale aumenta fino all'isolamento ed è trascurabile al di sopra;
- l'umidità diminuisce con la quota fino a raggiungere un valore 4 volte più basso a circa 45 cm sopra l'isolamento;
- la densità della parte inferiore è di un fattore circa 2,5 più alta di quella della parte superiore rifatta.

Statua di Giove Egioco (Roma, Museo Nazionale Romano). La statua è stata sottoposta ad una serie di analisi volte a determinare la presenza di perni nelle ricomposizioni delle fratture degli arti inferiori, la loro natura e dimensioni, nonché il loro stato di conservazione [Ferretti 1992].

Tra le altre indagini è stata applicata anche la cattura radiativa per determinare la composizione dei perni. A questo scopo sono stati analizzati diversi punti lontano dalle fratture ed alcuni in corrispondenza di queste ultime. Il confronto fra i dati ottenuti nelle due situazioni ha mostrato che la presenza di ferro si manteneva costante, mentre compariva il rame solo in corrispondenza delle fratture, ad indicare che i perni dovevano essere di questo metallo, o di una sua lega.

Figura 45



Palazzo Marcello, andamento della concentrazione di diversi elementi sulla parete destra dell'ingresso dal Canal Grande (Pb indica la posizione degli strati di isolamento)

5. Cenni di radioprotezione

5.1 Effetti delle radiazioni sugli organismi biologici²¹

Nel paragrafo 1.1 abbiamo detto che i raggi X e i raggi γ sono onde elettromagnetiche che si propagano nel mezzo che attraversano trasportando energia; abbiamo anche detto che essi possono essere considerati anche in termini di *fotoni*, cioè di corpuscoli privi di massa, caratterizzati dalla loro energia. Nel paragrafo 2.1 abbiamo invece accennato ai processi fisici attraverso i quali i fotoni interagiscono con la materia cedendo tutta o parte della loro energia. Sulla base di queste considerazioni i fotoni fanno parte delle radiazioni, molto nocive per organismi biologici, che sono in grado di estrarre dagli atomi uno o più elettroni orbitali, rendendoli elettricamente carichi: possono cioè provocare la ionizzazione degli atomi o delle molecole e per questo motivo appartengono alla categoria delle *radiazioni ionizzanti*.

La ionizzazione può provocare negli organismi la rottura di legami chimici tra atomi e molecole, con conseguente alterazione di queste e delle cellule in cui sono contenute. In particolare l'interazione delle radiazioni con i tessuti biologici può provocare il danneggiamento dei costituenti della cellula, tra cui il DNA: la cellula di conseguenza può morire o risultare modificata a tal punto da perdere la capacità di riprodursi, oppure può dare luogo a una riproduzione di cellule modificate.

A questo punto, senza entrare troppo nel dettaglio, è necessario introdurre il concetto di *dose*. Da quanto detto in precedenza risulta infatti chiaro che una quantità fondamentale per la descrizione degli effetti prodotti dalle radiazioni ionizzanti è l'energia che queste trasferiscono al materiale irradiato. Si definisce *dose assorbita* l'energia depositata nell'unità di massa, che nel sistema internazionale di unità si misura in *gray* (Gy): $1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule/kg}$. Analogamente la rapidità con cui la dose viene assorbita si chiama *intensità (o rateo) di dose* e si misura in *gray/ora* (Gy/h).

Poiché le diverse radiazioni ionizzanti (X, γ , α , β , neutroni, protoni ecc.) hanno effetti diversi sui tessuti in funzione della loro natura e della loro energia, si introduce il concetto di *dose equivalente* il cui valore si ottiene moltiplicando la dose assorbita per il *fattore di ponderazione della radiazione* [DLgs 230/95; DLgs 241/00, all. IV], che tiene appunto conto della natura e dell'energia della radiazione in gioco. La *dose equivalente* si misura in *Sievert* (Sv), e il *rateo di dose equivalente* in Sv/h.

Infine, poiché i diversi organi e tessuti del corpo umano hanno sensibilità diverse alle radiazioni, si definisce per ogni organo e tessuto un ulteriore *fattore di ponderazione* [DLgs 241/00, all. IV]. Si ricava in questo modo la grandezza che quantifica

²¹ Il testo che segue è tratto, con alcuni aggiornamenti normativi, da [Seccaroni 2004].

il rischio complessivo per l'individuo, cioè la *dose efficace*, ottenuta sommando la dose assorbita da ogni organo o tessuto moltiplicata per il relativo fattore di ponderazione. Poiché i fattori di ponderazione sono adimensionali (numeri puri), anche la dose efficace e il relativo rateo si misurano in Sv e in Sv/h.

Alla dose che ogni organismo assorbe contribuiscono diverse sorgenti di radiazioni ionizzanti sia naturali sia artificiali. Indipendentemente dalla loro origine, le radiazioni emesse hanno la medesima natura, non si possono cioè classificare "buone" quelle naturali e "cattive" quelle artificiali. Sia le une sia le altre sono da considerare come proiettili in grado di produrre danni cellulari in rapporto alla loro natura e alle caratteristiche del bersaglio colpito, indipendentemente dal modo in cui siano state prodotte.

Le principali fonti di esposizione sono:

- *raggi cosmici*: radiazioni elettromagnetiche di alta energia provenienti dal sole, dalle stelle e dallo spazio intergalattico. Il loro livello è abbastanza costante nel tempo, ma varia con la latitudine e soprattutto con la quota: a 10 km di altezza è circa 100 volte maggiore che al livello del mare (esposizione in alta montagna, e del personale delle linee aeree);

- *radiazione terrestre*: proviene dalle sostanze radioattive naturali presenti nel terreno (suolo, tufo, rocce). È molto variabile da località a località e particolarmente elevata in alcune zone anticamente vulcaniche, ad es. il Viterbese, dove abbonda il tufo, materiale che viene usato anche per la costruzione di edifici. Nel tufo, come nel terreno e nelle rocce, è infatti contenuta una notevole quantità di elementi radioattivi naturali pesanti ($Z > 83$) appartenenti alle serie radioattive dell'uranio e del torio, che nel corso del loro decadimento producono radon, un gas nobile radioattivo che si disperde nell'aria e raggiunge concentrazioni notevoli all'interno delle abitazioni, in particolare d'inverno, quando la ventilazione è scarsa perché si tengono le finestre chiuse [ENEA 1999];

- *ricadute di esperimenti militari*: esplosioni di armi nucleari in atmosfera, effettuate specialmente negli anni 50-60, hanno prodotto consistenti ricadute radioattive, che costituiscono ancora una lieve sorgente di radiazioni;

- *rilasci radioattivi*: gli impianti nucleari in esercizio immettono nell'ambiente piccole quantità di rifiuti radioattivi, in aggiunta ai rilasci localizzati e consistenti che si sono avuti in caso di incidenti, ad esempio quello di Chernobyl;

- *prodotti di consumo*: piccole irradiazioni possono venire da apparecchi televisivi e monitor, da vecchi orologi con quadrante luminoso, per il quale si usava il Ra²²⁶;

- *impieghi industriali*: vengono utilizzati sia generatori di radiazioni (macchine a raggi X, acceleratori ecc.), sia sorgenti radioattive sigillate (gammagrafie, indicatori di livello ecc.) e non sigillate (traccianti);

- *applicazioni mediche*: l'impiego di radiazioni in campo medico, dalla diagnosi alla terapia, contribuisce in maniera significativa all'esposizione della popolazione mediante generatori di radiazione e sorgenti radioattive sigillate e non.

Tutte queste fonti costituiscono le *sorgenti esterne*, cui si aggiungono le *sorgenti interne*, costituite da sostanze radioattive naturali presenti all'interno dell'organismo perché assunte con gli alimenti, come il C^{14} e il K^{40} .

Il danneggiamento di un elevato numero di cellule può produrre effetti immediati: si tratta di effetti acuti caratterizzati dall'esistenza di una soglia di dose, specifica per ciascun effetto, al di sotto della quale esso non si manifesta. Aumentando la dose al di sopra di questa soglia la frequenza con cui esso appare aumenta dapprima lentamente, poi sempre più rapidamente, fino a raggiungere un nuovo valore di soglia al di sopra del quale esso appare in tutti gli individui irraggiati [Polvani]. L'ampiezza dell'intervallo di dose tra la soglia iniziale ed il *valore efficace 100%* dipende dalla diversa risposta biologica degli individui che compongono la popolazione esposta nei confronti dell'effetto immediato considerato: più l'intervallo è piccolo, minore è la variabilità.

Gli effetti acuti, come ad esempio gli eritemi e la caduta di capelli e peli, compaiono in prevalenza a breve distanza di tempo dall'irraggiamento e si presentano prima e con maggiore gravità al crescere della dose assorbita.

Alcuni effetti, come ad esempio la cataratta, possono però presentarsi anche a notevole distanza di tempo: la loro caratteristica è di manifestarsi solo se sono stati superati valori elevati di dose accumulata nel tempo, compaiono in una percentuale degli individui esposti tanto più elevata quanto maggiore è stata la dose, e con gravità crescente con la dose stessa.

Esiste infine un gruppo di effetti che si manifestano nel tempo e che presentano le seguenti caratteristiche: non richiedono il superamento di una dose di soglia, riguardano una percentuale della popolazione esposta molto piccola, che però aumenta con la dose assorbita, si manifestano dopo anni o decenni (effetti tardivi), la loro gravità infine non aumenta con la dose, ma sono del tipo sì/no (tutto o niente). Essi sono dovuti ad alterazioni della struttura cellulare alle quali non consegue subito la morte della cellula, e che possono portare alla comparsa di malfunzionamenti della cellula stessa; tra questi i più gravi sono i tumori e i danni genetici che possono manifestarsi nei discendenti di persone che subiscono irraggiamenti degli organi riproduttivi. Questi effetti tardivi possono comparire anche a seguito dell'assorbimento di piccole dosi e possono quindi interessare anche individui esposti esclusivamente all'irraggiamento quotidiano da parte delle fonti naturali, di cui abbiamo parlato. Questi ultimi individui hanno pertanto una probabilità piccola, ma non nulla, che si manifesti loro uno di questi effetti tardivi.

Questi fenomeni che hanno una piccola probabilità di comparsa vengono denominati *stocastici*, cioè casuali e non deterministici sul singolo individuo esposto. Essi possono essere studiati e valutati solo con metodi statistici, sulla base dell'osservazione

di una popolazione molto vasta. Tali metodi hanno portato alla formulazione di una relazione lineare tra dose e probabilità di avere l'effetto, che è alla base delle raccomandazioni della "Commissione internazionale per le protezioni radiologiche" in materia di scelta dei rischi accettabili e dei livelli massimi ammissibili di dose. Si tratta di un'approssimazione cautelativa, intesa come *pessimistica*, e di agevole uso pratico, tuttavia sono ancora allo studio relazioni funzionali diverse.

Alla luce di quanto sin qui esposto è facile comprendere che il fondamento della radioprotezione dei singoli individui consiste nel limitare la dose assorbita in modo che:

1 - non venga raggiunta la soglia degli effetti immediati;

2 - sia contenuta entro limiti accettabili la probabilità di manifestarsi di effetti stocastici.

Nel seguito verranno trattati tutti quegli aspetti che si riferiscono strettamente all'uso in campo di sistemi che utilizzano generatori di raggi X o sorgenti γ .

5.2 Misura della dose

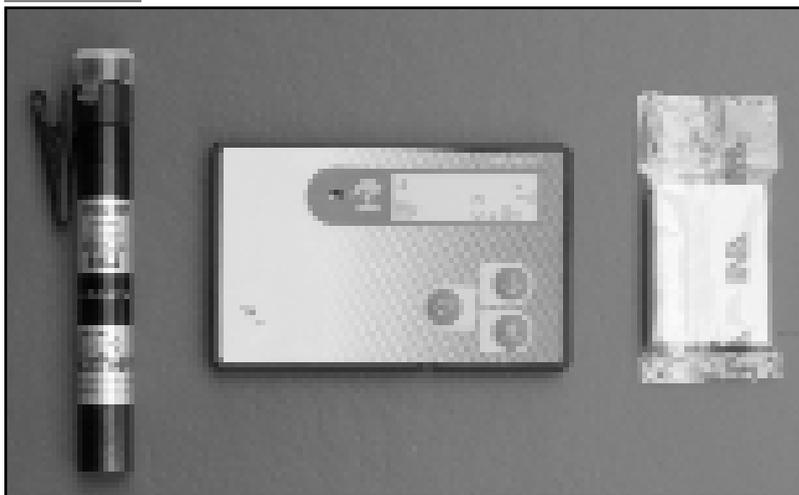
Ogni volta che vengono utilizzate sorgenti di radiazioni, occorre avere a disposizione strumenti capaci di indicare la presenza di radiazioni, il rateo di dose assorbita e la dose assorbita in un tempo determinato.

Questi strumenti si possono suddividere in:

- strumenti portatili, che consentono di misurare il rateo di dose assorbita intorno al generatore o alla sorgente;
- strumenti personali, indossati dagli operatori per indicare la dose assorbita in un certo intervallo di tempo.

Questi ultimi possono essere a lettura indiretta e a lettura diretta (figura 46). I pri-

Figura 46



Da sinistra:
dosimetri a lettura diretta a penna e a card, dosimetro personale a lettura indiretta a termoluminescenza

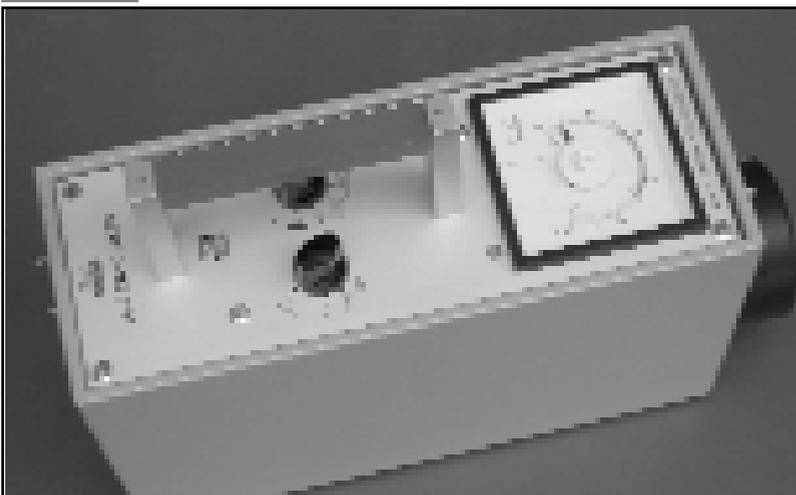
mi sono costituiti da emulsioni fotografiche (dosimetri a pellicola) o da materiali che, a seguito di trattamento termico, emettono luce in funzione della dose assorbita (dosimetri a termoluminescenza), e la lettura della dose assorbita viene effettuata in laboratorio. I secondi invece sono costituiti generalmente da una camera a ionizzazione di forma simile ad una penna stilografica, ad una estremità della quale un sistema di lenti consente di leggere contro luce, dalla posizione di un indice su una scala graduata, la dose assorbita fino a quel momento. Vengono anche utilizzati dosimetri elettronici *a card*, nei quali la dose assorbita viene rivelata da un diodo al silicio, e sono in genere provvisti anche di allarmi di superamento di soglie prefissate.

Gli strumenti portatili (figura 47) consentono di effettuare una mappatura della zona interessata agli irraggiamenti, quindi di individuare le zone in cui si può operare in condizioni accettabili di sicurezza e quelle il cui accesso deve essere interdetto, durante gli irraggiamenti, per la presenza di dosi elevate. Gli strumenti individuali consentono invece di controllare in ogni istante la dose assorbita e quindi di verificare che tutte le operazioni si svolgano nelle condizioni di sicurezza previste (lettura diretta).

Da quanto detto appare chiaro che occorre prendere tutti i provvedimenti necessari per evitare di esporre gli operatori e la popolazione inconsapevole ad irraggiamenti indesiderati. Ciò è soprattutto importante quando si opera in campo, in luoghi cioè non predisposti allo scopo. Nei laboratori attrezzati infatti vengono allestiti locali appositi dotati di tutte le attrezzature e di tutti gli accorgimenti necessari per operare in condizioni di massima sicurezza.

L'esecuzione di radiografie con generatori X in campo deve avvenire in un locale appartato e che non sia di passaggio, dotato del minor numero possibile di porte e finestre. Infatti mentre le pareti, a meno che non siano troppo sottili, costituiscono un valido schermo contro le radiazioni, non altrettanto lo sono le porte e le finestre, an-

Figura 47



**Misuratore
portatile di dose**

che se chiuse. Ovviamente il locale deve essere evacuato e devono essere prese tutte le precauzioni necessarie per evitare qualsiasi ingresso occasionale di passanti ignari delle operazioni che si stanno eseguendo. Il personale addetto alle operazioni deve essere munito degli strumenti per misurare la dose e deve verificare, mediante un graduale aumento dell'energia della radiazione emessa dal generatore fino a quella che si pensa di utilizzare per le radiografie, che la radiazione non sia superiore al fondo naturale lungo tutto il perimetro esterno del locale, ivi compresi il piano superiore e quello inferiore, se esistono. Se questa circostanza non si verifica il locale deve essere ritenuto non idoneo e occorre individuarne un altro.

Più complesso è il discorso per quanto riguarda la gammagrafie, per le quali si utilizzano sorgenti radioattive che emettono raggi γ con energie molto più alte di quelle ottenibili con macchine radiogene portatili, come abbiamo visto al cap. 1. Naturalmente le sorgenti vengono trasportate sul posto entro contenitori appositi che le schermano: la loro estrazione dallo schermo-contenitore e la loro reintroduzione sono necessariamente telecomandate. Poiché questi raggi γ possono attraversare spessori molto grandi, in genere è necessario evacuare anche i locali adiacenti a quello in cui avvengono gli irraggiamenti, e ciò si può fare solo se si opera in edifici particolari, ad esempio musei e gallerie, e non in edifici adibiti ad abitazione. Quasi sempre comunque, a meno che non si disponga di locali particolari, gli irraggiamenti vengono effettuati di notte, quando l'edificio è sgombro di visitatori e di personale. Tutte le operazioni, come detto nel paragrafo seguente, devono essere svolte sotto le direttive e sotto la responsabilità di un *Esperto Qualificato*, che determina le procedure da seguire e i controlli da effettuare durante lo svolgimento delle singole operazioni.

5.3 Alcuni aspetti normativi

L'uso delle radiazioni ionizzanti è regolato da leggi dello stato, che recepiscono direttive emanate dalla Comunità Europea, contenute nel Decreto Legislativo 17 marzo 1995 n. 230 [DLgs 230/95] con le successive integrazioni e modifiche [DLgs 241/00, Gazzetta, DLgs 257/01]. Nel seguito vengono ricordati alcuni aspetti strettamente connessi all'uso di strumentazione portatile per l'esecuzione di irraggiamenti in campo.

- Tutte le operazioni devono essere svolte seguendo le indicazioni di un Esperto Qualificato, iscritto nell'apposito elenco nazionale e nominato dal Datore di lavoro, che determina le procedure da seguire e i controlli da effettuare durante lo svolgimento delle singole operazioni, ivi compresa la custodia delle sorgenti radioattive.

- All'Esperto Qualificato è affidato il compito di redigere un verbale per ogni campagna di misure, contenente le indicazioni relative alla planimetria e alla descrizione dei luoghi e degli ambienti nei quali si sono svolte le attività, la classificazione del-

le zone, le sorgenti di radiazioni utilizzate, le modalità di esecuzione degli irraggiamenti, l'elenco dei partecipanti alla campagna di misura, i risultati della sorveglianza ambientale ed individuale di radioprotezione, le precauzioni adottate per la salvaguardia degli operatori e della popolazione ecc.

- Il Datore di lavoro deve fornire all'Esperto Qualificato informazioni aggiornate sulle sorgenti e sulle macchine radiogene in uso, specificando per ognuna di esse la natura, le caratteristiche fondamentali, gli impieghi usuali e gli estremi di riferimento degli atti autorizzativi.

- L'uso di sorgenti radioattive e macchine radiogene con tensione massima superiore a 200 kV, sia in laboratorio che in campo, deve essere preventivamente autorizzato dalla Prefettura del luogo di residenza abituale; una volta ottenuta, tale autorizzazione si estende automaticamente a tutto il territorio nazionale. Nel caso di impiego in laboratorio, le macchine radiogene con tensione di lavoro massima non superiore a 200 kV sono esentate dall'autorizzazione preventiva [DLgs 241/00, all. IX].

- Il trasporto di sorgenti dal luogo di normale detenzione (laboratorio) a quello di esecuzione degli irraggiamenti e viceversa deve avvenire con automezzi autorizzati allo scopo.

- La sorveglianza della corretta applicazione delle normative di legge è affidata alla struttura sanitaria locale (ASL) competente per territorio, che deve essere avvertita almeno 15 giorni prima dell'esecuzione degli irraggiamenti. Alla stessa ASL deve essere inviata una documentazione in cui si dimostri che la radioprotezione dei lavoratori e della popolazione è garantita dalle caratteristiche proprie delle sorgenti di radiazione che intervengono nella pratica e dalle modalità di impiego di esse, indipendentemente dalle caratteristiche dell'ambito in cui l'impiego avviene, e una specifica relazione sul verificarsi delle condizioni appena dette, con riferimento all'ambito di impiego specifico (DLgs 230/95, Allegato IX, punto 7).

- Il personale addetto alle operazioni deve essere classificato dall'Esperto Qualificato sulla base della dose di radiazione cui il personale stesso si prevede venga esposto a causa dell'attività svolta. In particolare viene classificato di categoria A se è suscettibile di ricevere nel corso di un anno solare una dose superiore ad un valore limite stabilito e aggiornato con decreto dei Ministri del lavoro e della sanità. Se non si prevede tale superamento la classificazione è di categoria B; in entrambi i casi il personale deve essere sottoposto a controllo medico periodico.

- Infine durante lo svolgimento delle operazioni, il personale che vi partecipa deve essere munito di strumenti (*dosimetri*) individuali, meglio se a lettura diretta, per il controllo della dose assorbita.

6. Tavole

Le tavole che seguono costituiscono una succinta raccolta di esempi, selezionati tra i tanti presenti nell'archivio ENEA del Centro Ricerche della Casaccia. Esse sono state raggruppate secondo la tipologia dei manufatti analizzati: ceramiche, lapidei, manufatti lignei, dipinti su tavola e su tela. La casistica mostrata non ha la pretesa di essere esaustiva, né ha la presunzione di mettere a punto un vademecum onnicomprensivo per la diagnostica radiografica; vuole invece fornire una serie di spunti e di riflessioni su alcune informazioni desumibili dalla lettura delle immagini radiografiche.

Nella presentazione del materiale si è preferito concentrarsi su dettagli, alcune volte di dimensioni contenute, piuttosto che sulle immagini intere, per focalizzare l'attenzione sulle caratteristiche specifiche indicate nelle didascalie.

Ogni immagine radiografica, salvo pochissime eccezioni, è corredata di una scheda con i parametri operativi, la cui conoscenza è necessaria per una corretta lettura delle lastre. Le eccezioni sono dovute all'impossibilità di reperire i parametri in archivio: si tratta infatti di interventi eseguiti in tempi relativamente lontani.

Per quanto riguarda le gammagrafie, la durata degli irraggiamenti e la distanza sorgente-lastra sono molto variabili, non solo a causa delle differenze nei materiali indagati e delle loro dimensioni, ma anche a causa del decadimento delle sorgenti di Co^{60} e Ir^{192} impiegate, la cui attività, com'è stato detto nel cap. 1, è andata diminuendo nel tempo.

Per radiografie di cui si disponeva della lastra originale, e non solamente della immagine digitalizzata, è riportata la dimensione orizzontale della parte riprodotta: ciò consente di valutare, se necessario, le dimensioni reali dei particolari.

TAVOLA 1



Vaso biconico con collo “a tromba” e base piatta, Thailandia, tarda età del bronzo, 1000-500 a.C., Roma, Museo Nazionale d’Arte Orientale (inv. 17404, h 14,3 cm; larghezza originale dell’immagine sulla lastra: 170 mm).

All’interno dell’impasto ceramico sono visibili rari inclusi di materiale più radiopaco rispetto alla matrice, costituiti probabilmente da granuli di silice.

tensione	60 kV
corrente	5 mA
distanza	85 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D4

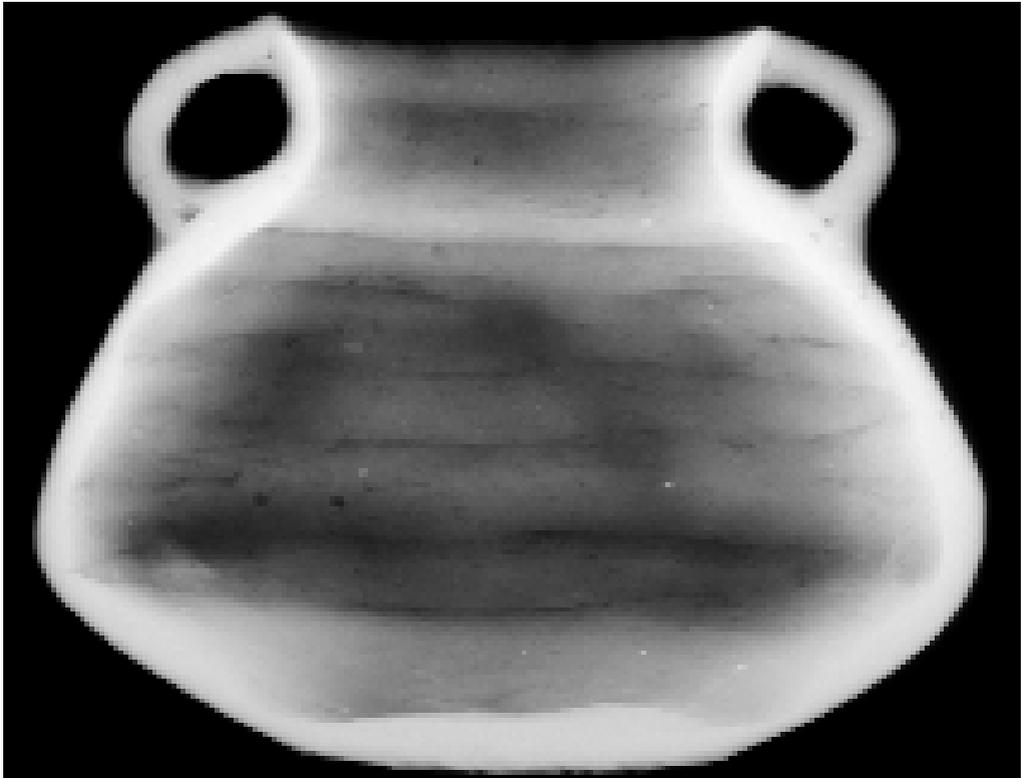
TAVOLA 2



Olla biancata, Cina nord-occidentale, 2300-1800 a.C., Roma, Museo Nazionale d'Arte Orientale (inv. 17570, h 17 cm; larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 160 mm). L'impasto ceramico mostra una marcata disomogeneità nella composizione e nella granulometria degli inclusi presenti.

tensione	100 kV
corrente	5 mA
distanza	100 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 Pb

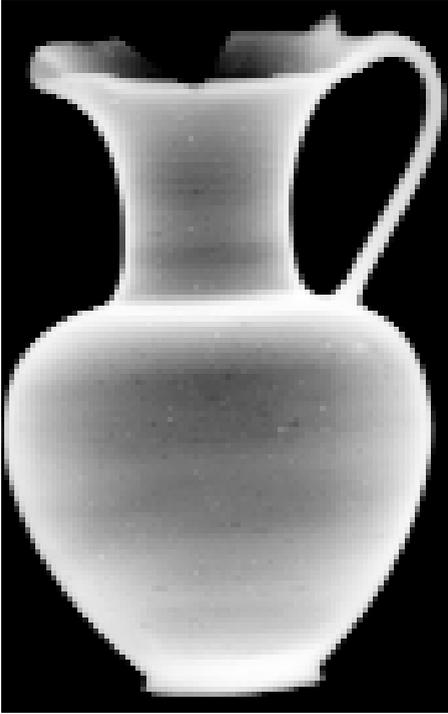
TAVOLA 3



Olletta a corpo biconico, Cina nord-occidentale, 2300-1800 a.C., Roma, Museo Nazionale d'Arte Orientale (inv. 15442, h 9,5 cm; larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 140 mm).

È chiaramente visibile la struttura di accrescimento con cui è stato realizzato il manufatto, con la tecnica del colombino (o cercine).

tensione	55 kV
corrente	5 mA
distanza	100 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 Pb

TAVOLA 4

Oinochoe, ex collezione Gorga, V-IV sec. a.C., ceramica attica in deposito presso il Museo Nazionale d'Arte Orientale, Roma, generale (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 220 mm) e particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 135 mm). La presenza di bolle schiacciate e fortemente orientate attesta una lavorazione al tornio.

tensione	60 kV
corrente	4 mA
distanza	85 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D4 DW



TAVOLA 5

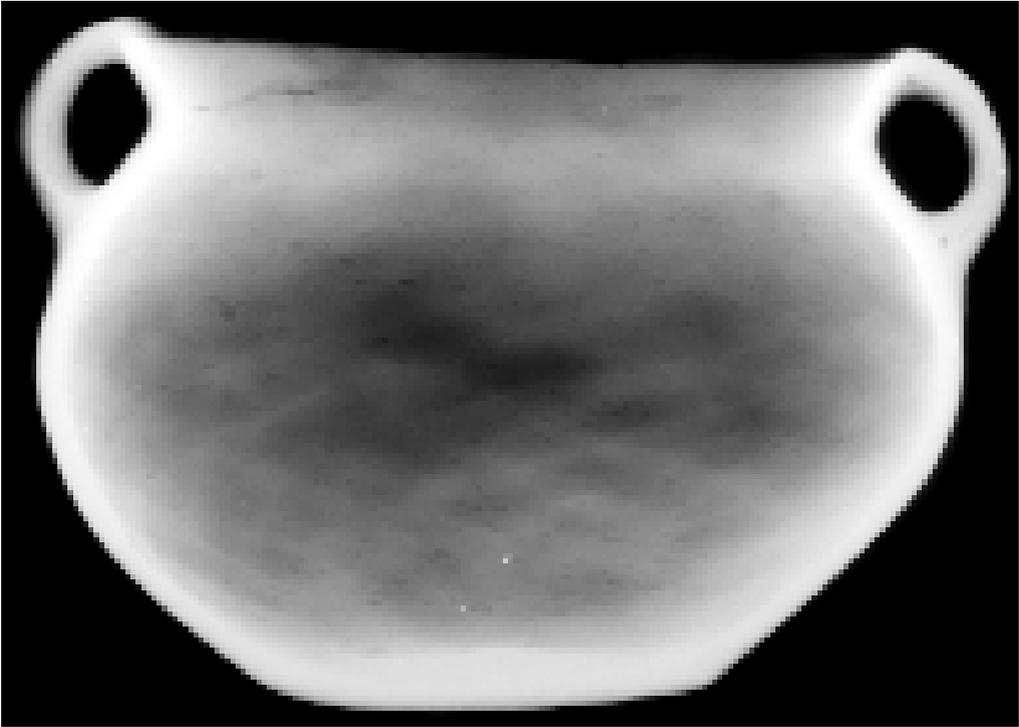
Kylix, ex collezione Gorga, fine VI-inizio V sec. a.C., ceramica attica in deposito presso il Museo Nazionale d'Arte Orientale, Roma, generale (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 180 mm) e particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 40 mm).

La presenza di bolle schiacciate e fortemente orientate attesta una lavorazione al tornio.

tensione	60 kV
corrente	4 mA
distanza	85 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D4 DW



TAVOLA 6

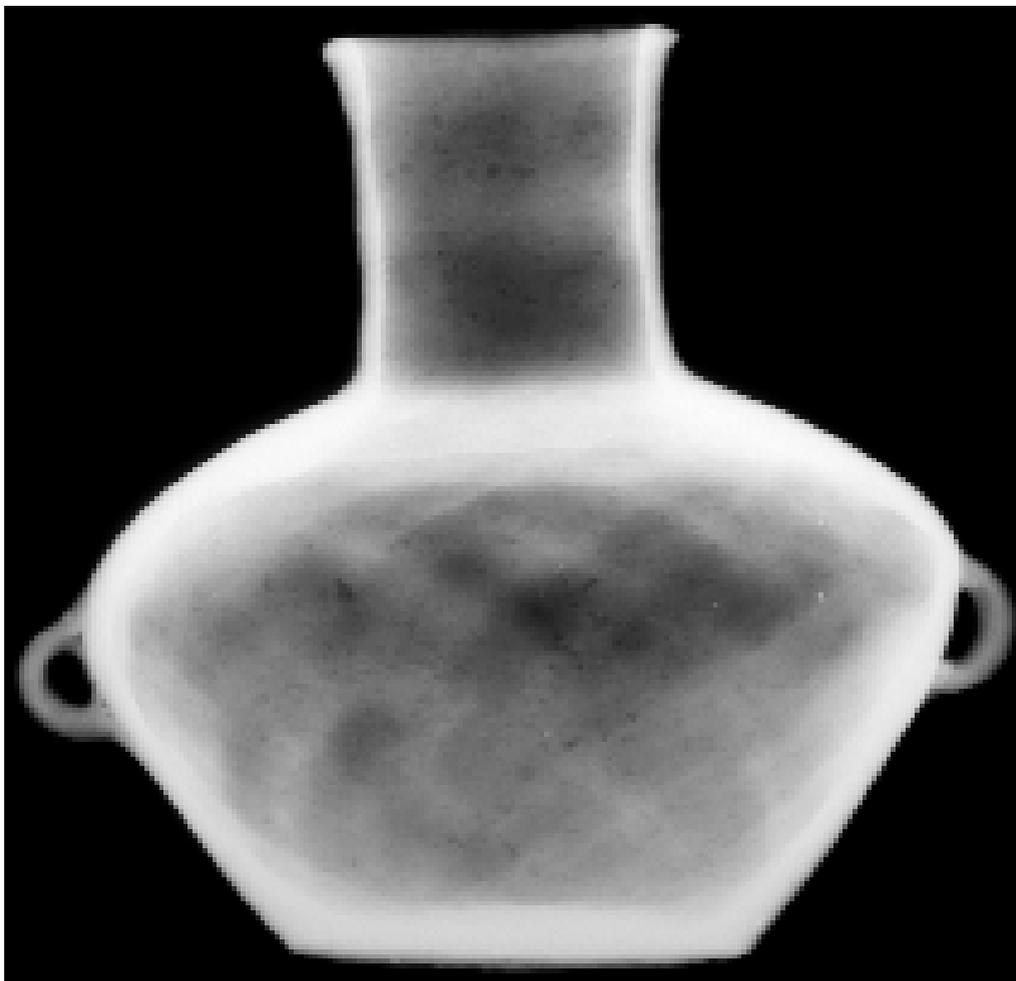


Olla biansata, Cina nord-occidentale, 2300-1800 a.C., Roma, Museo Nazionale d'Arte Orientale (inv. 17572, h 12 cm; larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 200 mm).

È chiaramente visibile l'andamento delle tracce di utensili (stecche o spatole) impiegati per lisciare la superficie del vaso.

tensione	55 kV
corrente	5 mA
distanza	100 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 Pb

TAVOLA 7



Olletta a corpo globulare, Cina nord-occidentale, 2700-2000 a.C., Roma, Museo Nazionale d'Arte Orientale (inv. 14979, h 14,3 cm; larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 175 mm).

Anche in questo caso appare chiaramente leggibile l'andamento delle tracce impresse dagli utensili (stecche o spatole) impiegati per lisciare la superficie del vaso.

tensione	60 kV
corrente	5 mA
distanza	100 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 Pb

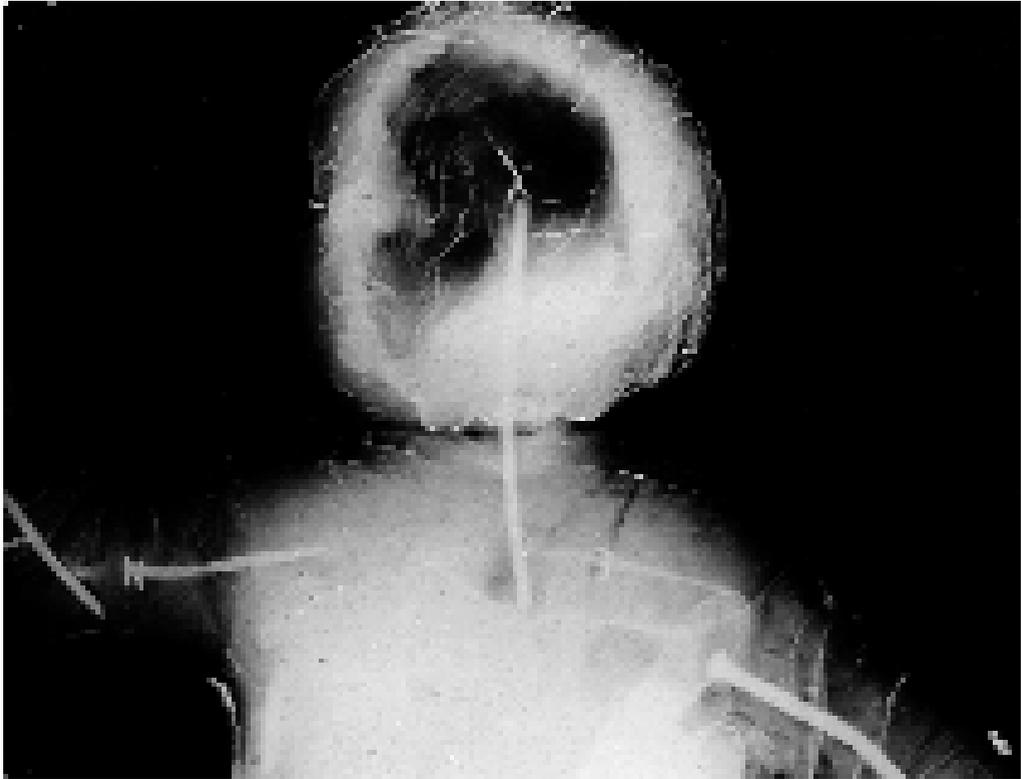
TAVOLA 8



Apollo di Veio, fine del VI sec. a.C., terracotta policroma, Roma, Museo Nazionale d'Arte Etrusca di Villa Giulia, particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 143 mm). La radiografia mostra la presenza di una sottile rete metallica, subito al di sotto della superficie, usata a sostegno del materiale con cui sono state plasmate le parti di rifacimento che raccordano i frammenti originali.

tensione	100 kV
corrente	4 mA
distanza	80 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 Pb

TAVOLA 9

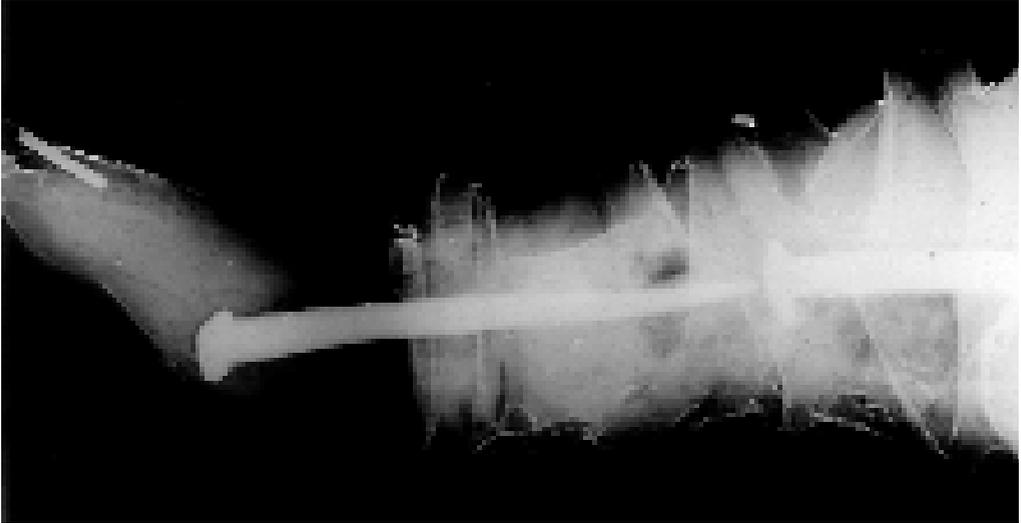


Guido Mazzoni, *Gruppo Porrini* (1489 circa), terracotta policroma, Modena, Cattedrale, particolare della testa del Bambino.

La radiografia evidenzia la presenza di numerosi perni metallici, impiegati per la ricomposizione della statua.

tensione	110 kV
corrente	4 mA
distanza	90 cm
t. esp.	92 sec
lastre	Agfa D7

TAVOLA 10



Guido Mazzoni, *Gruppo Porrini* (1489 circa), terracotta policroma, Modena, Cattedrale, particolare dell'avambraccio destro della Madonna.

Si evidenzia la presenza di un grosso chiodo impiegato come perno di sostegno dell'attacco della mano al polso.

tensione	100 kV
corrente	4 mA
distanza	88 cm
t. esp.	84 sec
lastre	Agfa D7

TAVOLA 11

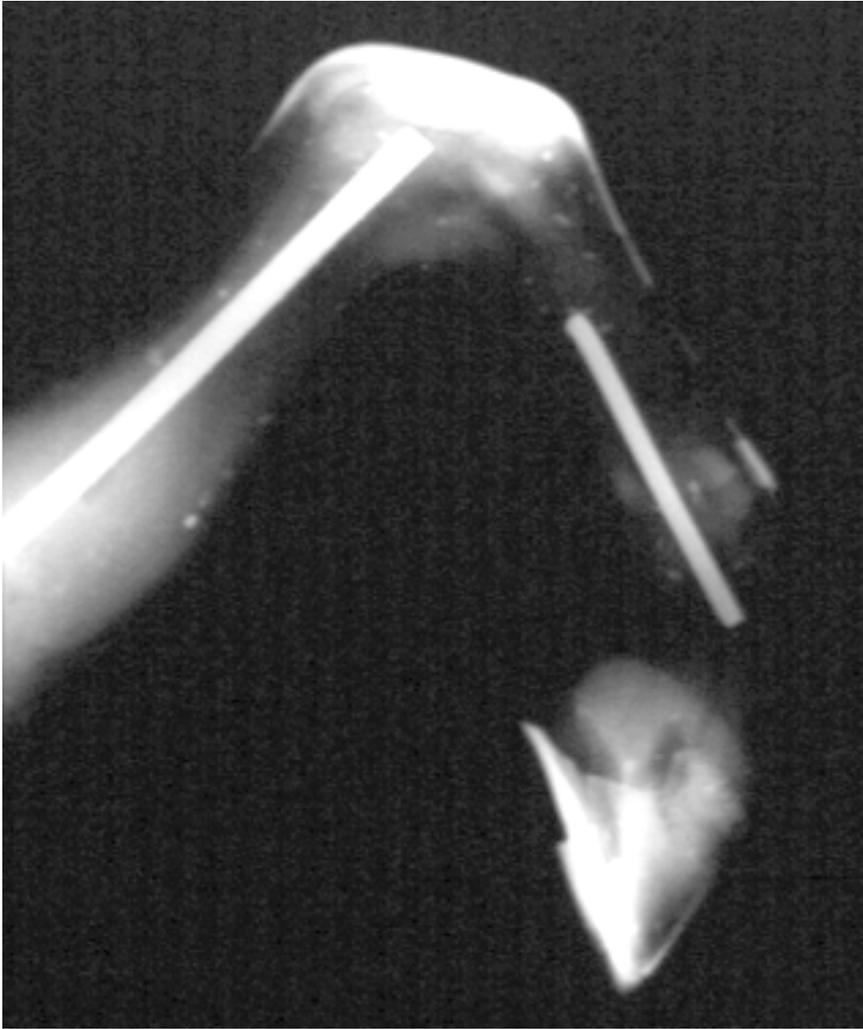


Guido Mazzoni, *Gruppo Porrini* (1489 circa), terracotta policroma, Modena, Cattedrale, particolare della mano destra della fantesca.

Si evidenzia la presenza di numerosi perni metallici per ricongiungere le dita e il polso.

tensione	90 kV
corrente	4 mA
distanza	80 cm
t. esp.	84 sec
lastre	Agfa D7

TAVOLA 12



Gianlorenzo Bernini, *Modello per il monumento equestre di Luigi XIV* (1669 circa), terracotta, Roma, Galleria Borghese, particolare della zampa anteriore sinistra del cavallo. Sono chiaramente leggibili alcuni elementi metallici di rinforzo e/o sostegno, inseriti in fase di realizzazione dell'opera.

tensione	70 kV
corrente	8,9 mA
distanza	80 cm
t. esp.	90 sec
lastre	Agfa D7

TAVOLA 13



Galata suicida, copia romana da originale greco (I sec. d.C.), marmo, Roma, Palazzo Altemps - Museo Nazionale Romano (Collezione Ludovisi), visione generale e particolare della gammagrafia del braccio destro della donna (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 262 mm).

L'immagine gammagrafica mostra una situazione molto articolata. In basso si nota buona parte del perno che ricongiunge l'avambraccio; sono evidenti il disallineamento dei fori di alloggiamento praticati nei due frammenti ricomposti e, su ciascun frammento, i canali di adduzione della colata di piombo per bloccare il perno. In alto sono invece visibili l'estremità inferiore del perno metallico di ancoraggio dei monconi nella parte superiore del braccio della donna e alcuni elementi metallici che agganciano il braccio della donna alla gamba sinistra dell'uomo; anche in questo caso il perno è serrato con una colata di piombo. Gammagrafia effettuata con una sorgente di Ir¹⁹².

TAVOLA 14

Galata suicida, copia romana da originale greco (I sec. d.C.), marmo, Roma, Palazzo Altemps - Museo Nazionale Romano (Collezione Ludovisi), particolare della gammagrafia della gamba destra dell'uomo, all'altezza del polpacchio (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 98 mm).

Si osserva un lungo perno metallico bloccato con una colata di piombo che si infila parzialmente in un vuoto lungo la linea di giunzione della frattura; è inoltre visibile il canale di adduzione della colata. Gammagrafia effettuata con una sorgente di Ir¹⁹².

TAVOLA 15

Galata suicida, copia romana da originale greco (I sec. d.C.), marmo, Roma, Palazzo Altamps - Museo Nazionale Romano (Collezione Ludovisi), particolare della gammagrafia del frammento compreso tra l'avambraccio e il braccio sinistro della donna e la mano sinistra dell'uomo (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 340 mm). La parte del braccio della donna comprendente il gomito è di rifacimento. Al suo interno è inserito un perno metallico bloccato senza l'impiego di un serraggio con il piombo. Una volta reso solidale con il pezzo di rifacimento, il perno è stato agganciato all'originale con una colata di piombo. l'accesso alla colata è stato ottenuto praticando un foro che partendo dal rifacimento, poco al di sotto della giunzione, penetra nel moncone originale, raggiungendo l'alloggiamento del perno. Il fronte irregolare della colata e gli spazi rimasti vuoti indicano che il piombo non è risalito molto, penetrando solo parzialmente nel meato, a causa del raffreddamento che ne ha provocato la solidificazione. Nella parte visibile della mano sinistra dell'uomo è leggibile un piccolo perno che ancora l'indice, mentre il frammento del pollice è stato riattaccato senza l'ausilio di un perno, probabilmente perché in questo caso il contatto sia durante la presa che in seguito è favorito dalla gravità, in quanto il peso del frammento riattaccato è scaricato ortogonalmente alla superficie del braccio della donna. Al contrario, le altre dita toccano lateralmente il braccio della donna e, quindi, tendono a scivolare senza incontrare alcuna resistenza. Gammagrafia effettuata con una sorgente di Ir¹⁹².

TAVOLA 16



Discobolo Lancellotti, copia romana da originale greco (II sec. d.C.), marmo, Roma, Museo Nazionale Romano, visione generale e particolare della gammagrafia della mano sinistra (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 154 mm).

Sono visibili i perni metallici di ancoraggio ai vari frammenti. Indice, medio e anulare sono vincolati ciascuno con un singolo perno, mentre ne sono stati impiegati due per il pollice. Al contrario, nel mignolo il perno risulta assente, anche se è stato praticato un foro per il suo alloggiamento sulla mano, ma non sul dito.

sorgente	Ir^{192}
attività	$8,1 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$
distanza sorgente-lastra	45 cm
lastre	Agfa D7 Pb

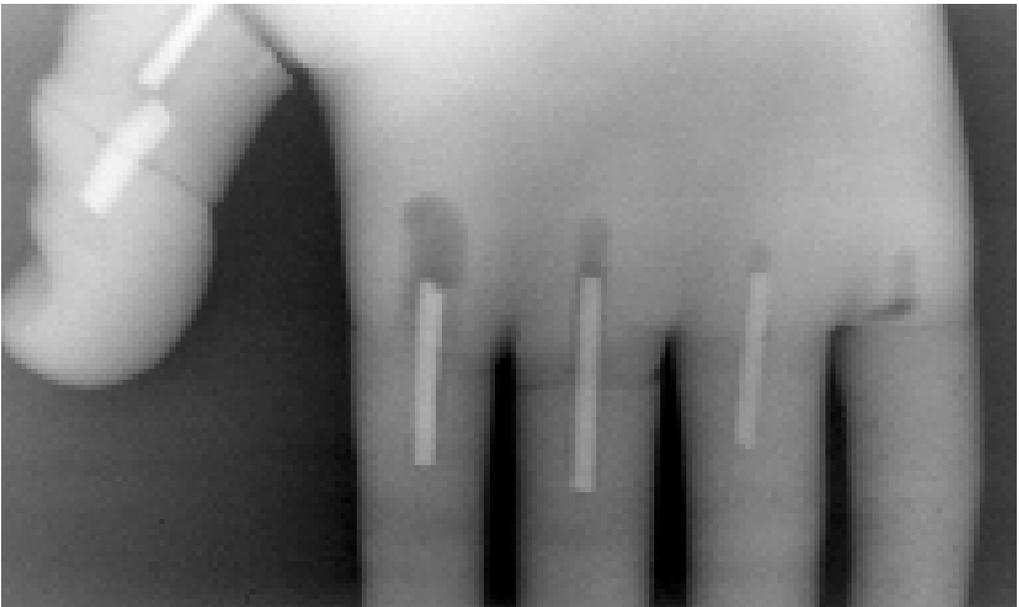


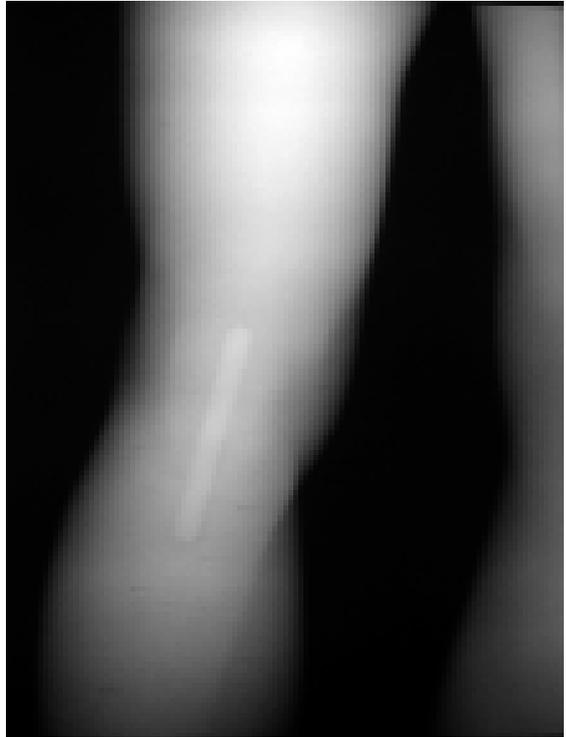
TAVOLA 17

Discobolo Lancellotti, copia romana da originale greco (II sec. d.C.), marmo, Roma, Museo Nazionale Romano, particolare della gammagrafia del tronco di sostegno, accanto alla gamba sinistra (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 180 mm).

È visibile un lungo perno metallico parzialmente bloccato dall'alto con una colata di piombo. Nella parte inferiore dell'immagine si intravedono alcuni elementi metallici fortemente radiopachi (verosimilmente piombo).

Per i parametri operativi cfr. TAV. 16.

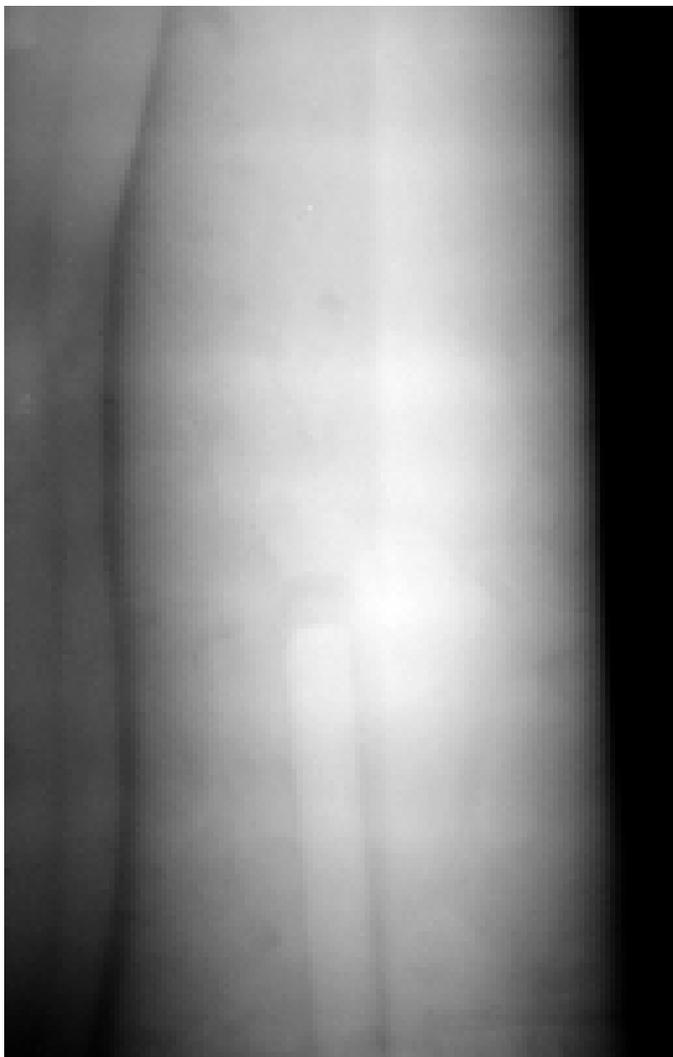
TAVOLA 18



Giove egioco o Zeus del Viminale (II-III sec. d.C.), marmo, Roma, Museo Nazionale Romano (inv. 3247), visione generale e particolare della gammagrafia del ginocchio sinistro (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 280 mm).

Al centro del ginocchio si vede il perno utilizzato per ricomporre la frattura. L'alloggiamento risulta eseguito con buona precisione e i contorni del perno sono abbastanza ben definiti. Tra il perno e l'alloggiamento s'intravede una sottile zona più scura, che è quella occupata dal materiale utilizzato per bloccare il perno stesso. In questo caso, il materiale impiegato per bloccare il perno è verosimilmente costituito da un mastice di origine organica, in quanto malta o gesso presentano radiopacità confrontabile con quella del marmo, pertanto il meato non si sarebbe evidenziato nell'immagine gammagrafica, mentre il piombo, che ha radiopacità più elevata rispetto al ferro e al bronzo, avrebbe determinato una resa più chiara rispetto al perno (cfr. TAVV. 13-15 e 17).

sorgente	Ir^{192}
attività	$2,0 \cdot 10^{11}$ Bq
distanza sorgente-lastra	100
durata esposizione	40
lastre	Agfa D7 Pb

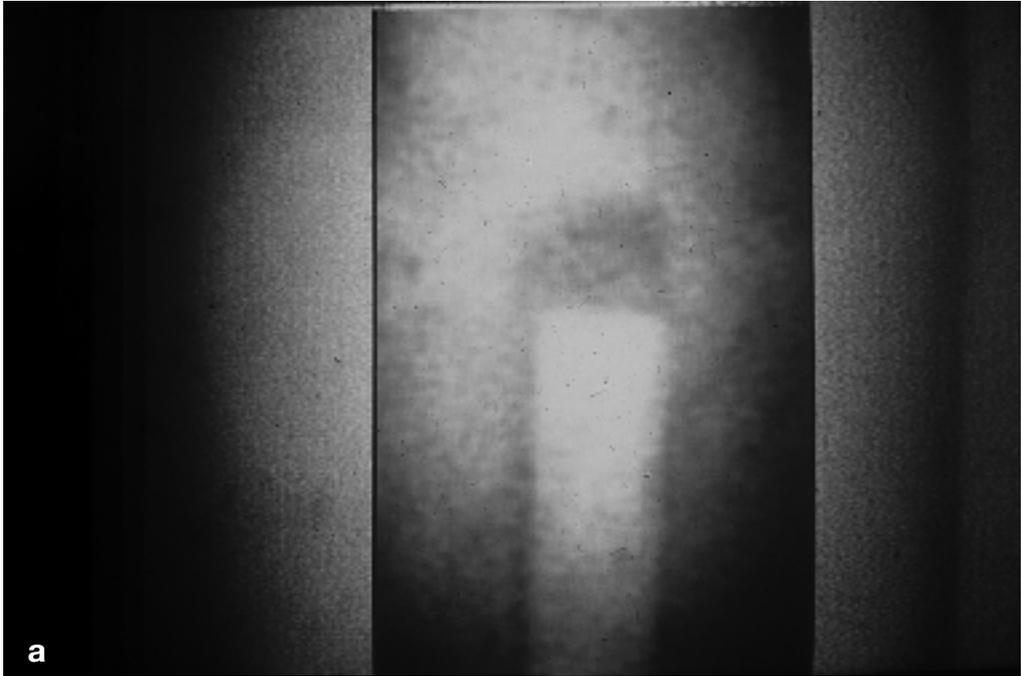
TAVOLA 19

Giove egizico o Zeus del Viminale (II-III sec. d.C.), marmo, Roma, Museo Nazionale Romano (inv. 3247), particolare della gammagrafia del tronco di sostegno (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 240 mm).

Poiché le dimensioni trasversali di questa parte sono maggiori di quelle del ginocchio (TAV. 17), l'immagine appare ancora più sfumata e meno contrastata rispetto alla precedente. Si riesce comunque a vedere il perno nel suo alloggiamento, che risulta un po' più lungo. Per il resto valgono le stesse considerazioni fatte per l'immagine precedente.

Per i parametri operativi cfr. TAV. 18.

TAVOLA 20



Giove egioco o Zeus del Viminale (II-III sec. d.C.), marmo, Roma, Museo Nazionale Romano (inv. 3247), elaborazione digitale dell'immagine relativa alla TAV. 19. L'elaborazione è stata effettuata con lo scopo di evidenziare, attraverso un aumento del contrasto (a) e la ricerca del contorno (b), dettagli non visibili o poco chiari nell'immagine gammagrafica di partenza.



TAVOLA 21



Michelangelo Buonarroti, *Pietà* (1550 circa), marmo, Firenze, Museo dell'Opera di Santa Maria del Fiore, particolare del braccio e del polso sinistro di Cristo: visibile, gamma-grafia.

Al centro si vede il perno metallico impiegato per ricomporre una frattura. La parte superiore è stata ancorata al marmo con piombo. La parte inferiore è stata invece fissata mediante annegamento in un materiale adesivo meno denso del marmo. Più in basso si nota un perno di dimensioni minori, impiegato per collegare due diverse parti della statua e fissato su entrambi i lati mediante annegamento in materiale adesivo.

sorgente	Co ⁶⁰
attività	$7,4 \cdot 10^{10}$ Bq
distanza sorgente-lastra	54 cm
durata esposizione	20 min
lastre	Agfa D8

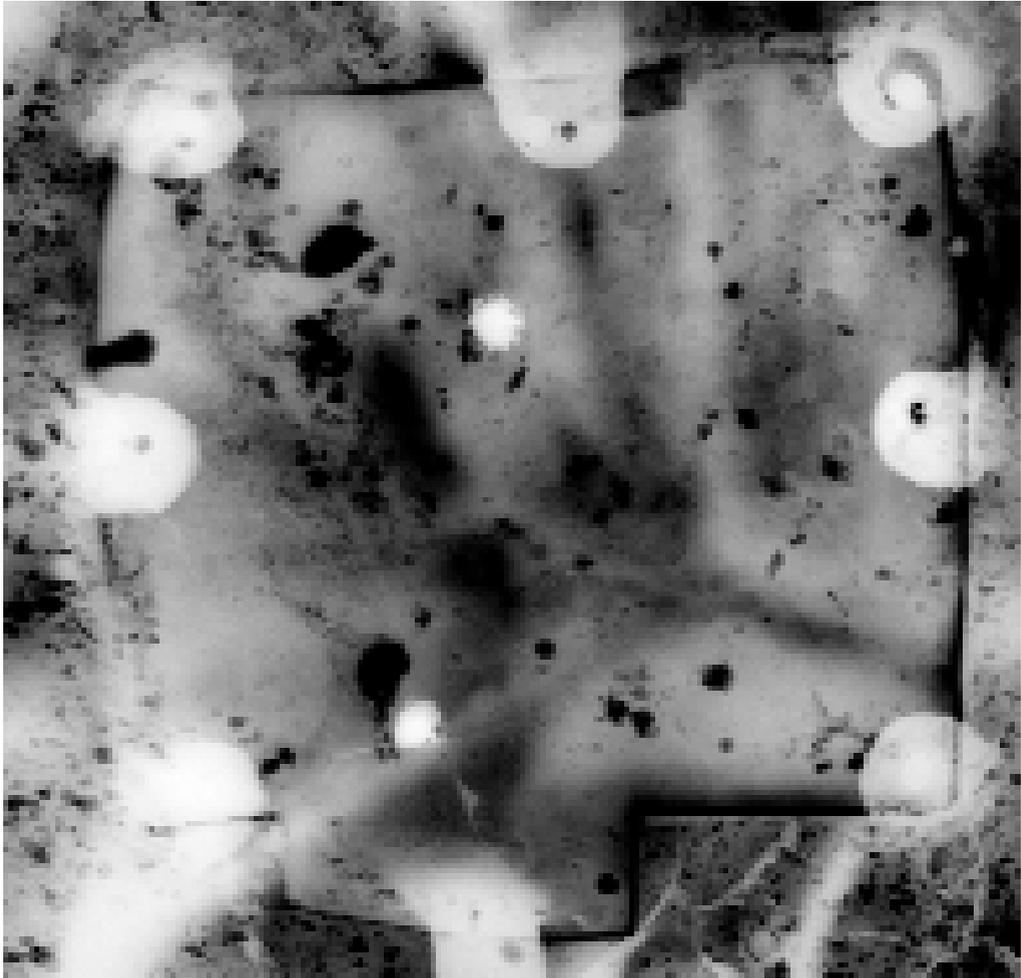
TAVOLA 22

Alabarda rituale, bronzo, Roma, Museo Nazionale d'Arte Orientale (inv. 1952), Giappone, I-II sec. d.C. (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 90 mm).

Sono particolarmente evidenti e diffuse le bollosità del getto di fusione; tale carenza strutturale sottolinea la funzione puramente decorativa e simbolica del manufatto.

tensione	150 kV
corrente	4 mA
distanza	100 cm
t. esp.	60 esc
lastre	Agfa D7 Pb

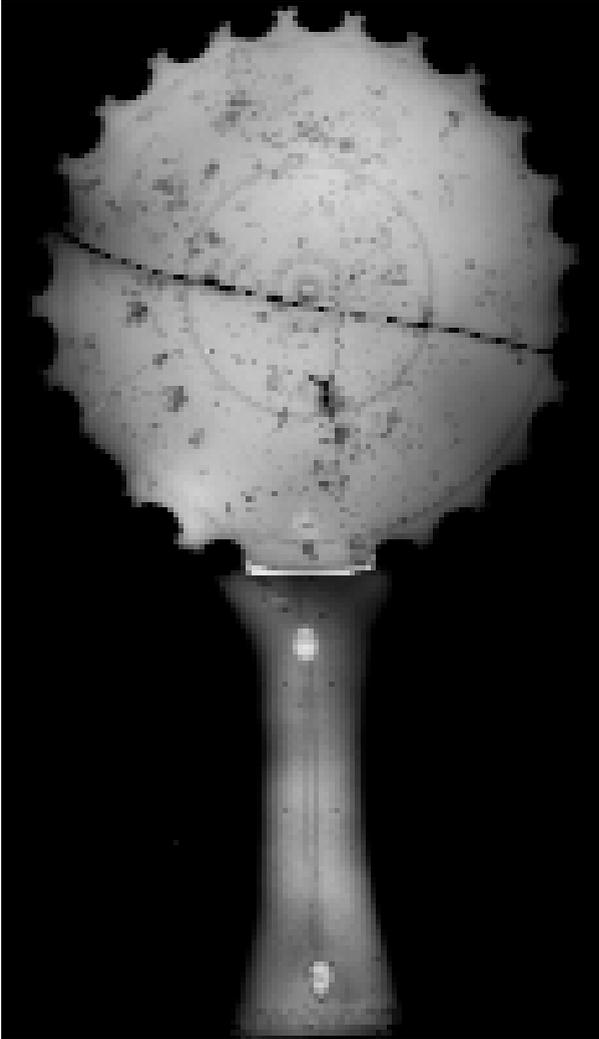
TAVOLA 23



Pieter van Werschaffelt, *San Michele Arcangelo* (1753), bronzo, Roma, Castel Sant'Angelo, particolare di una zona interna del mantello (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 280 mm). È visibile un tassello di riparazione bloccato da ribattini. Le macchie più scure sono dovute principalmente a difetti di fusione, quali bollosità e soffiature.

tensione	200 kV
corrente	6 mA
distanza	70 mm
t. esp.	300 sec
lastre	Agfa D7

TAVOLA 24



Specchio romano con manico di casseruola (seconda metà del I sec. d.C.), bronzo, Roma, Museo Nazionale Romano (inv. 257803; larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 155 mm).

Gli spessori sono molto più grandi di quelli presenti nella croce della TAV. 27, tuttavia l'immagine è ancora abbastanza ben definita: si notano, tra l'altro, gli elementi decorativi, le incisioni e la saldatura sul manico.

tensione	90 kV
corrente	5 mA
distanza	45 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7

TAVOLA 25

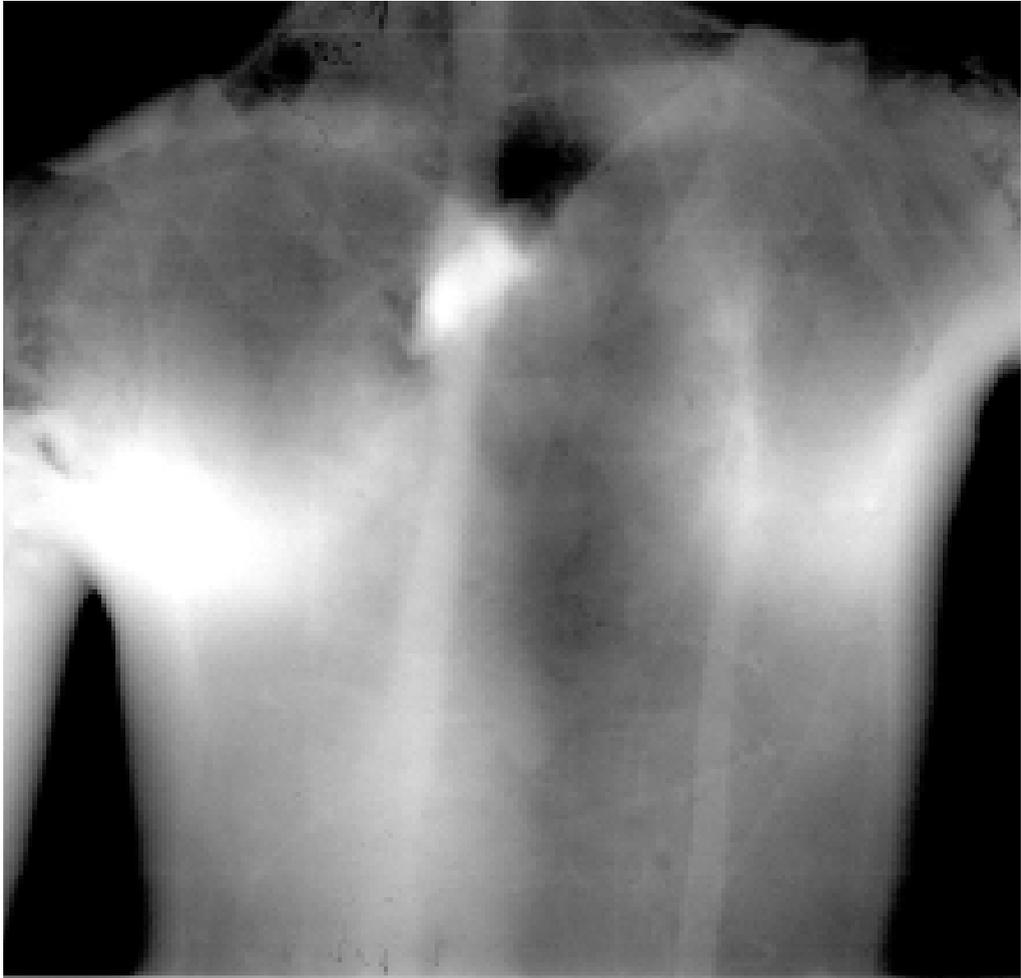


Giambologna, putto, dalla *Fontana del Nettuno* (1563-66), bronzo, Bologna, Piazza Maggiore, particolare della gammagrafia della gamba (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 205 mm).

È chiaramente visibile una cricca all'altezza della caviglia. Si possono anche notare, più in alto, difetti di fusione e valutare le variazioni di spessore della lega nelle diverse parti.

sorgente	Ir^{192}
attività	$7,4 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$
distanza sorgente-lastra	50 cm
durata esposizione	20 min
lastre	Agfa D7

TAVOLA 26



Verrocchio, *David* (1476), bronzo, Firenze, Museo Nazionale del Bargello, particolare della gammagrafia del torace e della spalla destra (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 315 mm). È presente un'intelaiatura di sostegno dell'anima di fusione, costituita da due barre metalliche disgiunte e un'armatura di fili metallici.

sorgente	Co ⁶⁰
attività	$3,6 \cdot 10^{10}$ Bq
distanza sorgente-lastra	50 cm
durata esposizione	150 min
lastre	Agfa D7 Pb

TAVOLA 27

Croce processionale (1291), argento sbalzato montato su legno, Veroli (Frosinone), Abbazia di Casamari, particolare dalla parte inferiore della croce, con il nodo e l'attacco all'asta (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 190 mm).

La lamina in argento sbalzato è applicata a un supporto ligneo. Gli spessori sono abbastanza sottili e quindi l'immagine è ben definita, in particolare il modellato della lamina.

tensione	100 kV
corrente	5 mA
distanza	70 cm
t. esp.	240 sec
lastre	Agfa D7

TAVOLA 28



Donatello, *Atys* (1430 circa), bronzo, Firenze, Museo Nazionale del Bargello, particolare della gammagrafia del braccio destro (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 290 mm). È visibile l'innesto a bicchiere nella spalla e una riparazione effettuata bloccando con un riempimento il moncone del braccio.

sorgente	Co ⁶⁰
attività	$3,6 \cdot 10^{10}$ Bq
distanza sorgente-lastra	100 cm
durata esposizione	165 min
lastre	Agfa D7 Pb

TAVOLA 29



Chimera di Arezzo (V-IV sec. a.C.), bronzo, Firenze, Museo Archeologico: vista generale durante l'esecuzione della campagna gammagrafica, particolare della gammagrafia della riparazione della zampa posteriore sinistra. Si nota l'estremità del perno di rinforzo utilizzato per congiungere le due parti. La riparazione è stata fatta in due tempi, fissando prima un perno alla parte inferiore con la colata di una lega bassofondente di piombo e stagno (metallone) e poi, dopo aver congiunto la parte inferiore così trattata a quella superiore, colando dall'interno nuovo metallone per ancorare il perno anche alla parte superiore.

sorgente	Co ⁶⁰
attività	$1,9 \cdot 10^{11}$ Bq
distanza sorgente-lastra	50 cm
durata esposizione	120 min
lastre	Agfa D7 Pb

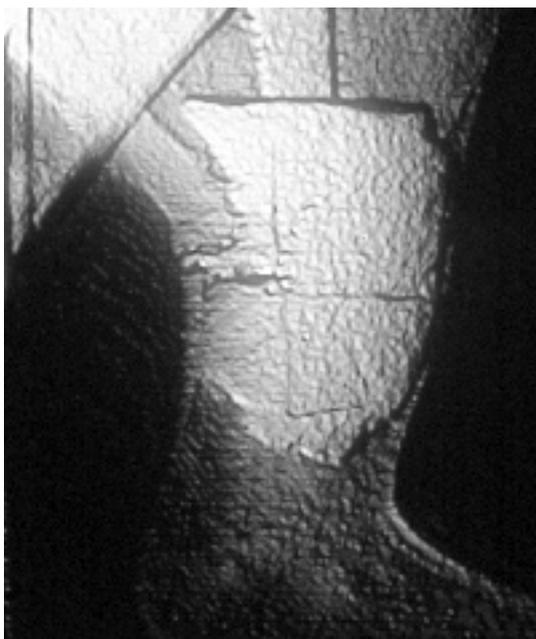


TAVOLA 30

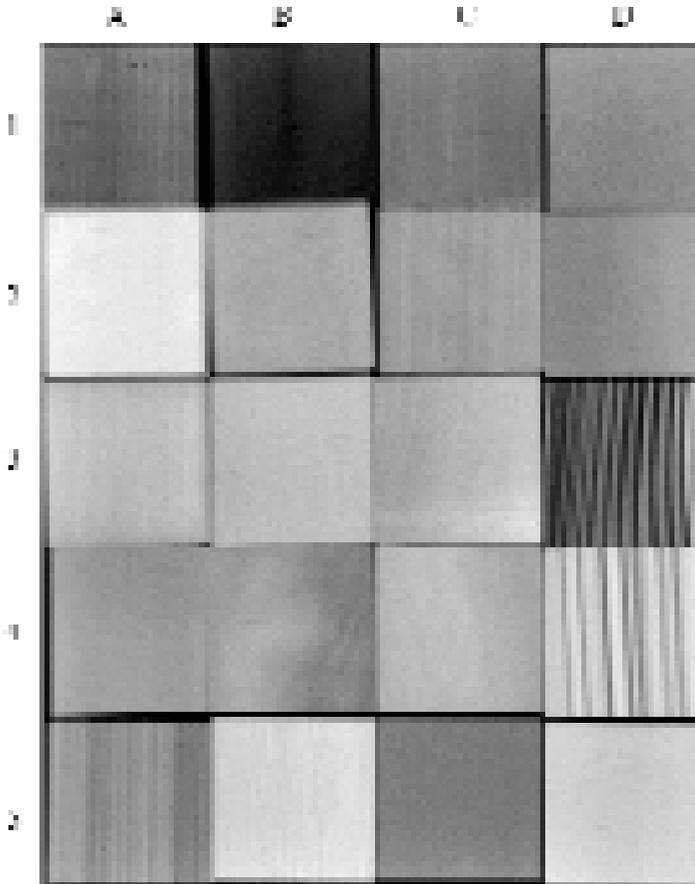


Chimera di Arezzo (V-IV sec. a.C.), bronzo, Firenze, Museo Archeologico, particolare di una gammagrafia ottenuta inserendo la sorgente all'interno della statua.

Il particolare assetto di irraggiamento ha consentito di evidenziare un sistema di perni anegati nel materiale di restauro, in corrispondenza di una grossa frattura nella pancia.

sorgente	Co ⁶⁰
attività	$1,9 \cdot 10^{11}$ Bq
distanza sorgente-lastra	10 cm
durata esposizione	180 sec
lastre	Agfa D7 Pb

TAVOLA 31



Radiografia di cubetti di legno di 3,5 cm di lato ottenuti da differenti essenze legnose (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 45 mm).

a1 castagno	b1 larice	c1 pino	d1 tiglio
a2 carpino	b2 faggio	c2 pioppo	d2 sicomoro
a3 cedro	b3 frassino	c3 olmo	d3 abete
a4 betulla	b4 cipresso	c4 noce	d4 robinia
a5 ontano	b5 quercia	c5 ciliegio selvatico	d5 pero

tensione	40 kV
corrente	4 mA
distanza	100 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 Pb

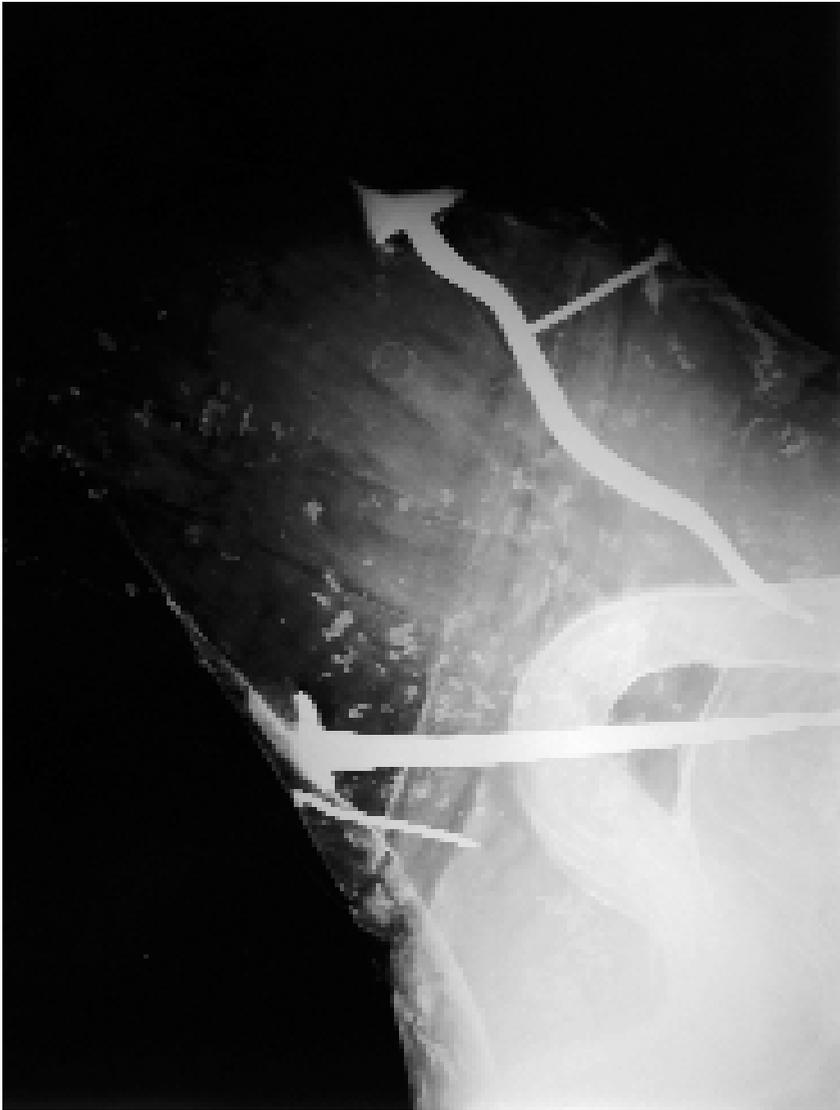
TAVOLA 32



Lorenzo Maitani, *Crocifisso* (XIV sec.), statua lignea policroma, Orvieto, Duomo, particolare dei piedi (visione laterale; larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 370 mm). La preparazione e la policromia sulla superficie della statua, più radiopache rispetto al legno, facilitano il riconoscimento dei volumi. Si notano infine tre differenti orientamenti della sede del chiodo che fissava i piedi alla croce.

tensione	37 kV
corrente	9 mA
distanza	100 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 DW

TAVOLA 33



Lorenzo Maitani, *Crocifisso* (XIV sec.), statua lignea policroma, Orvieto, Duomo, particolare della spalla destra (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 200 mm).

L'innesto del braccio destro al torace è bloccato da due grossi chiodi di fattura antica.

tensione	40 kV
corrente	9 mA
distanza	80 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 DW

TAVOLA 34



Lorenzo Maitani, *Crocifisso* (XIV sec.), statua lignea policroma, Orvieto, Duomo, particolare della spalla sinistra (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 200 mm). L'innesto del braccio sinistro al torace è bloccato da tre grossi chiodi di fattura antica. Per i parametri operativi cfr. TAV. 33.

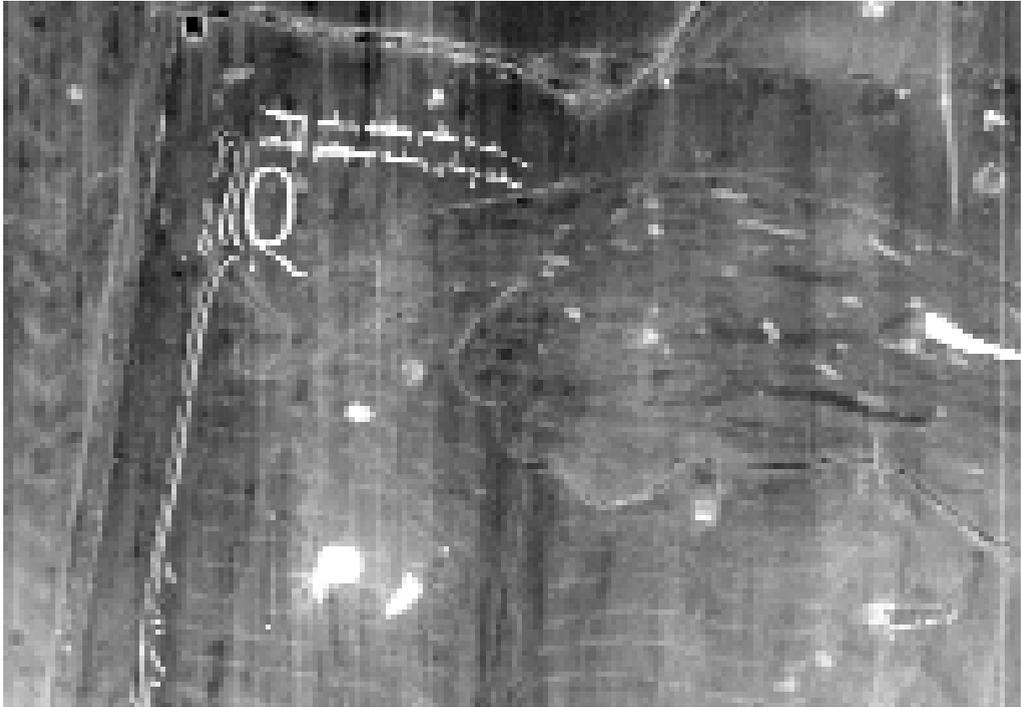
TAVOLA 35

Giuliano da Maiano, anta sinistra della porta della *Sala dei gigli* (1481), Firenze, Palazzo della Signoria, particolare del bordo superiore e dell'angolo sinistro dell'anta con la figura del Petrarca (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 212 mm).

Lungo il bordo verticale si nota la presenza di numerose impronte lasciate da chiodi rimossi. Esse appaiono più chiare rispetto al legno perché riempite da prodotti di corrosione o, meno frequentemente, da minute schegge di metallo.

tensione	47 kV
corrente	9,9 mA
distanza	150 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7

TAVOLA 36



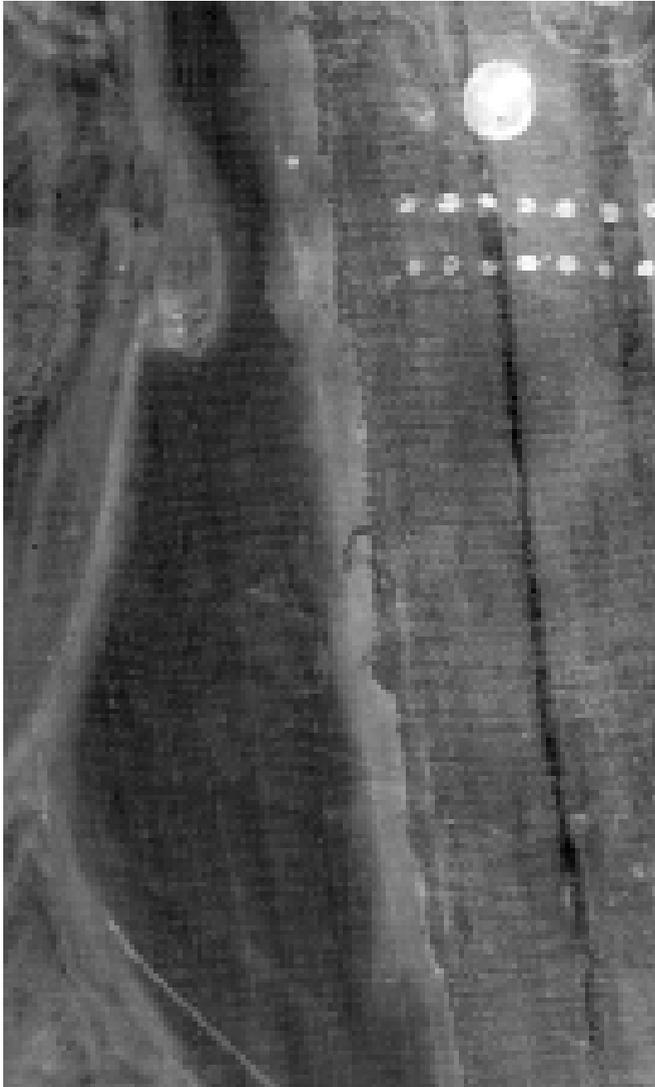
Giuliano da Maiano, anta sinistra della porta della *Sala dei gigli* (1481), Firenze, Palazzo della Signoria, particolare del libro e della mano sinistra del Petrarca (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 190 mm). La radiografia evidenzia, oltre alla morfologia delle tarsie lignee, in cui risaltano le agemine metalliche con cui sono simulate le lettere dorate e le decorazioni del codice tenuto in mano dal poeta, la struttura del supporto su cui sono montate, nonché numerosi chiodi o frammenti di chiodi parzialmente rimossi; in un caso (in basso a destra) si osserva l'impronta di un chiodo di ferro rimosso, resa visibile dall'infiltrazione dei prodotti di corrosione all'interno delle fibre del legno. Sono inoltre visibili numerosi canali di tarli, alcuni dei quali per buona parte riempiti da stuccature. Per i parametri operativi cfr. TAV. 35.

TAVOLA 37

Anonimo, *Trittico del Salvatore* (XIII sec.), tempera su tavola, Trevignano, basilica di San Clemente, particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 195 mm).

Sulla tavola è stata applicata un'incamottatura costituita da una tela molto fine; in aggiunta, strisce di tela più grossa sono incollate in corrispondenza dei giunti.

tensione	31 kV
corrente	6 mA
distanza	100 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 DW

TAVOLA 38

Anonimo, *Trittico del Salvatore* (XIII sec.), tempera su tavola, Trevignano, basilica di San Clemente, particolare della TAV. 37 ad ingrandimento maggiore (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 80 mm).

TAVOLA 39



Anonimo, *Trittico del Salvatore* (XIII sec.),
tempera su tavola, Ronciglione, chiesa dei SS.
Paolo e Caterina, particolare (larghezza origi-
nale dell'immagine sulla lastra: 465 mm).

In corrispondenza del bordo superiore della
tavola centrale sono visibili numerosi chiodi
e frammenti di chiodi di fattura antica e mo-
derna.

tensione	40 kV
corrente	9,5 mA
distanza	100 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 DW

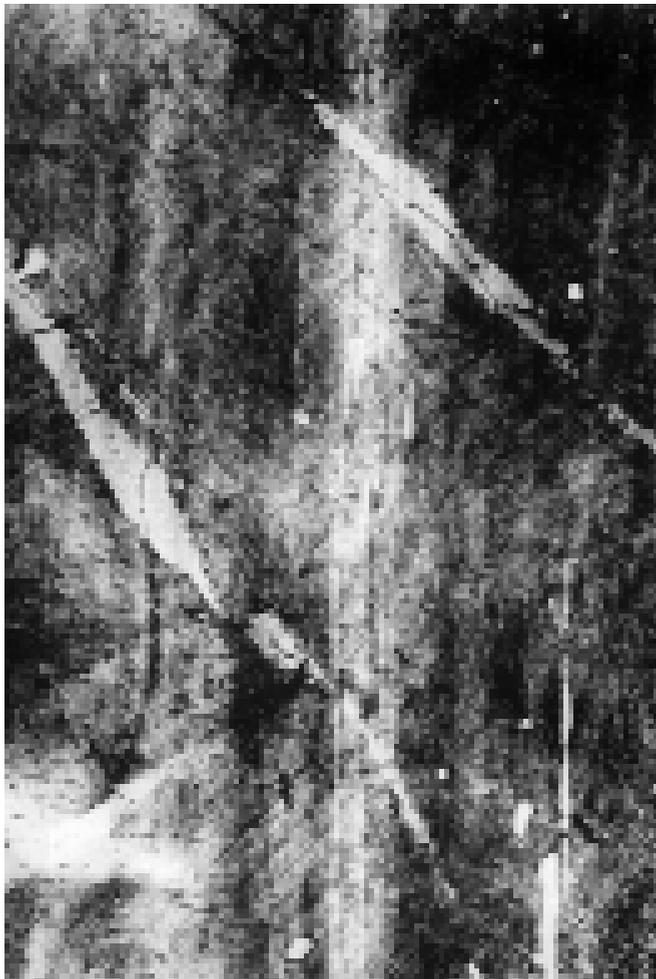
TAVOLA 40

Anonimo, *Trittico del Salvatore* (XIII sec.), tempera su tavola, Ronciglione, chiesa dei SS. Paolo e Caterina, particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 230 mm).

Una serie d'incisioni sulla preparazione, più radiopache perché colmate dalla materia pittorica degli strati cromatici, definisce in maniera schematica il disegno del pannello. La fitta trama della tela d'incamottatura è appena distinguibile.

Per i parametri operativi cfr. TAV. 39.

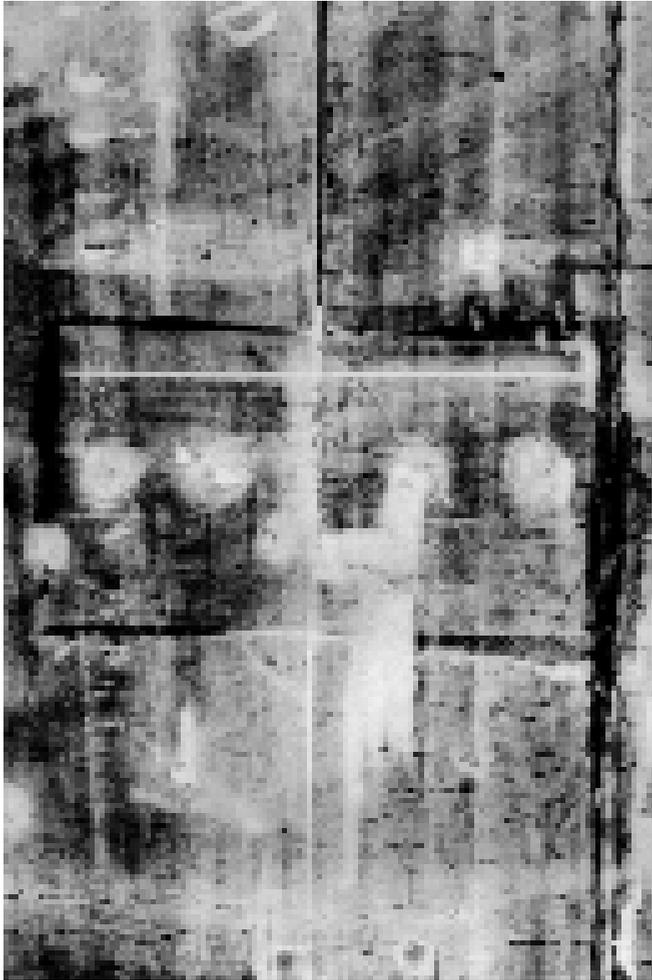
TAVOLA 41



Maestro della Santa Cecilia, *Madonna in trono con Bambino* (XIII-XIV sec.), tempera su tavola, Firenze, chiesa di Santa Margherita a Monticci, particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 163 mm). Sulla tavola è stata applicata un'incamottatura costituita da una tela grossolana; il frequente ricorso a strisce anche di piccole dimensioni e di forma irregolare, con bordi sfrangiati e non sovrapposti, sembrerebbe indicare l'impiego di ritagli.

tensione	30 kV
corrente	8,5 mA
distanza	100 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 DW

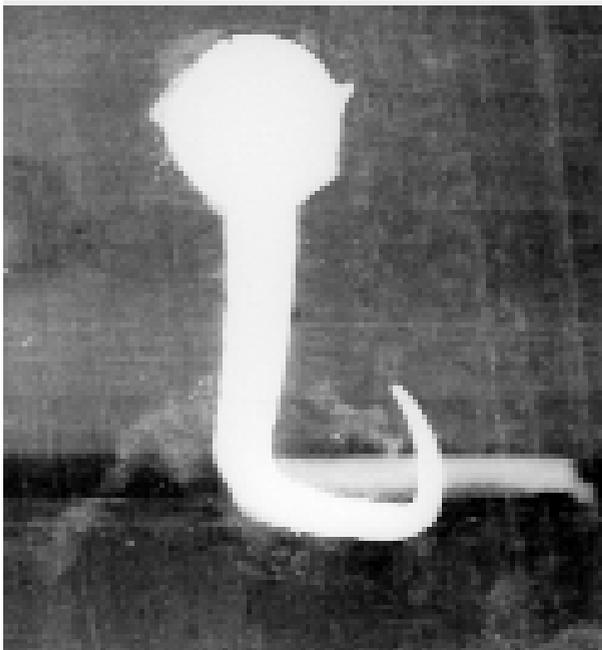
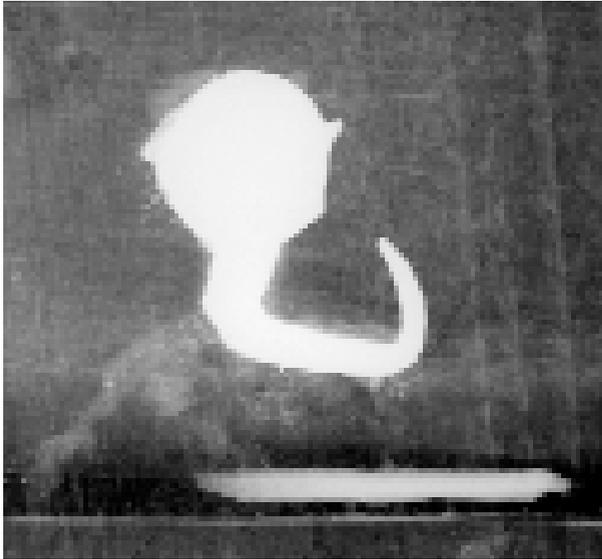
TAVOLA 42



Maestro della Santa Cecilia, *Madonna in trono con Bambino* (XIII-XIV sec.), tempera su tavola, Firenze, chiesa di Santa Margherita a Montici, particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 128 mm).

La giunzione tra le due assi di pioppo incollate è rafforzata dalla presenza di una ranghetta in olmo bloccata da due perni lignei su ciascuna asse.

Per i parametri operativi cfr. TAV. 41.

TAVOLA 43

Lippo Memmi, *Madonna dei raccomandati* (1339), tempera su tavola, Orvieto, Duomo, particolare di un chiodo che blocca le assi (larghezza originale delle immagini sulle lastre: 57 mm). Le immagini del medesimo chiodo inserito dal davanti e ribattuto sul retro sono state estratte da due radiografie contigue. Sia la forma sia la posizione rispetto alla giunzione delle tavole e alla stuccatura che parzialmente la chiude appaiono diverse, perché nei due casi, rispetto alla distribuzione spaziale dei particolari, era diverso l'orientamento dei raggi X.

tensione	45 kV
corrente	9,8 mA
distanza	100 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 DW

TAVOLA 44

Lippo Memmi, *Madonna dei raccomandati* (1339), tempera su tavola, Orvieto, Duomo, particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 200 mm).

La giunzione tra le due assi è rafforzata dalla presenza di un cavicchio (perno ligneo a sezione circolare) il cui alloggiamento è sensibilmente più lungo.

Per i parametri operativi cfr. TAV. 43.

TAVOLA 45



Giovanni Bellini, *Natività*, dalla predella dell'*Incoronazione della Vergine* (1476), olio su tavola, Pesaro, Museo Civico, particolare (montaggio di due lastre contigue, larghezza originale dell'immagine sulle lastre: 410 mm). La lavorazione non accurata del supporto è resa evidente grazie alle variazioni di spessore del gesso di preparazione che ne colma i dislivelli.

tensione	25 kV
corrente	8 mA
distanza	100 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 DW

TAVOLA 46

Giovanni Bellini, *Sant'Andrea*, pilastro destro della cornice dell'*Incoronazione della Vergine* (1476), olio su tavola, Pesaro, Museo Civico, particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 182 mm).

La lavorazione non accurata del supporto è stata colmata dalla preparazione a gesso e colla.

Per i parametri operativi cfr. TAV. 45.

TAVOLA 47



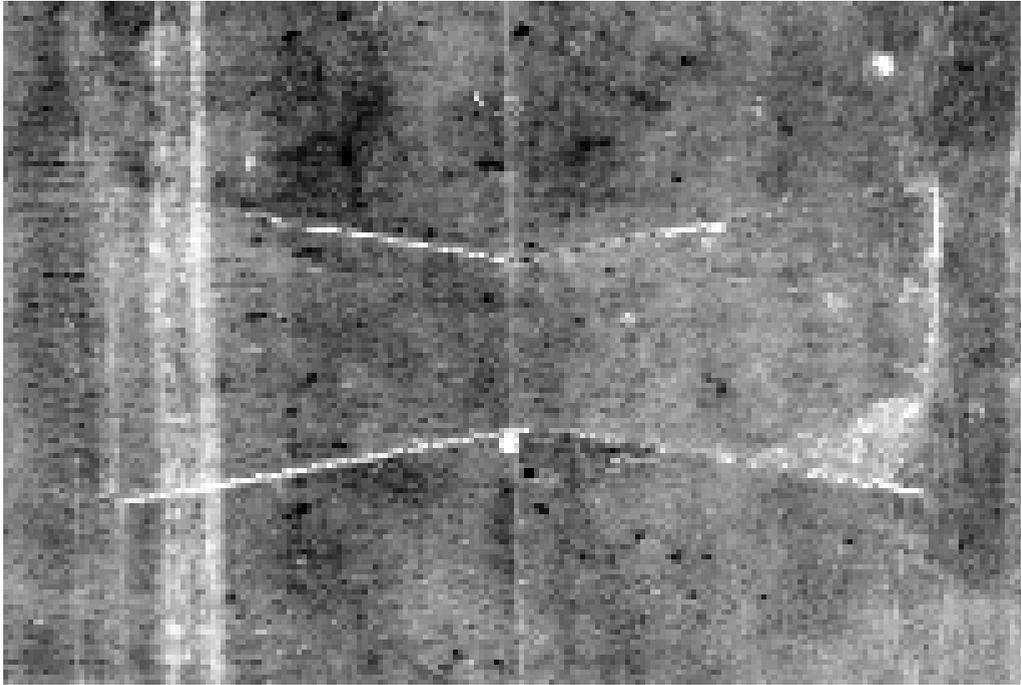
Giovanni Bellini, *San Terenzio*, dalla predella dell'*Incoronazione della Vergine* (1476), olio su tavola, Pesaro, Museo Civico, particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 250 mm).

La scarsa radiopacità degli strati pittorici con cui è realizzata la corazza lascia in risalto la tramatura a sottilissimi aghi, caratteristica dei supporti in pioppo, dovuta alla penetrazione superficiale del gesso di preparazione tra le fibre del legno.

Per i parametri operativi cfr. TAV. 45.

TAVOLA 48

Giovanni Bellini, *San Terenzio*, dalla predella dell'*Incoronazione della Vergine* (1476), olio su tavola, Pesaro, Museo Civico, particolare della TAV. 47 ad ingrandimento maggiore (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 118 mm).

TAVOLA 49

Giovanni Bellini, *Incoronazione della Vergine* (1476), olio su tavola, Pesaro, Museo Civico, particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 130 mm).

Il perimetro più radiopaco della farfalla, inserita in un intervento moderno per garantire la giunzione delle tavole, attesta la presenza di una stuccatura tra farfalla e supporto, verosimilmente effettuata con gesso e non con un mastice di origine organica, come solitamente avviene.

Per i parametri operativi cfr. TAV. 45.

TAVOLA 50



Giovanni Bellini, *Conversione di Saulo*, dalla predella dell'*Incoronazione della Vergine* (1476), olio su tavola, Pesaro, Museo Civico, particolare del visibile e immagine radiografica corrispondente; larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 240 mm.

Un significativo pentimento concerne la forma dello scudo a terra: originariamente era previsto di forma circolare, come fa vedere l'impronta del terreno che ne risparmiava i contorni; la redazione finale, di forma rettangolare, è stata effettuata con una materia pittorica avente radiopacità bassissima, che si sovrappone parzialmente al terreno senza lasciare tracce nell'immagine radiografica.

Per i parametri operativi cfr. TAV. 45.

TAVOLA 51

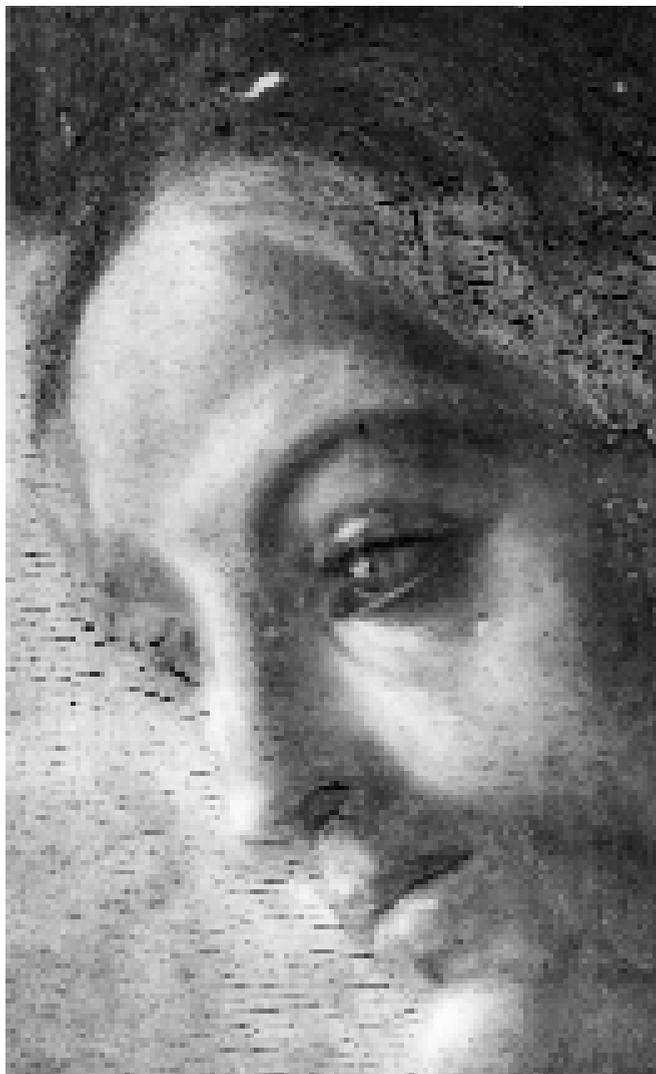
Giovanni Bellini, *Conversione di Saulo*, dalla predella dell'*Incoronazione della Vergine* (1476), olio su tavola, Pesaro, Museo Civico, particolare della TAV. 50 ad ingrandimento maggiore: visibile, radiografia (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 150 mm).

TAVOLA 52

Giovanni Bellini, *Incoronazione della Vergine* (1476), olio su tavola, particolare della mano sinistra di Cristo, Pesaro, Museo Civico (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 74 mm).

Nelle zone in ombra del viola del manto è visibile un cretto molto aperto dovuto allo scorrimento degli strati cromatici a causa di un eccessivo uso di legante.

Per i parametri operativi cfr. TAV. 45.

TAVOLA 53

Giovanni Bellini, *Incoronazione della Vergine* (1476), olio su tavola, particolare del volto di Cristo, Pesaro, Museo Civico (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 108 mm). Nel paesaggio, subito accanto all'attacco del profilo di Cristo, si nota una variazione del cretto, che mostra una tramatura maggiore. Ciò è probabilmente dovuto a velature molto ricche in legante. S'intravede inoltre un piccolo pentimento concernente il naso, originariamente previsto più lungo.

Per i parametri operativi cfr. TAV. 45.

TAVOLA 54



Perugino, *Madonna della Consolazione* (1496-98), olio su tavola, Perugia, Galleria Nazionale dell'Umbria, particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 98 mm).

Durante la lavorazione del supporto, si è verificata una grossa scheggiatura in una zona corrispondente al cambiamento di orientamento delle fibre, risarcita con una stuccatura.

tensione	30 kV
corrente	10 mA
distanza	95 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 DW

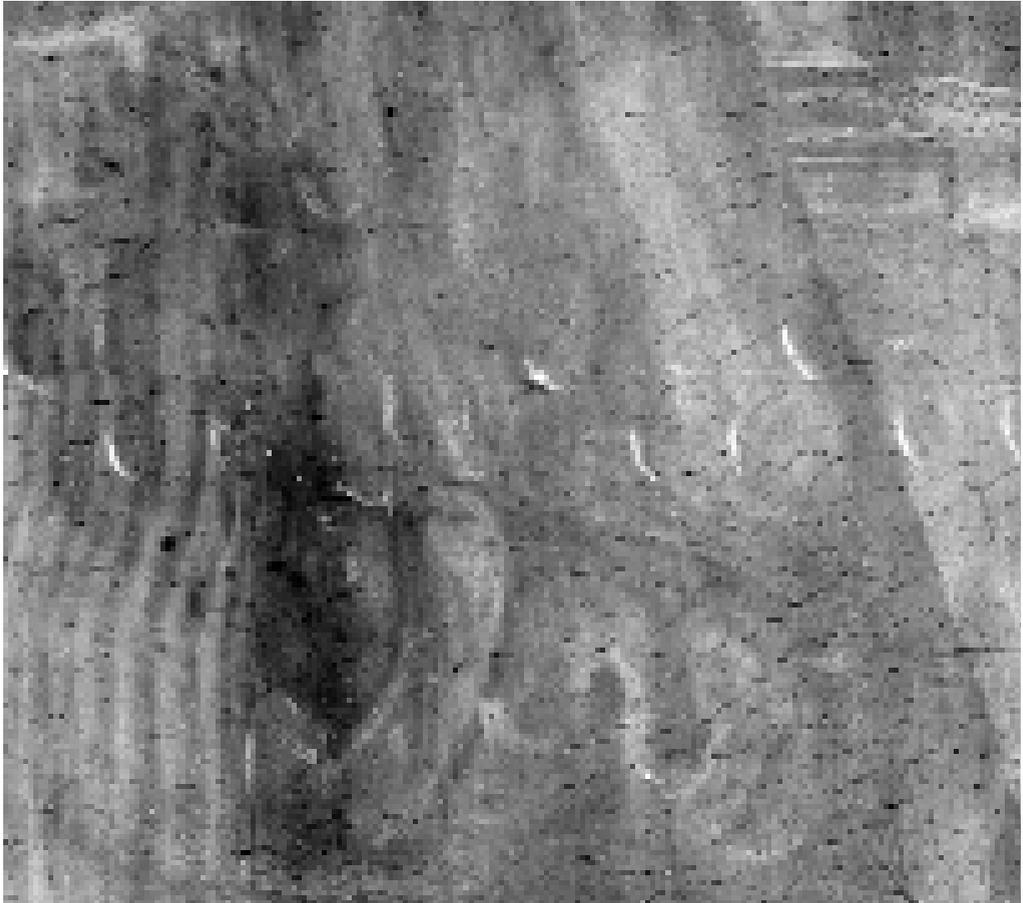
TAVOLA 55

Perugino, *Battesimo di Cristo* (1510 circa),
olio su tavola, Perugia, Galleria Nazionale del-
l'Umbria, particolare (larghezza originale del-
l'immagine sulla lastra: 165 mm).

Sono visibili due tasselli lignei inseriti sul recto
del supporto per eliminare la presenza di nodi.

tensione	38 kV
corrente	10 mA
distanza	100 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 DW

TAVOLA 56



Perugino, *Adorazione dei pastori* (1510 circa), olio su tavola, Perugia, Galleria Nazionale dell'Umbria, particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 243 mm). Sono visibili le impronte lasciate sul legno da uno strumento dentato a profilo concavo, con cui è stata preliminarmente sgrossata la lavorazione del supporto. L'immagine di tali segni è fortemente radiopaca perché essi sono stati colmati dal gesso di preparazione.

tensione	37 kV
corrente	10 mA
distanza	97,5 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 DW

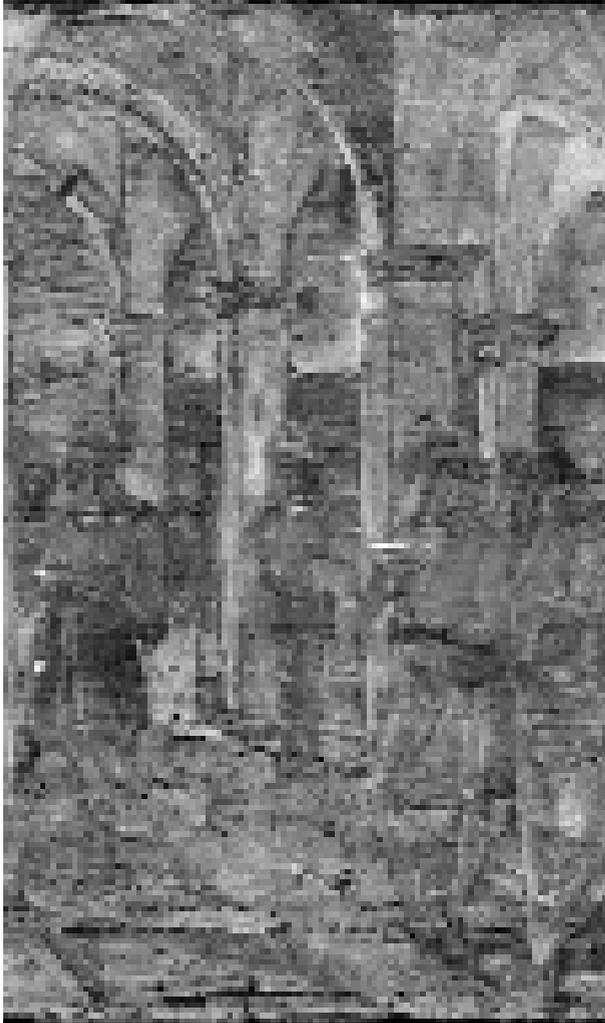
TAVOLA 57



Perugino, *San Gerolamo e Santa Maria Maddalena* (1520 circa), olio su tavola, Perugia, Galleria Nazionale dell'Umbria, particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 192 mm). La lastra corrisponde ad una zona in cui la preparazione a gesso è rimasta scoperta perché all'esterno della centina. I punti fortemente radiopachi sono dovuti a microdisomogeneità nella composizione della preparazione a gesso e colla costituite, verosimilmente, da granuli di silice. Al centro dell'immagine s'intravedono le tracce lasciate da una spatola dentata, impiegata per la raschiatura di eventuali asperità superficiali colmate dalla soprastante imprimitura a base di biacca.

tensione	37 kV
corrente	10 mA
distanza	100 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 DW

TAVOLA 58

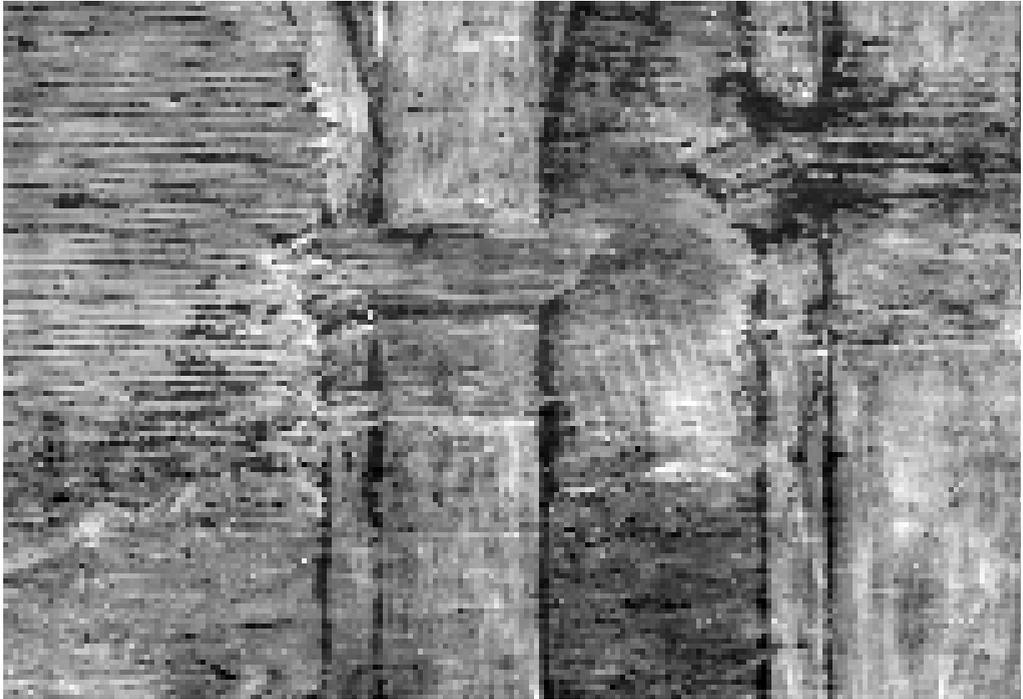


Perugino, *Nozze di Canaa* (1520 circa), olio su tavola, Perugia, Galleria Nazionale dell'Umbria, particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 240 mm). Sono visibili i segni di spatole dentate, una più fitta e l'altra più rada, con cui è stata lavorata la superficie del gesso di preparazione per eliminare sbavature e asperità. La stesura del cielo è avvenuta in maniera sommaria, sconfinando sulle zone adiacenti, campite successivamente. L'architettura è definita da incisioni sull'imprimatura soprastante la preparazione a gesso e colla, in parte lasciate a vista da una tecnica a risparmio lungo i contorni della redazione finale. Quando queste incisioni sono ricoperte dalla materia pittorica sono frequenti le cadute di colore, come attestato dal contorno irregolare e frastagliato di alcune lacune.

tensione	30 kV
corrente	10 mA
distanza	98,5 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 DW

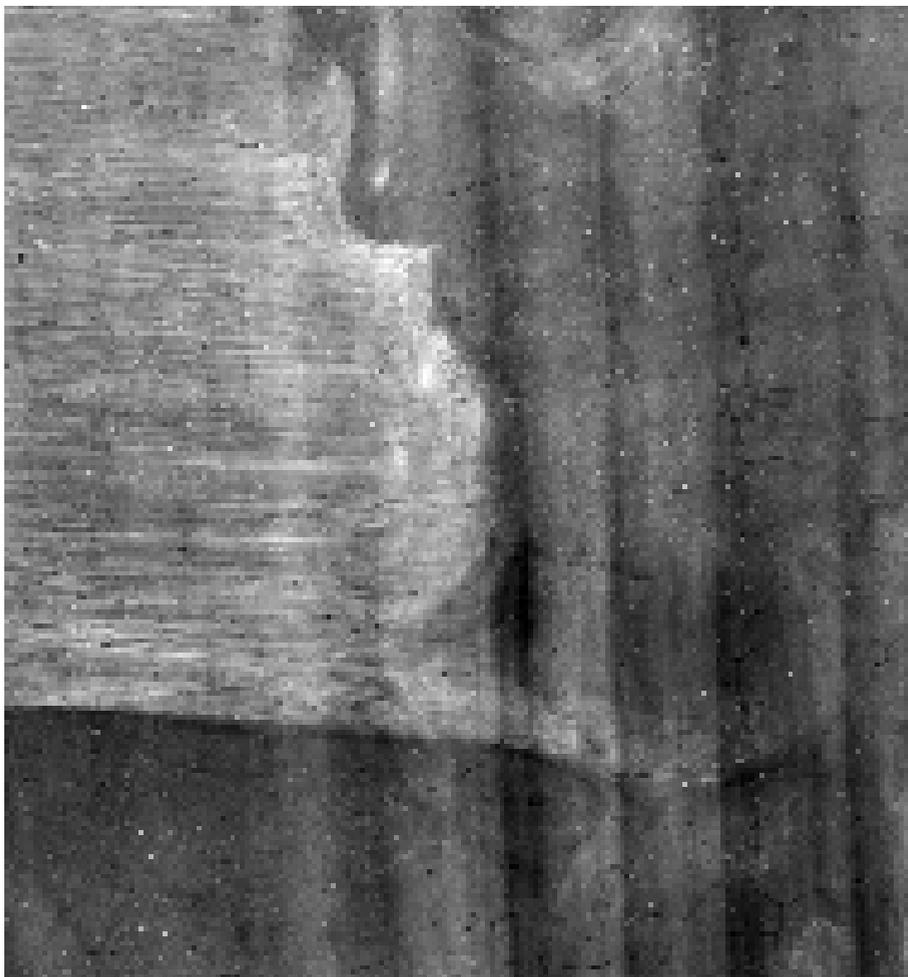
TAVOLA 59

Perugino, *Nozze di Canaa* (1520 circa), olio su tavola, Perugia, Galleria Nazionale dell'Umbria, particolare della TAV. 58 ad ingrandimento maggiore, in cui risultano di lettura immediata i segni di spatole dentate con cui è stata lavorata la superficie del gesso di preparazione (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 108 mm).

TAVOLA 60

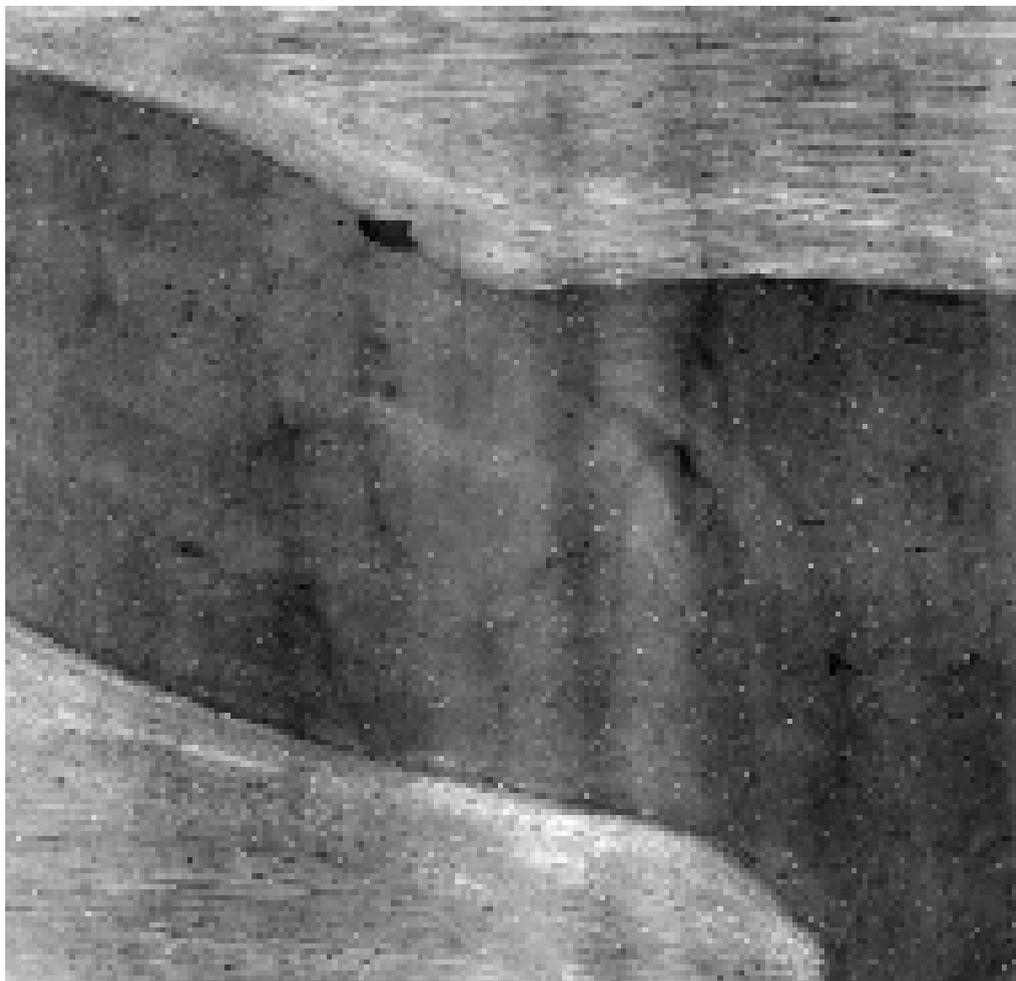
Perugino, *Nozze di Canaa* (1520 circa), olio su tavola, Perugia, Galleria Nazionale dell'Umbria, particolare della TAV. 58 ad ingrandimento maggiore, in cui si evidenzia l'uso di incisioni per la definizione del disegno architettonico, caratterizzate da frequenti cadute di colore lungo i bordi e, nella parte destra, i segni di una spatola dentata con cui è stata lavorata la superficie del gesso di preparazione (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 105 mm).

TAVOLA 61



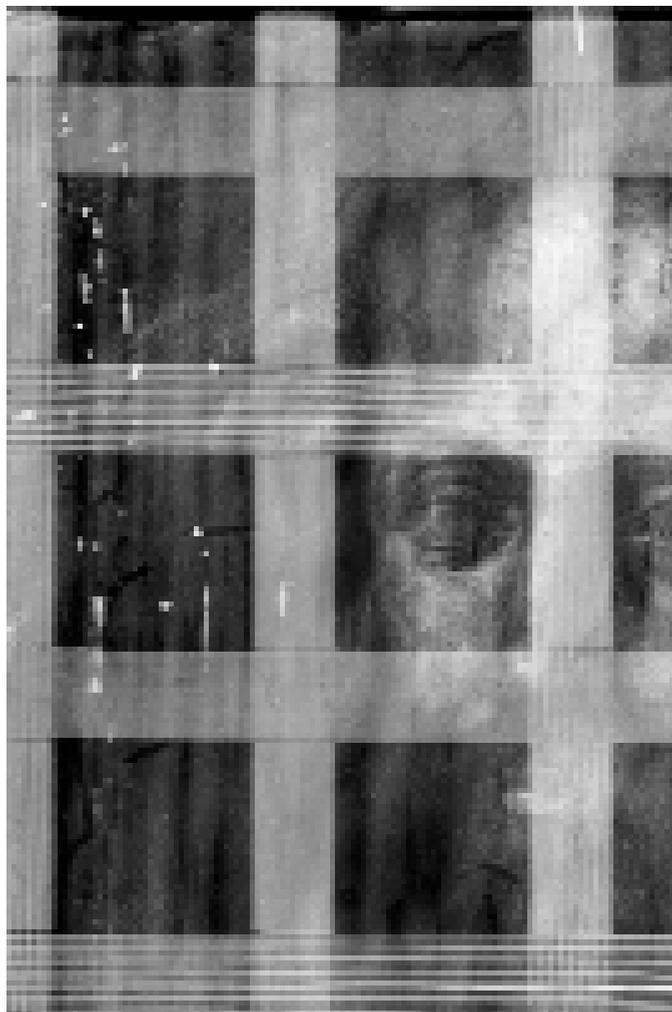
Perugino, *Battesimo di Cristo* (1510 circa), olio su tavola, particolare della figura del Battista, Perugia, Galleria Nazionale dell'Umbria (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 143 mm). La sottile fascia più scura lungo i contorni della figura è dovuta alla realizzazione del cielo in due stesure, delle quali la prima, a base di azzurrite, è più corposa ed è stata eseguita in maniera sommaria scontornando la figura, mentre la seconda, che in maniera accurata ha chiuso le zone ancora non dipinte lungo i contorni, è meno radiopaca perché effettuata con strati pittorici più sottili e di composizione differente (lapislazzuli). La presenza di punti fortemente radiopachi è dovuta a microdisomogeneità nella composizione della preparazione costituite da granuli di silice.

Per i parametri operativi cfr. TAV. 55.

TAVOLA 62

Perugino, *Battesimo di Cristo* (1510 circa), olio su tavola, particolare della figura del Battista, Perugia, Galleria Nazionale dell'Umbria.
Cfr. TAV. 61. Per i parametri operativi cfr. TAV. 55.

TAVOLA 63



Scuola di Raffaello, *Ritratto di Baldassarre Castiglione* (1519-30), olio su tavola, Roma, Galleria Nazionale di Arte Antica di Palazzo Barberini (depositi), particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 192 mm). La presenza di una fitta parchettatura interferisce nella lettura radiografica degli strati pittorici. Le macchie chiare sul lato sinistro sono dovute a gallerie di tarli stuccate.

tensione	28 kV
corrente	8,3 mA
distanza	100 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 DW

TAVOLA 64

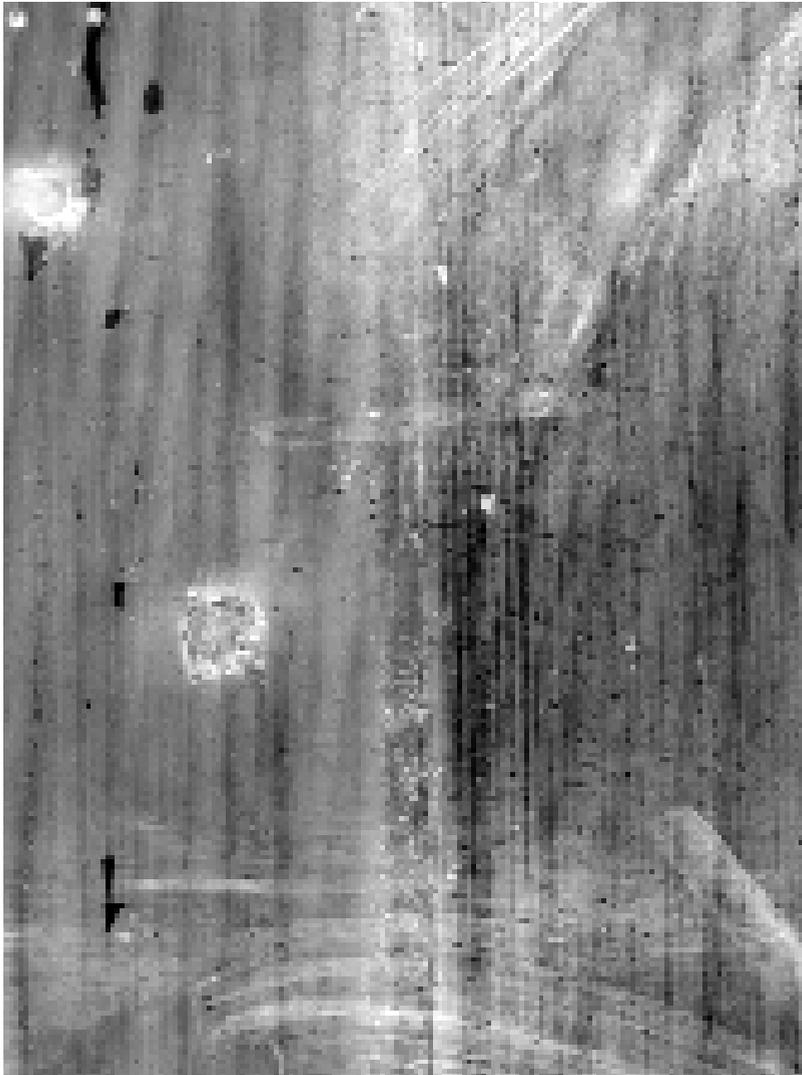


Pontorno, *Gli undecimila martiri* (1529-30), olio su tavola, Firenze, Galleria Palatina, due particolari in corrispondenza delle giunzioni tra le tavole (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: a, 111 mm; b, 61 mm). Al posto dell'incamottatura di tutto il supporto sono state applicate sottili strisce di tela di rinforzo solo lungo le giunzioni delle assi.

tensione	25 kV
corrente	8,5 mA
distanza	100 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 DW



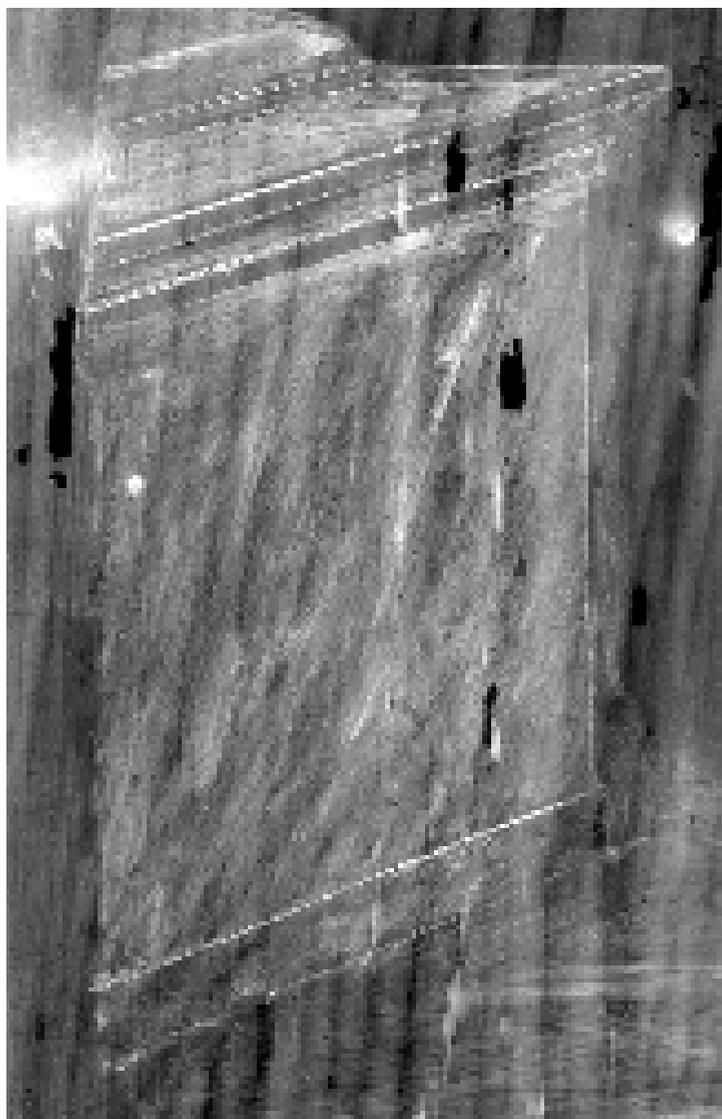
TAVOLA 65



Bernardino Ferrari, *Resurrezione di Cristo* (1510-20) olio su tavola, Vigevano, Cattedrale, particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 211 mm).

La giunzione tra le due assi è rafforzata dalla presenza di un cavichio (perno ligneo a sezione circolare).

tensione	25 kV
corrente	4 mA
distanza	100 cm
t. esp.	150 sec
lastre	Agfa D7 DW

TAVOLA 66

Bernardino Ferrari, *Resurrezione di Cristo* (1510-20), olio su tavola, Vigevano, Cattedrale, particolare del sarcofago (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 211 mm). Il disegno del sarcofago è stato inciso con una punta e l'ausilio di una riga; le linee appaiono chiare perché la materia pittorica che ha colmato le incisioni è più radiopaca degli strati preparatori.

Per i parametri operativi cfr. TAV. 65.

TAVOLA 67



Gerolamo da Carpi, *Ritratto di gentiluomo* (1550 circa), olio su tela, Roma, Galleria Nazionale di Arte Antica di Palazzo Barberini, particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 195 mm). Si nota un pentimento nella definizione dell'ovale del volto. Le macchie nere sono dovute a stuccature a cera, la cui bassissima radiopacità è trascurabile rispetto a quella dei materiali pittorici della preparazione e degli strati cromatici originali.

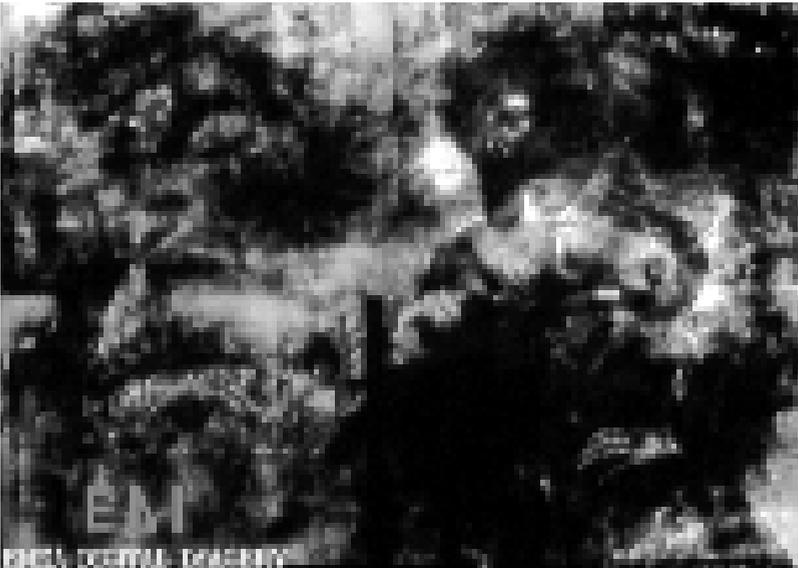
tensione	26 kV
corrente	7,8 mA
distanza	100 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7 DW

TAVOLA 68

a



b



Caravaggio, *La buona ventura* (1603), olio su tela, Roma, Pinacoteca Capitolina: a, visibile (115x160 cm), b, immagine radiografica.

La ricomposizione delle radiografie mostra chiaramente che l'opera è stata eseguita riutilizzando una tela già dipinta.

tensione	20 kV
corrente	8 mA
distanza	50 cm
t. esp.	120 sec
lastre	Agfa D7

TAVOLA 69



Caravaggio, *San Giovanni Battista* (1597-98), olio su tela, Roma, Pinacoteca Capitolina; anonimo, *San Giovanni Battista* (prima metà del XVII secolo), olio su tela, Roma, Galleria Doria Pamphilj, particolare del braccio destro del santo e del corno dell'ariete: a) immagine visibile del dipinto capitolino, b) immagine radiografica del dipinto capito-

**b****c**

lino, c) corrispondente immagine radiografica del dipinto della Galleria Doria Pamphilj (larghezza originale dell'immagine sulle lastre: 225 mm).

La sovrapposizione della stesura della punta del corno su quella dell'incarnato del braccio è tipica della costruzione delle figure; al contrario il risparmio della materia pittorica dell'incarnato nella corrispondente zona del dipinto della Galleria Doria Pamphilj ne denuncia lo status di copia.

Nella parte superiore dell'immagine 69c è visibile la curvatura nell'andamento dei fili orizzontali impressa dal tensionamento dei chiodi.

	b	c
tensione	38 kV	21 kV
corrente	9 mA	7,5 mA
distanza	100 cm	100 cm
t. esp.	60 sec	60 sec
lastre	Agfa D7	Agfa D7

TAVOLA 70



Caravaggio, *San Giovanni Battista* (1597-98), olio su tela, Roma, Pinacoteca Capitolina; anonimo, *San Giovanni Battista* (prima metà del XVII secolo), olio su tela, Roma, Galleria Doria Pamphilj, particolare della gamba destra del santo; immagini radiografiche del dipinto capitolino (a) e di quello della Galleria Doria Pamphilj (b); montaggi di due coppie di lastre contigue, larghezza originale dell'immagine sulle lastre: 450 mm.

Il confronto tra le due immagini radiografiche evidenzia differenze nel ductus delle pennellate con cui sono stati realizzati gli incarnati.

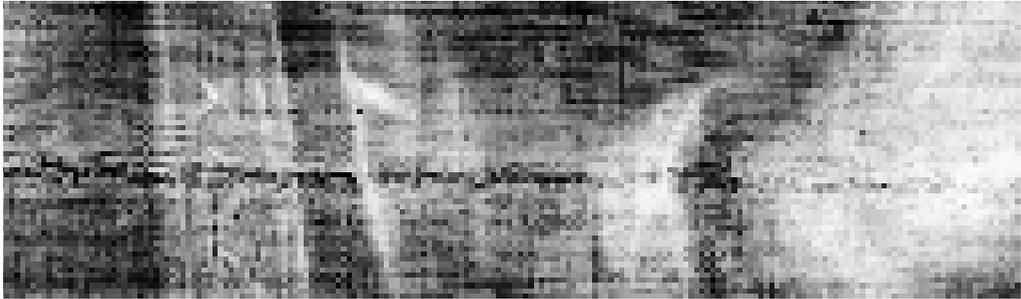
Per i parametri operativi cfr. TAV. 69.

TAVOLA 71



Caravaggio, *Conversione di san Paolo* (1601), olio su tela, Roma, Santa Maria del Popolo, particolare del montaggio fotografico delle radiografie. La stesura degli strati preparatori è stata eseguita con una spatola, da cui derivano la forte ombreggiatura e una diffusa disomogeneità nella resa radiografica.

tensione	30 kV
corrente	8,5 mA
distanza	85 cm
t. esp.	90 sec
lastre	Agfa D4 DW

TAVOLA 72

Anonimo, *Madonna con Bambino* (XVII sec.), olio su tela, collezione privata, particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 170 mm).

I teli con cui è realizzato il supporto sono giuntati con cucitura di testa.

tensione	25 kV
corrente	7
distanza	100 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D4 DW

TAVOLA 73

Anonimo, *Ritratto di giovinetta* (XVIII secolo), olio su tela, Ariccia, Palazzo Chigi, particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 180 mm).

Appare accentuato il contrasto del pizzo e dei ricami del vestito, perché realizzati con una stesura di biacca a corpo.

tensione	18 kV
corrente	10 mA
distanza	100 cm
t. esp.	60 sec
lastre	Agfa D7

TAVOLA 74

Vincent van Gogh, *Ritratto di Madame Ginoux (l'arlesiana)* (1890), olio su tela, Roma, Galleria Nazionale di Arte Moderna, particolare (larghezza originale dell'immagine sulla lastra: 136 mm).

Sono evidenti le pennellate, a causa di una materia corposa. L'assenza di deformazioni nell'andamento dei fili lungo il perimetro del dipinto indica che sul telaio è stata montata una tela preparata precedentemente, come generalmente avveniva a partire dal XIX secolo.

tensione	20 kV
corrente	9 mA
distanza	70 cm
t. esp.	120 sec
lastre	Agfa D7

7. La radiografia tra gli strumenti per la messa a fuoco del procedimento della pittura

Giovanna Martellotti

C.B.C. - Conservazione Beni Culturali

Il restauratore dispone di una serie di indagini non distruttive che possono essergli di grande aiuto per una conoscenza approfondita dell'opera su cui lavora. Queste brevi note, che derivano da esperienze di lettura assai spesso intrecciate con quelle degli amici dell'ENEA, tendono a sottolineare, in un testo tutto dedicato alla radiografia, l'importanza e l'utilità del confronto tra i diversi mezzi di indagine e tra questi e l'opera stessa. In particolare il confronto tra riflettografia all'infrarosso (IR), radiografia e visibile, può aiutare a ricostruire con una certa completezza i modi dell'esecuzione pittorica, come dimostrano i seguenti esempi, relativi alla *Pala di Pesaro* di Giovanni Bellini.

Nel plinto della predella, il piccolo dipinto raffigura San Terenzio in piedi su una base marmorea, disposta su un piano circoscritto da due gradini (figura 48). Il dettaglio della riflettografia IR evidenzia le linee condotte con la riga, che disegnano la giunzione angolare e costruiscono le due alzate e le pedate in prospettiva; non sono invece disegnate le giunzioni tra i diversi conci di pietra che compongono i gradini (figura 49).

Le linee di costruzione sono in realtà apprezzabili anche ad occhio nudo, in parte per trasparenza, in parte perché risparmiate dalla pittura. La radiografia ci aiuta in questa interpretazione, malgrado la forte interferenza dovuta alle fibre verticali del legno: i due gradini, dipinti in gradazioni di grigio, sono notevolmente meno radiopachi dei due piani quasi bianchi della pavimentazione; questi sono campiti risparmiando con precisione le linee del disegno (figura 50).

Solo una volta dipinti i gradini, sono tracciate con un bruno quasi trasparente le giunzioni tra i conci e le grappe piombate che li bloccano (figura 51).

Il confronto tra riflettografia, radiografia e visibile è di grande utilità anche per individuare i mutamenti di intenzione e per situarli nelle diverse fasi dell'esecuzione. È chiaro infatti che un cambiamento può intervenire tra disegno ed esecuzione pittorica o, all'interno dell'esecuzione pittorica stessa, tra una prima versione e una seconda. Ma è anche chiaro che talune differenze tra ciò che vediamo in un dipinto e ciò che individuiamo in radiografia rientrano, piuttosto che nel campo dei pentimenti, nella norma del processo esecutivo.

Nella *Conversione di Saulo* il cavaliere sulla destra, che si ripara gli occhi con le braccia alzate, rivela nella versione definitiva (figura 52) qualche differenza rispetto al disegno, ben documentato dalla riflettografia (figura 53).

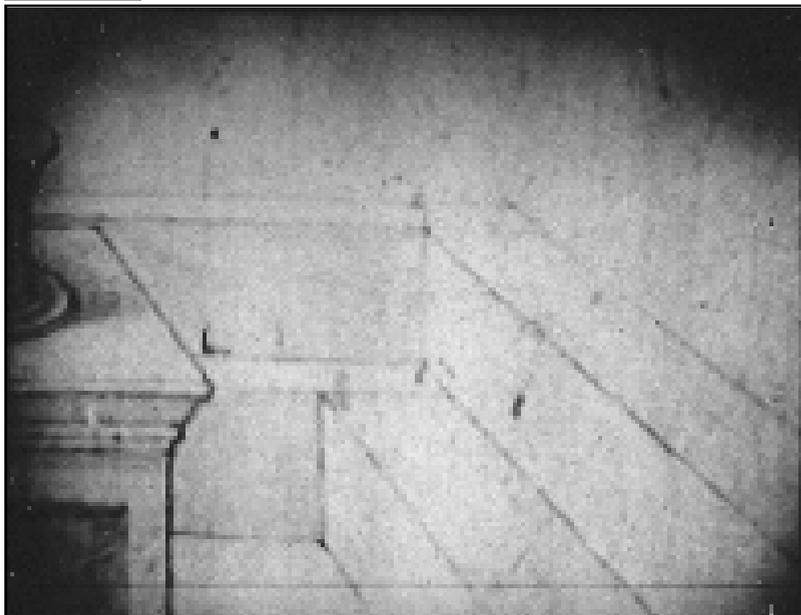
Figura 48



**Giovanni Bellini,
San Terenzio,
dalla predella
dell'*Incoronazione
della Vergine*
(1476), olio su
tavola, Pesaro,
Museo Civico**

In particolare il cappello disegnato è assai più contenuto rispetto alla stesura pittorica e si risolve in una calottina più bassa del colmo della criniera del cavallo. Se ora osserviamo la radiografia dello stesso dettaglio vediamo che la prima stesura del cielo, estremamente radiopaca, risparmia con una certa precisione la forma disegnata (figura 54). Questo non significa necessariamente che sia stata dipinta una prima versione più piccola del cappello e poi una versione definitiva. Se d'altra parte osserviamo in riflettografia il disegno della criniera del cavallo, lo vediamo riprodotto con grande precisione nella pittura, a dimostrare una perfetta corrispondenza tra

Figura 49



**Giovanni Bellini,
San Terenzio,
particolare dei
gradini nella
riflettografia IR
effettuata
dall'INOA**

progetto ed esecuzione (figure 53 e 52); eppure confrontando solo radiografia e visibile, ci sembrerebbe di individuare una correzione evidente nell'andamento della criniera, da un abbozzo più frastagliato e irregolare alla campitura di una criniera più composta e compatta (figure 54 e 52). Si tratta dunque non di mutamento d'intenzione ma di un normale modo di procedere: pur avendo un accurato disegno preparatorio, le campiture del cielo lo risparmiano con maggiore o minore precisione secondo le necessità, celandolo in parte laddove potrebbe essere utile una trasparenza di chiaro, come avviene appunto tra i ciuffi della criniera del cavallo.

Confrontando la radiografia del san Terenzio e quella in esame (figure 50 e 54), ci sembra di poter affermare che il pittore era molto più attento a non celare le linee costruttive dell'architettura, per non confonderne il nitore, di quanto lo fosse per i contorni delle piccole figure della predella. Queste si ricostruivano facilmente nella pittura, con pochi esperti tratti di pennello, come è chiaro per la mano del cavaliere, che appare informe e sfumata in radiografia.

Analogamente nello scomparto della *Natività*, il confronto tra radiografia (TAV. 45) e visibile (figura 55) documenta il procedimento pittorico che costruisce l'albero di fico: le campiture del cielo, fortemente radiopache, scontornano unicamente il tronco e i rami più grandi; poi, all'atto del dipingere l'albero, si prolungano i rami, si aggiungono rametti e si campiscono le foglie. Queste stesure, eseguite con colori di scarsa radiopacità e comunque molto più sottili delle campiture del cielo, sono sostanzialmente trasparenti ai raggi X e quindi inapprezzabili in radiografia. Ora mi sembra evidente che si tratta del procedimento più logico e veloce, logico anche se

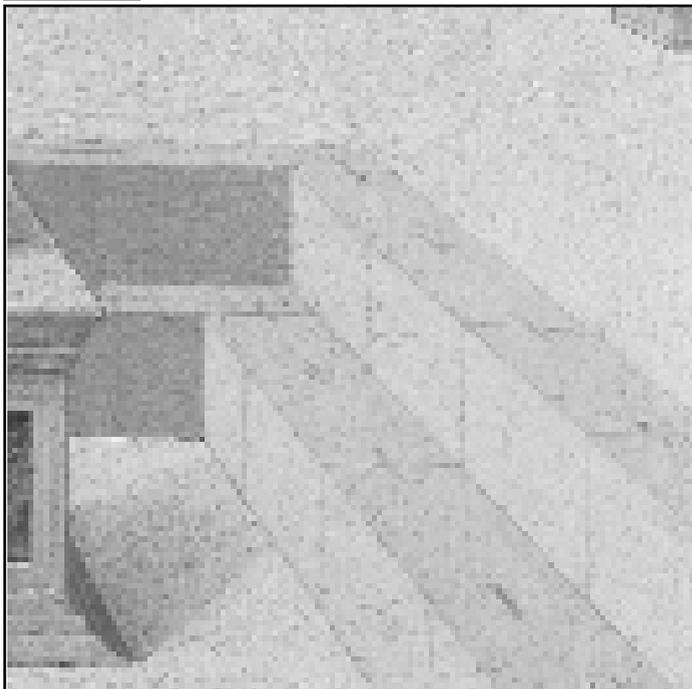
Figura 50

**Giovanni Bellini,
San Terenzio, ra-
diografia**

il fico era perfettamente tratteggiato, con tutte le sue fronde, nel disegno preparatorio.

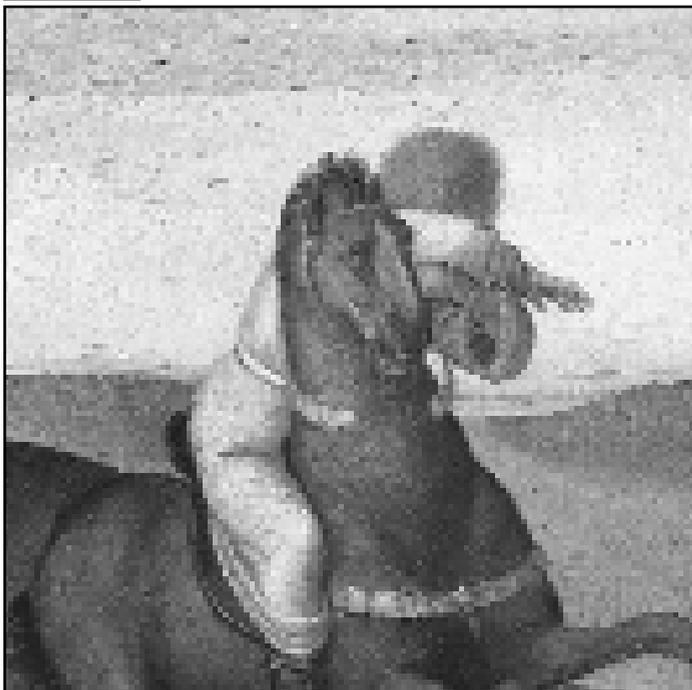
L'esempio chiarisce i rischi in cui si incorre leggendo una radiografia senza correlarla ad una lettura minuziosa dell'opera e sostenerla con una conoscenza approfondita delle tecniche e dei modi della pittura: Bellini infatti non ha mai "progettato" un fico secco, quale si vede in radiografia, ma controllando perfettamente la tecnica pittorica, sapeva che i piccoli particolari della vegetazione si sarebbero stagliati con grande naturalezza sulle pennellate larghe e piane del cielo.

Figura 51



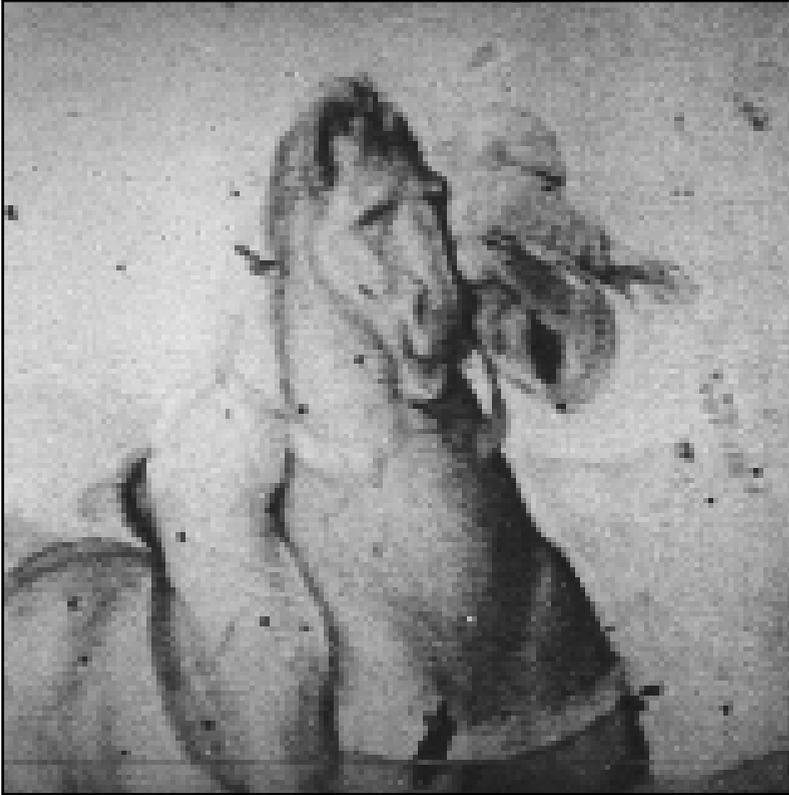
**Giovanni Bellini,
San Terenzio,
particolare dei
gradini nel visibile**

Figura 52



**Giovanni Bellini,
*Conversione di
Saul*, dalla
predella
dell'*Incoronazione
della Vergine*,
particolare del
cavaliere sul lato
destro del dipinto,
visibile**

Figura 53



**Giovanni Bellini,
*Conversione di
Saul*, particolare
del cavaliere nella
riflettografia IR
effettuata
dall'INOA**

Figura 54



**Giovanni Bellini,
*Conversione di
Saul*, particolare
del cavaliere nella
radiografia**

Un altro particolare che potrebbe invece interpretarsi come mutamento di intenzione, sia pure con la debita prudenza, è quello relativo all'incrocio delle braccia del cavaliere, sempre nella *Conversione di Saulo*. In riflettografia ci sembra di vedere il braccio destro fasciato da una manica più stretta e aderente; in radiografia leggiamo una pennellata di cielo che si insinua tra le due braccia; queste sono poi unite in un volume unico e compatto dalla pittura di due ampie maniche (figure 53, 54, 52). Se ora passiamo al volto del Cristo nella tavola centrale dell'*Incoronazione della Vergine* (figura 56), vi troviamo un mutamento di più complessa interpretazione, anche perché correlato ad una serie di altre correzioni che investono il braccio levato del Cristo e il viso della Vergine. Il confronto tra le diverse immagini (figure 56, 57, 58) documenta l'inclinarsi in avanti del volto, con una curvatura più accentuata del contorno della fronte e un prolungamento evidente del naso. In questo caso il confronto più stringente sembra quello tra immagine radiografica e ripresa a luce radente (TAV. 53 e figura 58): ambedue testimoniano che la versione disegnata deve esser stata scontornata con una certa precisione dalle prime campiture del paesaggio. Le stesure dell'incarnato, che vi si sovrappongono nella versione definitiva, ne

Figura 55



**Giovanni Bellini,
Natività, dalla
predella
dell'*Incoronazione
della Vergine*,
visibile**

Figura 56



**Giovanni Bellini,
*Incoronazione
della Vergine*,
volto di Cristo,
visibile**

Figura 57



**Giovanni Bellini,
*Incoronazione
della Vergine*,
particolare del
volto di Cristo,
riflettografia IR
effettuata
dall'INOA**

Figura 58



**Giovanni Bellini,
*Incoronazione
della Vergine*,
volto di Cristo,
particolare in luce
radente**

seguono l'accentuata crettatura: l'osservazione a luce radente ne documenta il corrugamento, la radiografia lo slittamento e la conseguente apertura dei cretti.

Per concludere, l'osservazione diretta dell'opera, anche con l'ausilio di strumenti ottici e di diverse fonti di luce, ci consente di apprezzare il gioco delle trasparenze, il risparmio più o meno preciso dei profili, il sovrapporsi ordinato o il fondersi delle campiture. Resta quindi supporto insostituibile per interpretare correttamente i dati che emergono dalle varie indagini, tra cui la radiografia costituisce un tassello fondamentale.

La lastra radiografica fornisce una somma di dati, la cui interpretazione può essere in alcuni casi molto semplice e univoca, in altri estremamente complessa: ad esempio per quanto riguarda i modi della pittura, una sua lettura isolata può essere fuorviante, in particolare quando ci si lancia in interpretazioni stilistiche, basate sul falso presupposto che l'immagine radiografica sia in qualche modo lo specchio più immediato dell'idea creativa, piuttosto che la somma di tutti i materiali sovrapposti, apprezzabili secondo la loro radiopacità e il loro spessore relativo.

Riferimenti bibliografici

- ACCARDO G. ACCARDO, P. MOIOLI, C. SECCARONI: *Taratura di lastre radiografiche per analisi di dipinti*, in *Atti della 3^a Conferenza internazionale sulle prove non distruttive, metodi microclimatici e indagini ambientali per lo studio e la conservazione delle opere d'arte*, Viterbo 4-8 ottobre 1992, pgg. 21-35.
- ALDROVANDI A. ALDROVANDI, O. CIAPPI: *Le indagini diagnostiche: recenti esperienze su alcune problematiche*, in *Problemi di restauro, Riflessioni e ricerche*, a cura di M. Ciatti, Firenze, 1992, pgg. 25-40.
- ALTHÖFER H. ALTHÖFER: *La radiologia per il restauro delle opere d'arte moderne e contemporanee*, Fiesole (FI), 1997, pgg. 11-13.
- BELLIA E. BELLIA, P. MOIOLI, C. SECCARONI: *Indagini non distruttive su terrecotte di grandi dimensioni*, in *La scultura in terracotta, tecniche e conservazione*, a cura di M.G. Vaccari, 1996, pgg. 146-155.
- BERNARDINI M.G. BERNARDINI: "La quale istoria è affatto senza azione", *la Conversione di S. Paolo di Caravaggio*, in *Caravaggio, Carracci, Maderno, la cappella Cerasi in S. Maria del Popolo a Roma*, Cinisello Balsamo (MI), 2001, pgg. 87-107.
- BOURRIOT A. BOURRIOT: *Une contribution à l'étude du support de toile au XVe siècle: la cas vénitien*, 'Indigo', 1998, pgg. 15-21.
- BUTAINÉ J.L. BUTAINÉ: *Betagraphie et techniques connexes dans l'examen des documents graphiques*, in *Atti dei Convegni Lincei, Congresso internazionale Applicazione dei Metodi Nucleari nel Campo delle Opere d'Arte*, Roma-Venezia, 1976, pgg. 429-442.
- CNEN Comitato Nazionale Energia Nucleare: *Manuale di protezione dalle radiazioni ionizzanti*, III edizione, Ed. CNEN, Roma, 1979, pg. 31.
- D'AVERSA F. D'AVERSA, P. MOIOLI, R. SCAFÈ: *La tomografia computerizzata come tecnica d'indagine non distruttiva su oggetti di interesse*

artistico, in *Atti della 3^a Conferenza internazionale sulle prove non distruttive, metodi microclimatici e indagini ambientali per lo studio e la conservazione delle opere d'arte*, Viterbo 4-8 ottobre 1992, pgg. 271-284.

- DEWILD A.M. DE WILD: *The Scientific Examination of Pictures*, Londra, 1929.
- DIANA M. DIANA, L. DI PALO, M. GIANNINI, F. FRAZZOLI, M.C. RAMORINO, S. SCIUTI: *Impiego di neutroni in esami radiografici*, 'Notiziario del Comitato Nazionale Energia Nucleare', anno 15, n. 4 (1969), pgg. 46-53.
- DLgs 230/95 Decreto Legislativo 17 marzo 1995, n. 230, *Attuazione delle direttive EURATOM 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti*, Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale n. 136 del 13 giugno 1995.
- DLgs 241/00 Decreto Legislativo 26 maggio 2000, n. 241, *Attuazione della direttiva 96/29/EURATOM in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti*, Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale n. 203 del 31 agosto 2000.
- DLgs 257/01 Decreto Legislativo 9 maggio 2001, n. 257, *Disposizioni integrative e correttive del decreto legislativo 26 maggio 2000, n. 241, recante attuazione della direttiva 96/29/EURATOM in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti*, pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 153 del 4 luglio 2001.
- ENEA 1999 Dossier ENEA1999, *La radioprotezione in Italia*, Ed. ENEA.
- EVANS 1955 R. D. EVANS: *The Atomic Nucleus*, New York, 1955.
- EVANS 1982 L.G. EVANS, J.R. LAPIDES, J.I. TROMBKA, D.H. JENSEN: *In Situ Elemental Analysis Using Neutron-Capture Gamma-Ray Spectroscopy*, 'Nuclear Instruments and Methods', 193 (1982), pgg. 353-357.
- EVANS 1986 L.G. EVANS, J.I. TROMBKA, R.A. LIVINGSTON, T.H. TAYLOR: *Neutron/Gamma-Ray Techniques for Investigating the Deterioration of Historical Buildings*, 'Nuclear Instruments and Methods', A242 (1986), pgg. 346-351.

- FERRETTI 1992 M. FERRETTI, G. GIRARDI, M. MASSIMI, P. MOIOLI, R. SCAFÈ: *Esami diagnostici sulla statua marmorea "Giove Egioco" del Museo Nazionale Romano*, in *Atti della 3^a Conferenza internazionale sulle prove non distruttive, metodi microclimatici e indagini ambientali per lo studio e la conservazione delle opere d'arte*, Viterbo 4-8 ottobre 1992, pgg. 291-306.
- FERRETTI 1993 M. FERRETTI: *Scientific Investigations of Works of Art*, ICCROM, Roma, 1993, pgg. 7-10.
- FICHTEL C.E. FICHTEL, J.I. TROMBKA: *Gamma-Ray Astrophysics. New Insight into the Universe*, NASA SP-453, U.S. Government Printing Office, Washington DC, 1981.
- Gazzetta Errata-corrige pubblicata nella Gazzetta Ufficiale n. 68 del 22/3/2001, pgg. 79-80.
- GILARDONI 1992 C. GILARDONI: *Digital Treatment Technique of Radiographic and Fluoroscopic Image in the Diagnosis of Works of Art*, in *Atti della 3^a Conferenza internazionale sulle prove non distruttive, metodi microclimatici e indagini ambientali per lo studio e la conservazione delle opere d'arte*, Viterbo 4-8 ottobre 1992, pgg. 349-354.
- GILARDONI 1994 A. GILARDONI, M. TACCANI GILARDONI, A. ASCANI ORSINI, L. ASCANI ORSINI, S. TACCANI: *X-Rays in Art*, Mandello del Lario (LC), 1994.
- GUIDA G. GUIDA: *La betagrafia nell'esame dei documenti grafici*, in *In Atti della Conferenza internazionale sulle prove non distruttive, nella conservazione delle opere d'arte*, Roma, 1985, pgg. 1-31.
- HALMSHAW R. HALMSHAW (a cura di): *Radiografia industriale* (Agfa-Gevaert), 1989, Morstel, pgg. 63-64.
- LONE M.A. LONE, R.A. LEAVITT, D.A. HARRISON: *Prompt Gamma Rays from Thermal-Neutron Capture*, 'Atomic Data and Nuclear Data Tables', 26 (1981), pgg. 511-559.
- MARLIJNISSEN R.H. MARLIJNISSEN: *Tableaux. Authentiques, maquilles, faux*, Zaventem, 1985, pgg. 17-36.
- MARTIN E. MARTIN, A. JARRY, M. JEANNE, C. MANCUSO, N. VOLLE: *Les Muses Baglione: restauration et contexte technique*, 'Techné', 17 (2003), pgg. 28-36.

- MASSIMI 1990 M. MASSIMI A. MELCHIORRI, P. MOIOLI, R. SCAFÈ, C. SECCARONI: *Le indagini non distruttive*, in *Identificazione di un Caravaggio. Nuove tecnologie per una rilettura del S. Giovanni Battista*, a cura di G.P. Correale, Venezia, 1990, pgg. 115-118.
- MASSIMI 1992 M. MASSIMI A. MELCHIORRI, P. MOIOLI, A. TOGNACCI: *Le indagini gammagrafiche*, in *La Chimera d'Arezzo*, Firenze, 1992, pgg. 99-106.
- MEDURI A. MEDURI, T. PIRRONI, D. CALICCHIO, F. RISPOLI, M. VIDALE, P. MARANO: *Xeroradiografia e radiografia digitale a luminescenza nello studio delle tecniche di manifattura della ceramica antica*, 'La Radiologia Medica', 86 (1993), pgg. 116-126.
- MCMMASTER W.H. MCMMASTER, N. KERR DEL GRANDE, J.H. MALLETT, J.H. HUBBEL: *Compilation of X-Ray Cross Sections*, Lawrence Radiation Laboratory, UCRL-50174 Sect. II, Rev. 1.
- MMA *Art and Autoradiography: Insights into the Genesis Oil Paintings by Rembrandt, Van Dyck, and Vermeer*; The Metropolitan Museum of Art, New York, 1982.
- MOIOLI 1985 P. MOIOLI, L.G. EVANS, J.I. TROMBKA, R.A. LIVINGSTON: *Measurement of Pollutants in Historical Walls by Radiative Neutron Capture*, Proceedings AISA-ISSA *New Paths in the Use of Nuclear Techniques for Art and Archaeology*, Trieste 30 settembre-3 ottobre 1985, pgg. 90-102.
- MOIOLI 1988 P. MOIOLI, D. ANTONINI, R. SCAFÈ, M. GIANNINI: *Misure di distribuzione di elementi in pareti di interesse storico mediante la cattura radiativa di neutroni. Analisi dei dati sperimentali mediante codici di trasporto di raggi gamma e neutroni*, in *Atti della 2^a Conferenza internazionale sulle prove non distruttive, metodi microclimatici e indagini ambientali per lo studio e la conservazione delle opere d'arte*, Perugia 17-20 aprile 1988, pgg. II/14.1-14.
- MOIOLI 2003 P. MOIOLI: *Gammagraphic Examination of the Pietà*, in J. Wasserman: *Michelangelo's Florence Pietà*, Princeton, 2003, pgg. 197-199.
- POLVANI C. POLVANI: *Elementi di radioprotezione*, Ed. ENEA, Roma, 1990, pgg. 185-227.

- RAVAUD 1994 E. RAVAUD, B. CHANTELARD: *Les supports utilisés par Poussin à travers l'étude des radiographies du Laboratoire*, 'Techné', 1 (1994), pgg. 23-34.
- RAVAUD 2001 E. RAVAUD, E. MARTIN: *Le diagnostic radiologique des transpositions*, 'Techné', 13-14 (2001), pgg. 112-118.
- RUGGIERO D. RUGGIERO: *Le filigrane antiche e la loro riproduzione*, 'Kermes', 36 (1999), pgg. 21-34.
- SCIUTI 1974 S. SCIUTI: *Appunti sui metodi nucleari di analisi tecnologiche*, C.N.E.N. RT.ING (74) 36 (1974), pg. 14.
- SCIUTI 1979 S. SCIUTI, F. SABATINI, A. FESTINESI: *Su alcuni impieghi di traccianti stabili evidenziati mediante attivazione neutronica (NAA)*, 'Notiziario del Comitato Nazionale Energia Nucleare', anno 25, n. 1 (1979), pgg. 30-36.
- SAYRE E.V. SAYRE, H. N. LECHTMAN: *Neutron Activation Autoradiography of Oil Paintings*, 'Studies in Conservation', 13 (1968), pgg. 161-185.
- SECCARONI 2002 C. SECCARONI, P. MOIOLI: *Fluorescenza X. Prontuario per l'analisi XRF portatile applicata a superfici policrome*, Firenze, 2002, pgg. 8-10.
- SECCARONI 2001 C. SECCARONI: *Lettura radiografica dei dipinti*, in *Caravaggio, Carracci, Maderno, la cappella Cerasi in S. Maria del Popolo a Roma*, Cinisello Balsamo (MI), 2001, pgg. 158-162.
- VAN DE WETERING E. VAN DE WETERING: *Rembrandt. The Painter at Work*, Amsterdam, 2000, pgg. 91-31.
- WALKER F.W. WALKER, D.G. MILLER, F. FEINER: *Chart of the Nuclides. Thirteenth Edition*, General Electric, San José, 1983.

Appendice A - Glossario

Ångström. Sottomultiplo del metro, simbolo Å, equivale a 10^{-10} m (vedi Appendice B).

Anodo. Elettrodo positivo di un generatore di raggi X, che costituisce anche il bersaglio su cui incidono gli elettroni accelerati.

Attività di una sorgente. Numero di decadimenti in un secondo. Si misura in becquerel (Bq) o in Curie (Ci), (vedi Appendice B).

Autoradiografia. Tecnica radiografica che consiste nel rendere temporaneamente radioattivo un oggetto e porlo a contatto della lastra.

Bequerel. Unità di misura dell'attività (v.) di una sorgente (v. Appendice B).

Bersaglio. Superficie dell'anodo di un generatore che viene colpita dagli elettroni accelerati, dalla quale viene emesso il fascio di raggi X.

Bremsstrahlung (radiazione di). Radiazione emessa quando gli elettroni accelerati vengono frenati dagli "urti" contro la nuvola di elettroni degli atomi dello strato esterno del bersaglio; è detta anche radiazione di frenamento. Ha uno spettro (v.) continuo.

Camera a ionizzazione. Camera riempita di gas e contenente due elettrodi. Un fotone, o una particella carica, che la attraversa provoca la ionizzazione del gas, cioè la produzione di coppie di ioni positivi e negativi, che vengono attratti del campo elettrico esistente tra i due elettrodi. Se la camera viene usata per misure integrali di dose assorbita, gli elettrodi sono collegati alle armature di un condensatore carico. Gli ioni raccolti fanno variare la differenza di potenziale fra di essi di una quantità proporzionale all'energia complessiva ceduta dalle particelle ionizzanti, e quindi alla dose assorbita.

Catodo. Elettrodo negativo di un generatore sul quale si trova anche il filamento caldo che emette elettroni.

Coefficiente di assorbimento. Quantità che riassume le caratteristiche di una sostanza per quanto riguarda l'assorbimento di radiazione elettromagnetica, è funzione dell'energia della radiazione stessa e si misura in cm^{-1} .

Collimatore. Dispositivo che limita le dimensioni trasversali di un fascio di radiazioni.

Contentore di sorgente. Dispositivo nel quale viene conservata la sorgente quando non è in uso. È costituito da materiale molto denso, piombo o uranio, e di spessore opportuno in modo da schermare verso l'esterno i raggi γ emessi. Se l'attività della sorgente è particolarmente elevata il contenitore è dotato di un sistema di estrazione, spesso telecomandato, per l'esecuzione degli irraggiamenti.

Contrasto fotografico. Pendenza della parte centrale della curva caratteristica, o di densità, di una lastra radiografica.

Contrasto radiografico. Rapporto tra le densità fotografiche (v.) di due aree adiacenti di una lastra radiografica. È il risultato della combinazione del c. fotografico (v.) e del c. radiologico (v.).

Contrasto radiologico. Rapporto tra le quantità di radiazione trasmesse da due aree adiacenti di uno stesso oggetto. È tanto maggiore quanto più bassa è l'energia della radiazione stessa.

Curie. Unità di misura dell'attività (v.) di una sorgente (v. Appendice B).

Definizione. Concetto che esprime la nitidezza dei dettagli di un'immagine radiografica.

Densità fotografica. Logaritmo decimale del rapporto fra le intensità della luce incidente e di quella trasmessa da una zona di una radiografia.

Densitometro. Strumento per misurare la densità radiografica (v.) sui diversi punti di una radiografia.

Diffusione. Processo di interazione dei fotoni X e γ con la materia nel quale essi vengono deviati dalla loro traiettoria. Nel processo l'energia dei fotoni può rimanere inalterata (d. elastica) o può variare (d. anelastica). Quest'ultima è tanto più intensa quanto maggiore è l'energia dei fotoni incidenti e quanto minore è la densità del mezzo attraversato, e determina la formazione di aloni e la perdita di definizione dell'immagine radiografica.

Dose assorbita. Energia per unità di massa impartita dalla radiazione elettromagnetica all'oggetto su cui incide. Si misura in Gray (v. Appendice B).

Dosimetro. Strumento per misurare la dose assorbita (v.).

Elettrone. Particella elementare dotata di una carica elettrica negativa e di una massa 1837 volte inferiore a quella dell'atomo di idrogeno.

Emulsione fotografica. Sospensione di materiale sensibile alla radiazione elettromagnetica, costituito da grani di alogenuri di argento, in un mezzo gelatinoso.

eV. Unità di misura dell'energia della radiazione elettromagnetica (v. Appendice B).

Filamento. Elemento collocato sul catodo di un generatore e mantenuto ad alta temperatura, dal quale vengono emessi gli elettroni che vengono accelerati dal campo elettrico fra catodo e anodo.

Fissaggio. Processo di rimozione dei grani di bromuro di argento dell'emulsione non utilizzati durante lo sviluppo (v.)

Fissione. Reazione nucleare nella quale il nucleo di un elemento molto pesante si divide in due frammenti radioattivi di massa leggermente diversa, emettendo contemporaneamente 2 o 3 neutroni (v.), oltre ad una certa quantità di energia.

Fluoroscopia. Produzione di un'immagine su uno schermo reso fluorescente mediante irraggiamento di raggi X.

Fotone. La radiazione elettromagnetica può essere trattata come un'onda che si propaga, oppure come un insieme di particelle prive di massa, dette appunto fotoni, che viaggiano alla velocità della luce, trasportando energia. Un fascio di raggi X, così come un fascio di luce, può pertanto essere trattato come un fascio di fotoni.

Frenamento (radiazione di) v. Bremsstrahlung.

Frequenza. Numero di massimi o di minimi di un'onda elettromagnetica che passano per un punto dello spazio in un secondo, si misura in cicli per secondo (sec^{-1}) o Hertz (Hz). È legata alla lunghezza d'onda (v.) della radiazione e alla sua energia.

Immagine latente. Immagine prodotta dalla radiazione che investe l'emulsione di una lastra radiografica e diviene realmente visibile col processo di sviluppo (v.).

Ionizzazione. Processo per cui vengono rotti tutti o alcuni dei legami elettronici in un atomo o in una molecola, con conseguente produzione di due particelle dotate di cariche di segno opposto.

Irraggiamento. Esposizione di un oggetto ai raggi X, ai raggi γ o a qualsiasi radiazione ionizzante.

Isotopi. Atomi che possiedono lo stesso numero atomico Z, ma numero di massa A diverso: il loro nucleo contiene lo stesso numero di protoni, ma un numero diverso di neutroni. Hanno le stesse proprietà chimiche e quindi occupano lo stesso posto, da cui il nome, nel sistema periodico degli elementi.

Lastra radiografica. Supporto trasparente ricoperto sulle due facce da uno strato di emulsione fotografica (v.), utilizzato per registrare immagini radiografiche.

Macchia focale. Area del bersaglio, sull'anodo (v.) di un generatore di raggi X, che viene colpita dagli elettroni accelerati e dalla quale vengono emessi i raggi X. Viene anche detta *fuoco*. Le sue dimensioni influenzano la sfumatura dei contorni dell'immagine radiografica.

Neutrone. Particella elementare costituente, insieme al protone (v.), il nucleo di un atomo. Ha una massa uguale a quella del protone ed è elettricamente neutra. I nuclei degli atomi di uno stesso elemento chimico ne possono contenere un numero variabile (v. isotopi).

Numero atomico. Numero di elettroni dell'atomo di un elemento, si indica con Z ed è uguale al numero di protoni contenuti nel nucleo. Determina le proprietà chimiche dell'elemento e la sua collocazione nel sistema periodico.

Protone. Particella elementare costituente, insieme al neutrone (v.), il nucleo di un atomo. Ha una massa uguale a quella dell'atomo di idrogeno ed è dotato di una carica elettrica positiva pari a quella dell'elettrone. I nuclei degli atomi di uno stesso elemento chimico ne contengono un numero costante pari al numero atomico Z (v.).

Radiazione elettromagnetica. Onda generata da un campo elettrico o magnetico rapidamente variabile che si propaga nello spazio con la velocità della luce. Può essere trattata come un'onda oppure come un insieme di fotoni (v.).

Raggi gamma (γ). Radiazione elettromagnetica emessa nel processo di decadimento di un nucleo radioattivo.

Raggi X. Radiazione elettromagnetica prodotta dall'urto di elettroni contro il bersaglio. È detta anche radiazione di *Bremsstrahlung* (frenamento).

Rapidità. Caratteristica di ogni tipo di lastra radiografica che determina la esposizione necessaria per ottenere una buona immagine radiografica.

Sfumatura. Indeterminazione dei contorni sull'immagine radiografica dovuta alle dimensioni della macchia focale (v.) e alla geometria sorgente-oggetto-lastra.

Sottosviluppo. Sviluppo (v.) inferiore a quello richiesto per avere una buona immagine. Può essere determinato da una durata insufficiente, da una temperatura troppo bassa, da una scarsa agitazione della lastra o dall'impiego di una soluzione inadeguata.

Sovraesposizione. Esposizione troppo prolungata di una lastra alla radiazione elettromagnetica.

Spettro della radiazione. Grafico avente in ascisse l'energia e in ordinate il numero corrispondente di fotoni rivelati in un dato intervallo di tempo.

Stratoradiografia o radiografia stratigrafica. Tecnica di esecuzione delle radiografie di dipinti su tavola ottenuta facendo muovere la sorgente durante gli irraggiamenti lungo una traiettoria oscillante, oppure rotante, oppure oscillante e rotante contemporaneamente, allo scopo di sfuocare l'immagine dei particolari del supporto cambiando continuamente il loro angolo di proiezione.

Sviluppo. Processo chimico mediante il quale si rendono neri i granuli di argento metallico che costituiscono l'immagine latente (v.) formata dalla radiazione elettromagnetica sulla lastra radiografica, rendendo visibile l'immagine stessa. È influenzato dalla durata del trattamento, dalla temperatura del liquido impiegato, dalla composizione di quest'ultimo. Con questo termine si indica anche il liquido impiegato.

Velo. Densità radiografica intrinseca del supporto trasparente della lastra radiografica.

Appendice B

Unità di misura richiamate nel testo

- Å** (**Ångström**). Sottomultiplo del metro: $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$. Viene utilizzato per la misura della lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica nella zona dei raggi X.
- Bq** (**Bequerel**). Unità di misura dell'attività di una sorgente radioattiva nel Sistema Internazionale (SI), equivalente a 1 disintegrazione al secondo (dis/sec).
Multipli: **kBq** ($=10^3 \text{ Bq}$), **MBq** ($=10^6 \text{ Bq}$).
- Ci** (**Curie**). Vecchia unità di misura dell'attività di una sorgente, equivalente a $3,7 \cdot 10^{10} \text{ dis/sec}$, cioè al numero di disintegrazioni al secondo che avvengono in un grammo di radio. Nel SI si utilizza il Bq (v.): $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.
Sottomultipli: **mCi** ($=10^{-3} \text{ Ci}$), **µCi** ($=10^{-6} \text{ Ci}$).
- eV** (**elettronvolt**). Energia cinetica acquistata da un elettrone nel passaggio tra due punti tra cui è applicata una d.d.p. di 1 Volt. Viene utilizzata come unità di misura dell'energia delle particelle elementari e della radiazione elettromagnetica e corrisponde a $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ joule}$ nel SI.
Multipli: **keV** ($=10^3 \text{ eV}$), **MeV** ($=10^6 \text{ eV}$).
- Gy** (**Gray**). Unità di misura della *dose assorbita*, cioè dell'energia depositata dalle radiazioni ionizzanti nell'unità di massa di materiale irradiato: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule/kg}$.
Sottomultipli: **mGy** ($=10^{-3} \text{ Gy}$), **µGy** ($=10^{-6} \text{ Gy}$).
Vengono tutt'ora utilizzati strumenti di misura nei quali viene indicata una vecchia unità, il cui uso dovrebbe essere superato, il rad: $1 \text{ rad} = 0,01 \text{ joule/kg} = 0,01 \text{ Gy}$, con analoghi sottomultipli.
- Gy/h** (**Gray/ora**). Unità di misura, nel SI, della rapidità con cui la dose viene assorbita, cioè del rateo di dose, con i sottomultipli mGy/h e µGy/h. Nelle vecchie unità si usa il rad/h con i suoi sottomultipli.

rad

(v. Gy)

Sv

(Sievert). Unità di misura, nel SI, della *dose equivalente* assorbita dal corpo umano, il cui valore si ottiene moltiplicando la dose assorbita per il fattore di ponderazione della radiazione che tiene conto della natura e dell'energia di quest'ultima. È anche l'unità di misura della *dose efficace* assorbita dai singoli organi, ottenuta anch'essa mediante fattori di ponderazione che tengono conto delle sensibilità dei singoli organi alla radiazione (v. cap. 5).

Sottomultipli: **mSv** ($=10^{-3}$ Sv), **μSv** ($=10^{-6}$ Sv).

Nelle vecchie unità si usa il rem: 1 rem=0,01 Sv.

Sv/h

(Sievert/ora). Misura la rapidità con cui la dose equivalente e la dose efficace vengono assorbite, cioè il rateo di dose equivalente e di dose efficace; nelle vecchie unità si usa il rem/h.

Edito dall' **ENEA**
Funzione Centrale Relazioni Esterne
Unità Comunicazione

Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma
www.enea.it

Edizione del volume a cura di Giuliano Ghisu
Stampa: Primaprint (Viterbo)
Finito di stampare nel mese di novembre 2004



ENEA

**ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E L'AMBIENTE**

Lungotevere Thaon di Revel, 76
00196 ROMA

www.enea.it

ISBN 88-8286-109-0

15,00 €