

*F. Petrucci*  
*Dipartimento di Fisica e INFN - Ferrara*

*Applicazioni della radiografia digitale  
per imaging di dipinti*

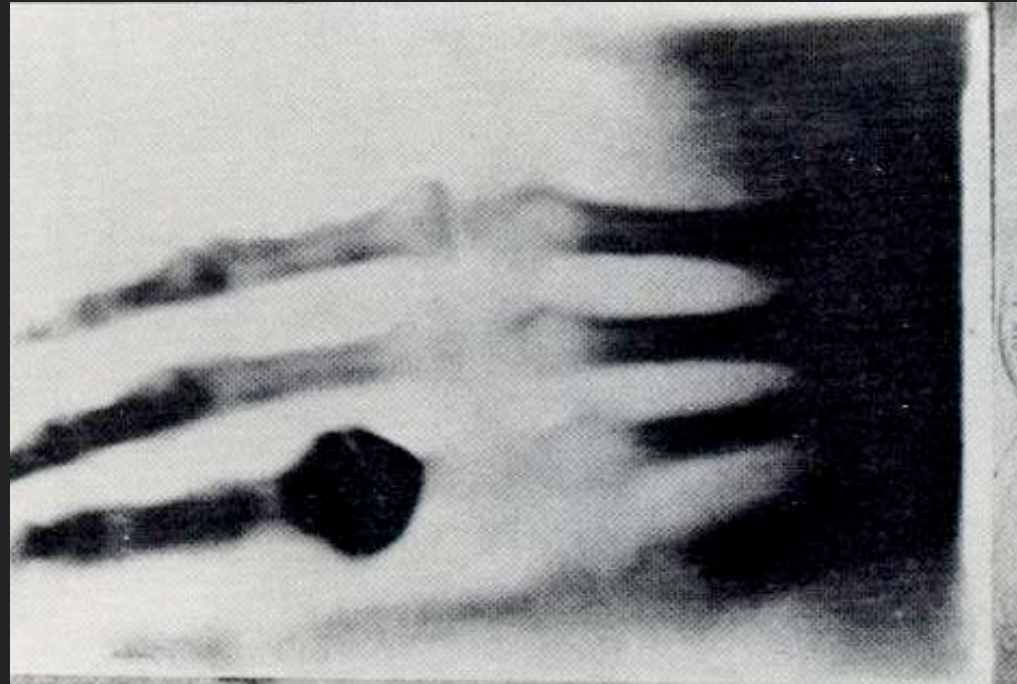
*Torino, 25 Novembre 2009*



La scoperta dei raggi X:  
8 Novembre 1895

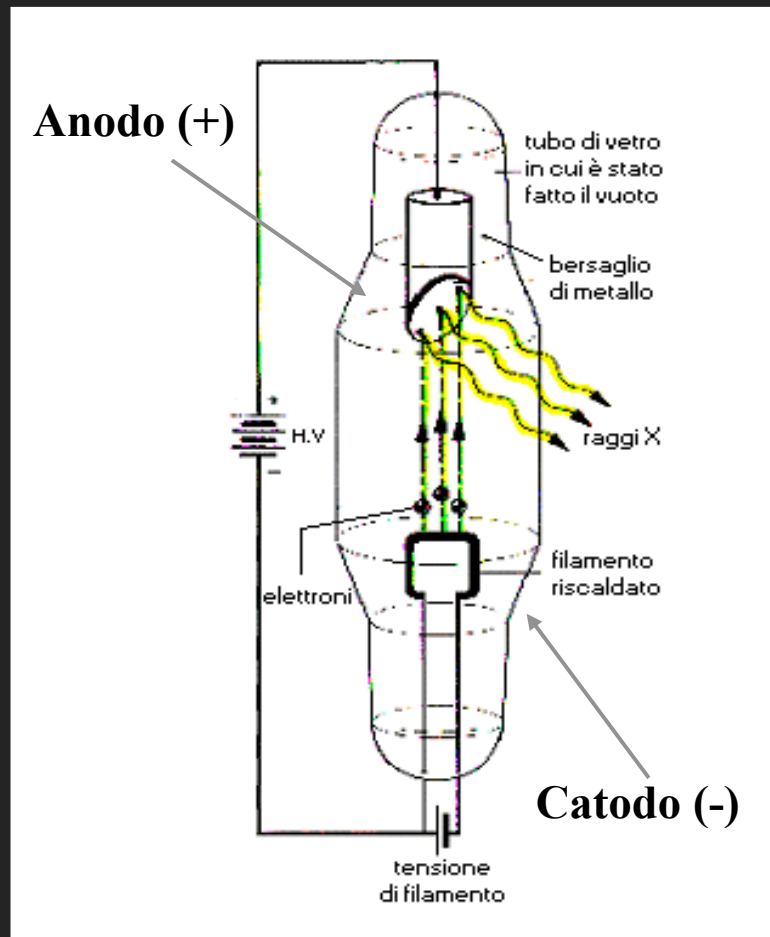
Roentgen, premio Nobel  
per la Fisica nel 1901

# La prima “roentgenografia”



Radiografia della mano della signora Roentgen (22 dicembre 1895): questa fu la prima “roentgenografia” e fu pubblicata sul New York Times il 16 gennaio del 1896.

# Il tubo a raggi X

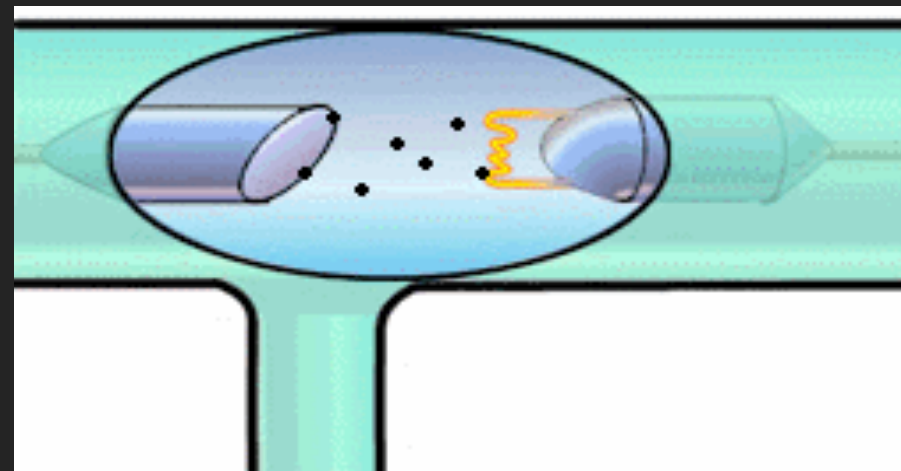
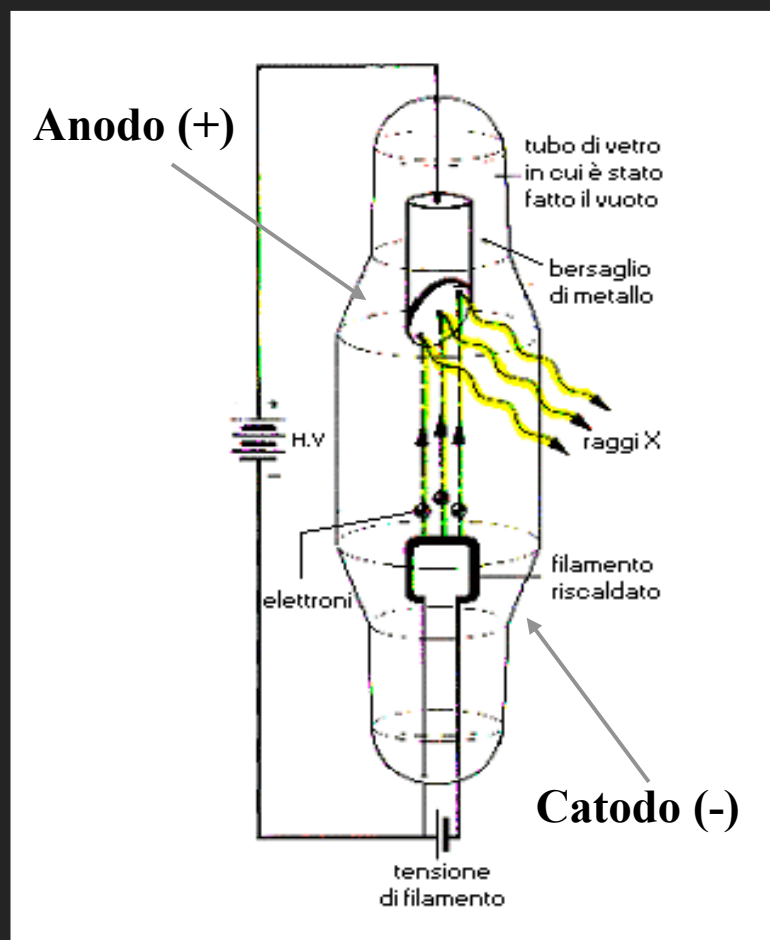


In un tubo radiogeno, elettroni emessi da un catodo riscaldato vengono accelerati da una tensione positiva di alcune migliaia di Volt (kV) verso un anodo di metallo (Cu, Mo, W).



questa è una slide realizzata da Maria Pia Morigi: grazie!

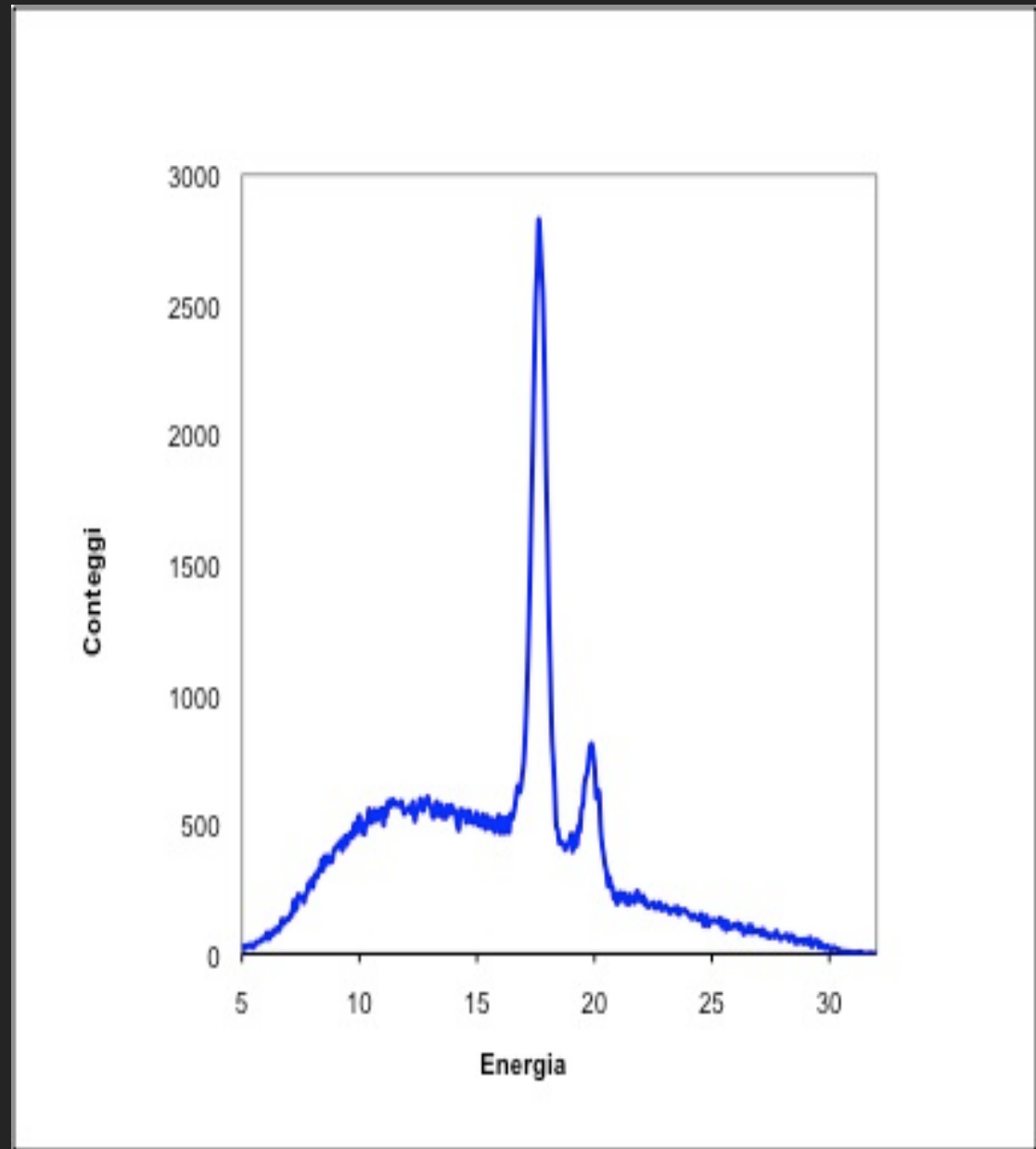
# Il tubo a raggi X



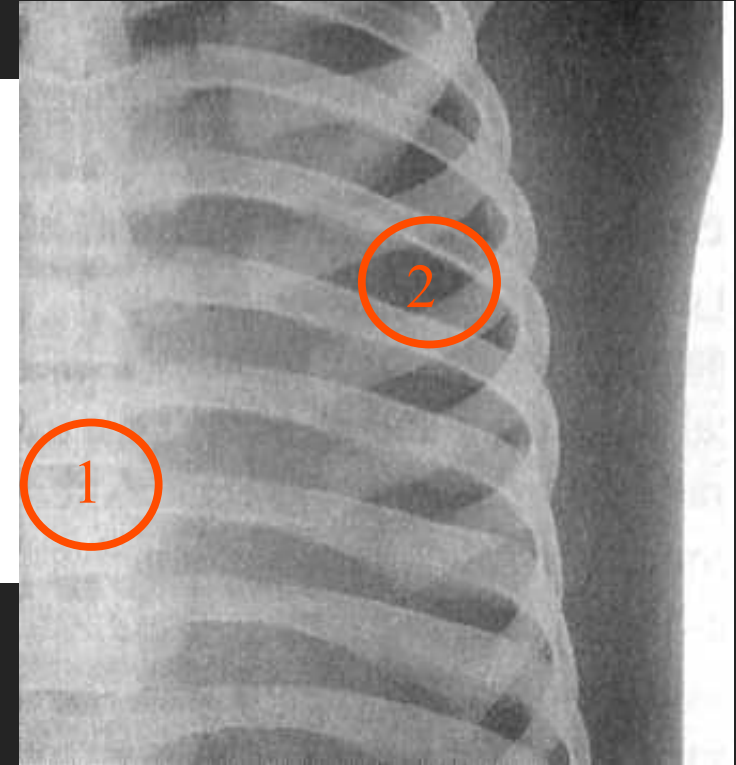
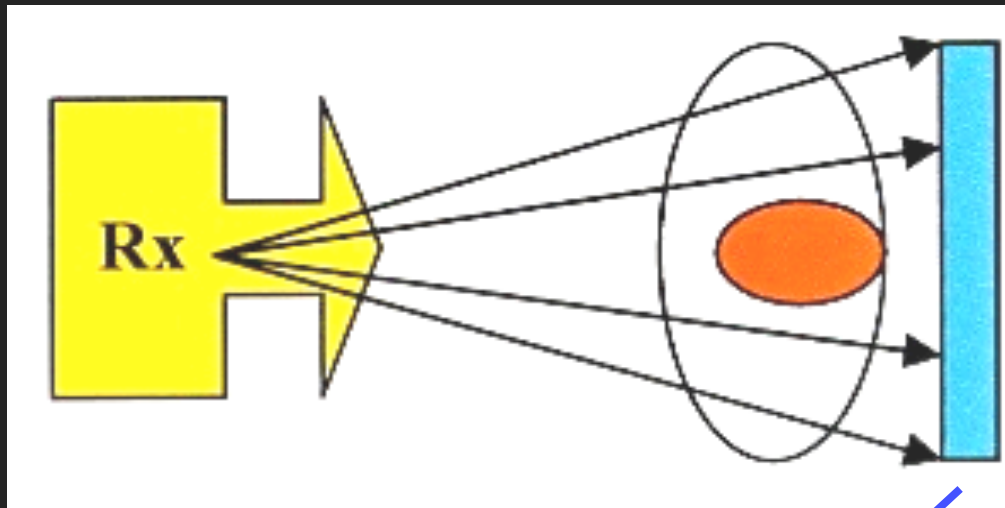
I fotoni X sono emessi per radiazione di frenamento (bremsstrahlung) dagli elettroni bruscamente decelerati dall'anodo.

Al caratteristico spettro continuo di bremsstrahlung dei raggi X prodotti da un tubo radiogeno si sovrappongono le righe di fluorescenza del materiale che costituisce l'anodo.

tubo a 30 kV  
anodo di Molibdeno

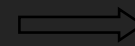


# La radiografia tradizionale

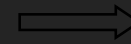


Rivelatore : lastra radiografica

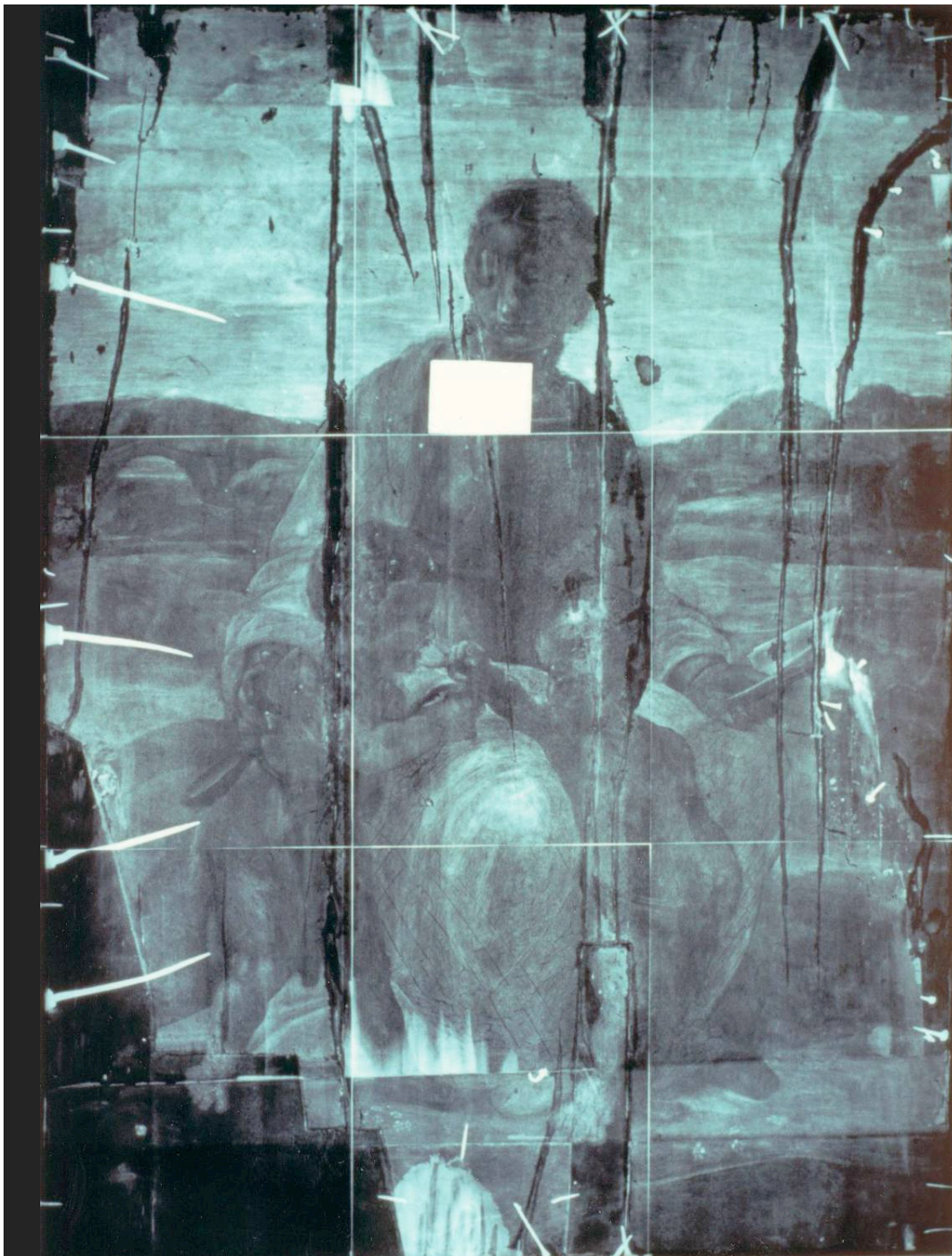
1. Minor numero di raggi X
2. Maggior numero di raggi X



zone  
chiare



zone  
scure



*Raffaello  
Madonna del Cardellino  
Firenze, Galleria Palatina*

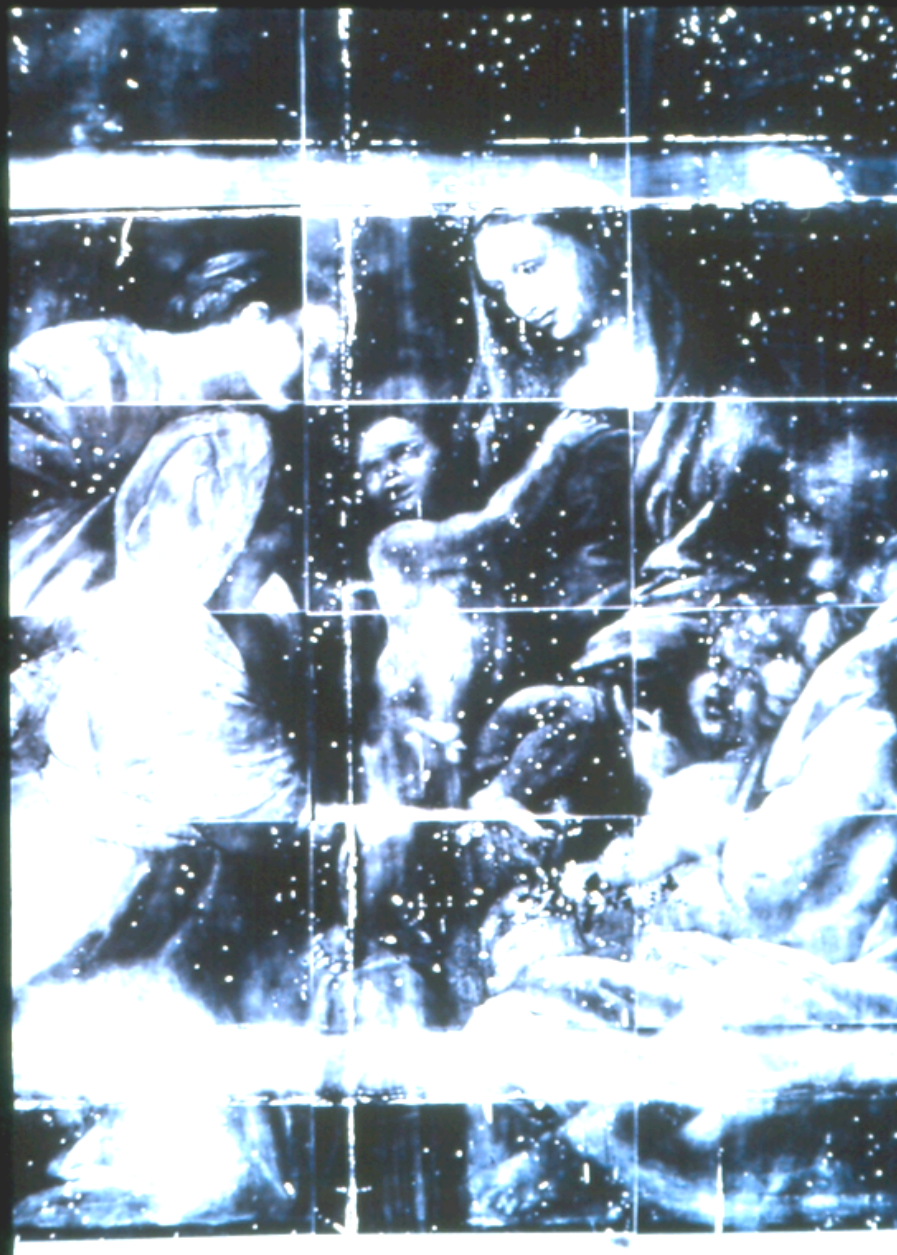
*Foto in luce visibile*

*Radiografia E.Di.Tech., Firenze*

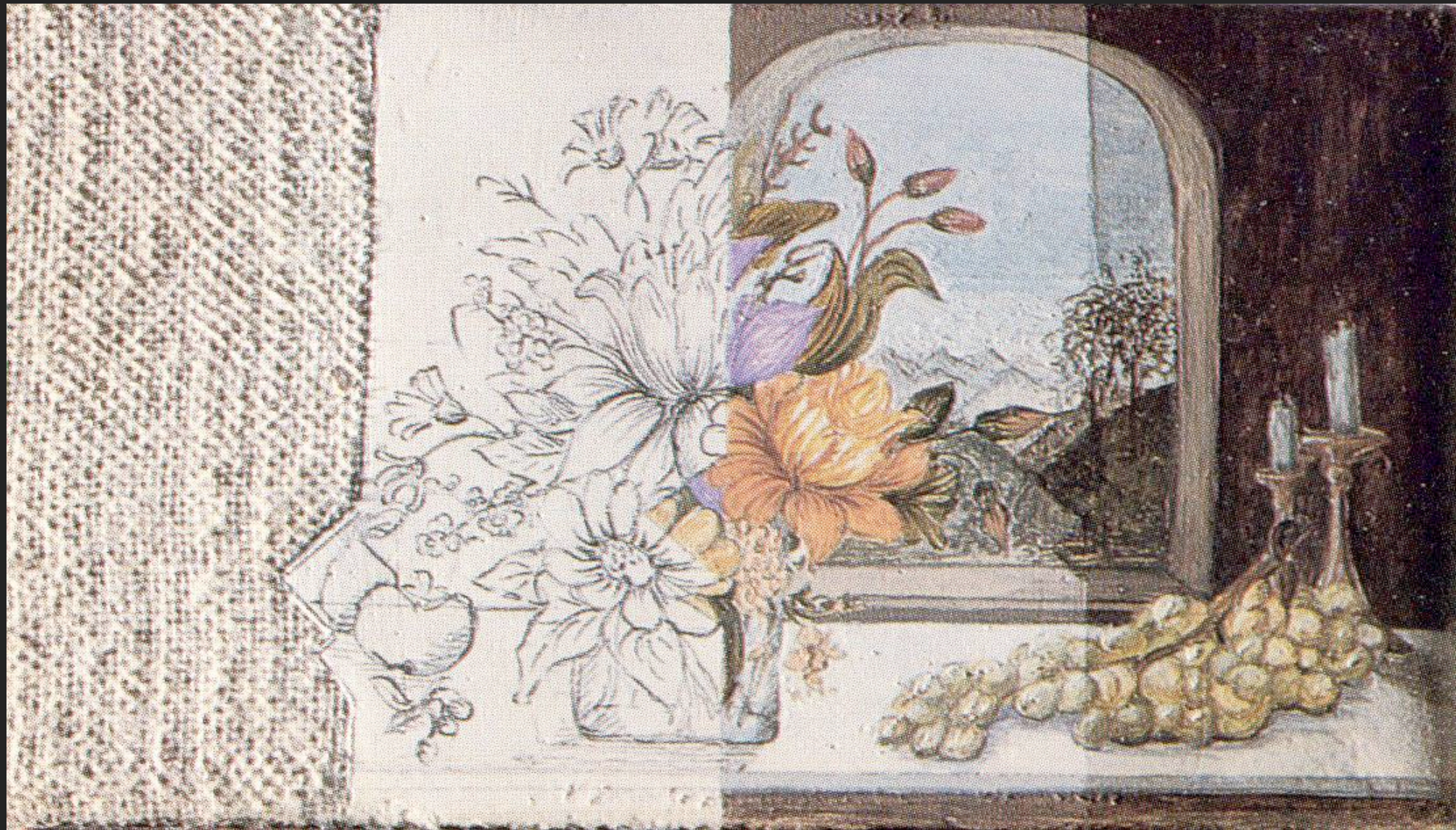


*Raffaello*  
*Madonna dell'Impannata*  
*1513-14*  
*Olio su tavola, 158 x 125 cm*

*Galleria Palatina (Palazzo  
Pitti), Firenze*  
*Radiografia E.Di.Tech.,  
Firenze*







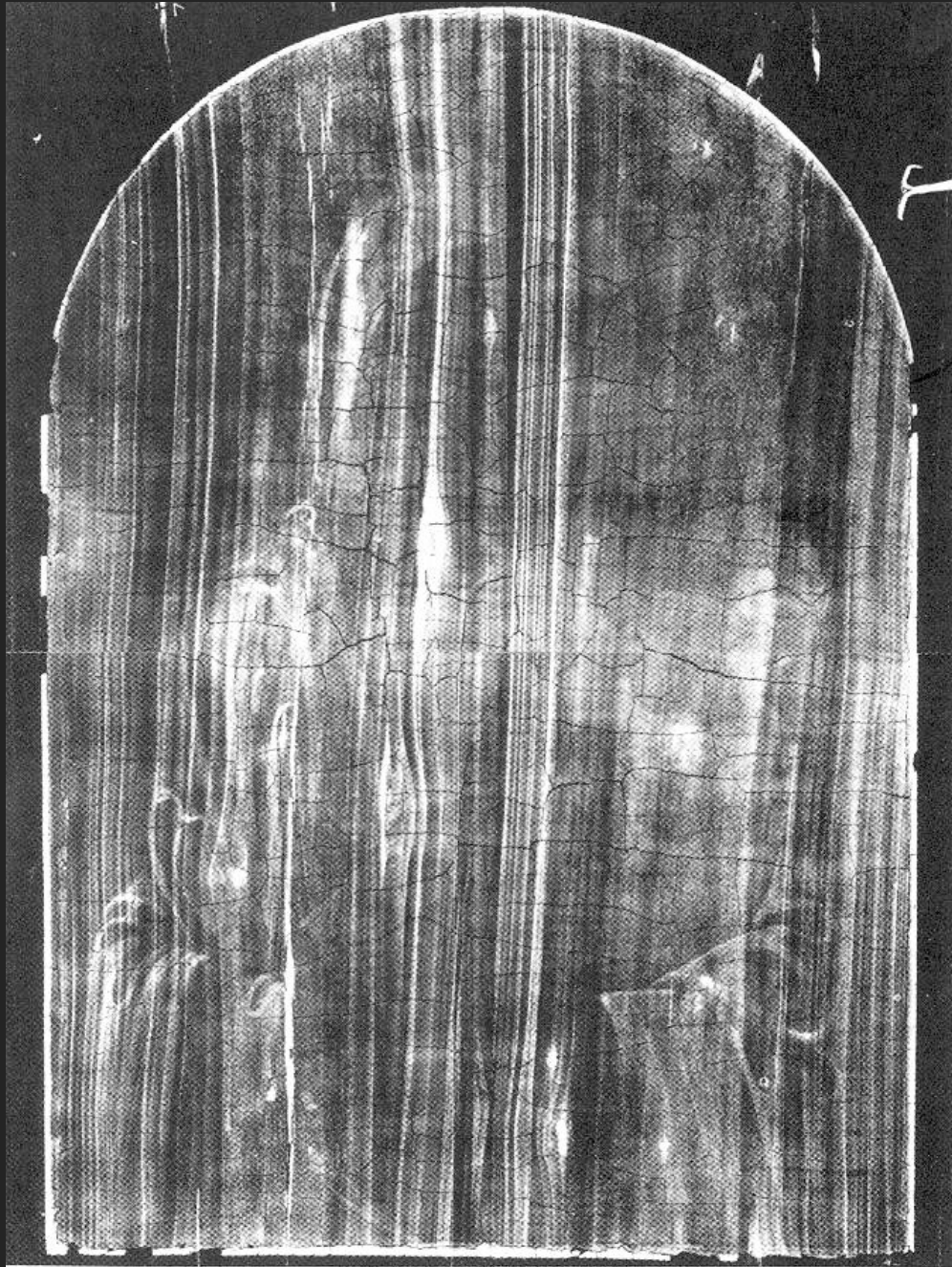




*Taddeo di Bartolo  
(inizio XV sec.)  
Vergine annunciata  
Tempera su tavola  
Avignone, Museo del Petit  
Palais*

da:  
M.Hours  
La vie mysterieuse des chefs d'oeuvre  
Ed. Louvre, Paris





*Scuola senese XV sec.  
Madonna con bambino*

*Tempera su tavola  
Parigi, Louvre*

**Falso!**

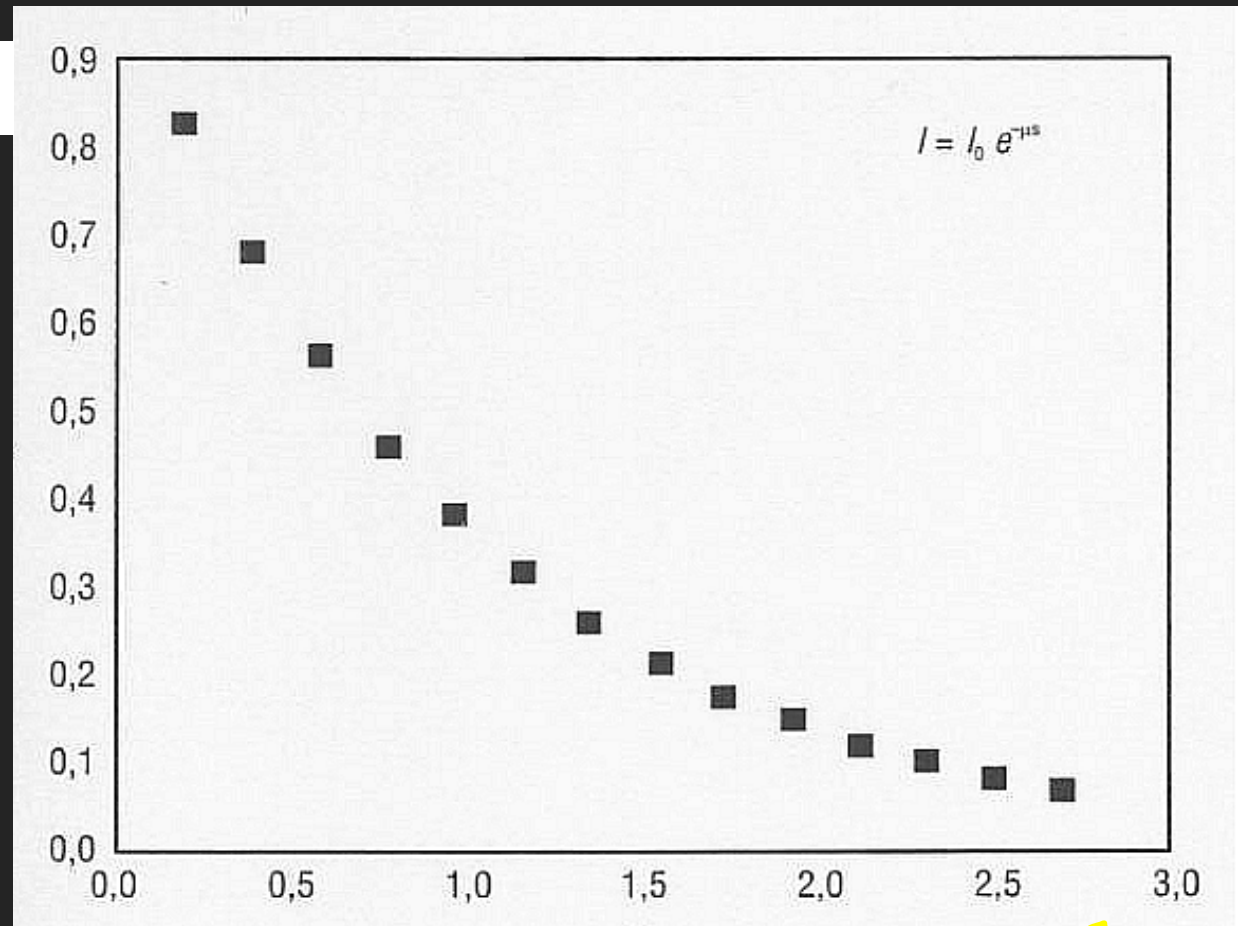


L'interazione con la materia provoca un'attenuazione del fascio di raggi X.

$I/I_0$

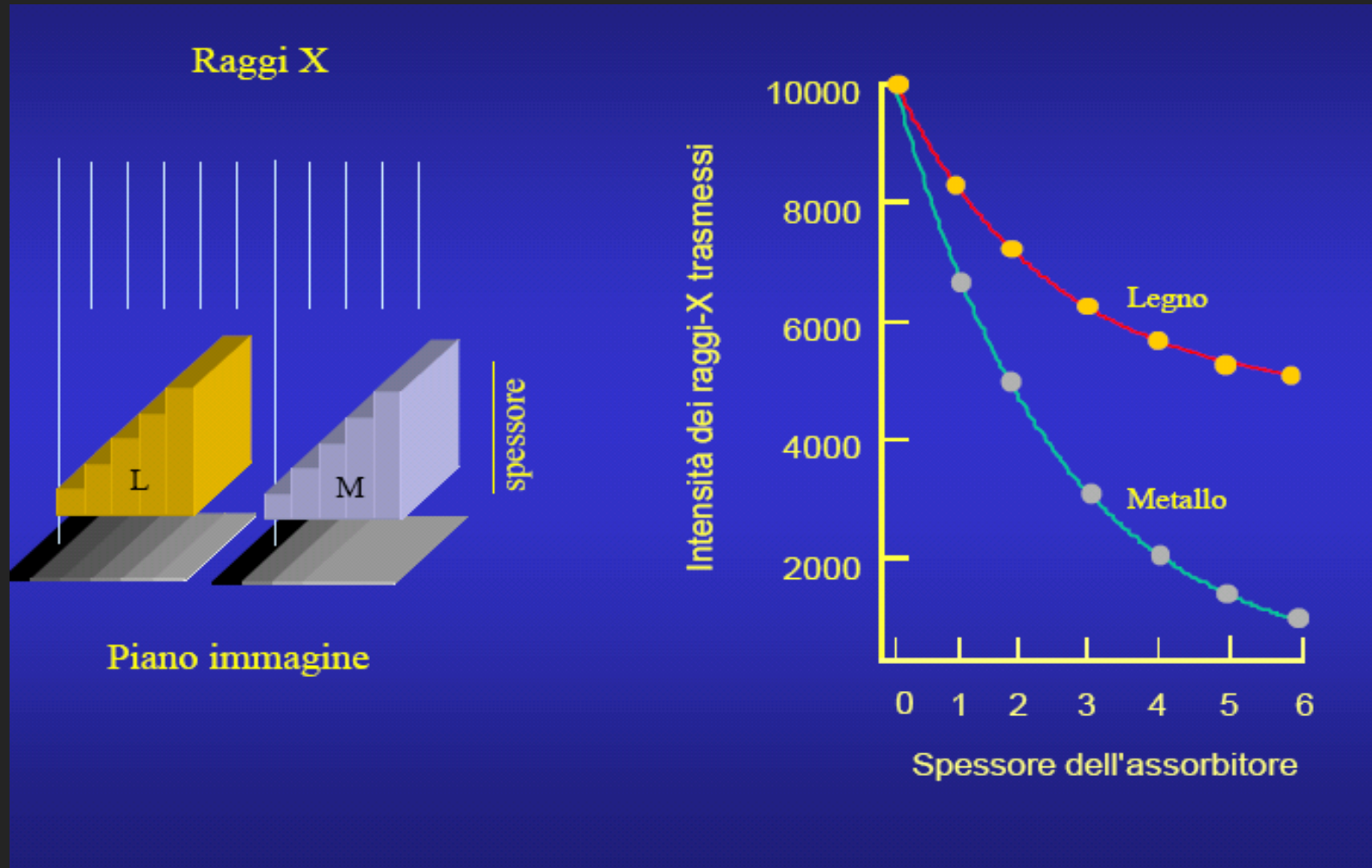
Raggi X monoenergetici seguono una legge di attenuazione esponenziale rispetto allo spessore del materiale attraversato

## Attenuazione dei raggi X nella materia

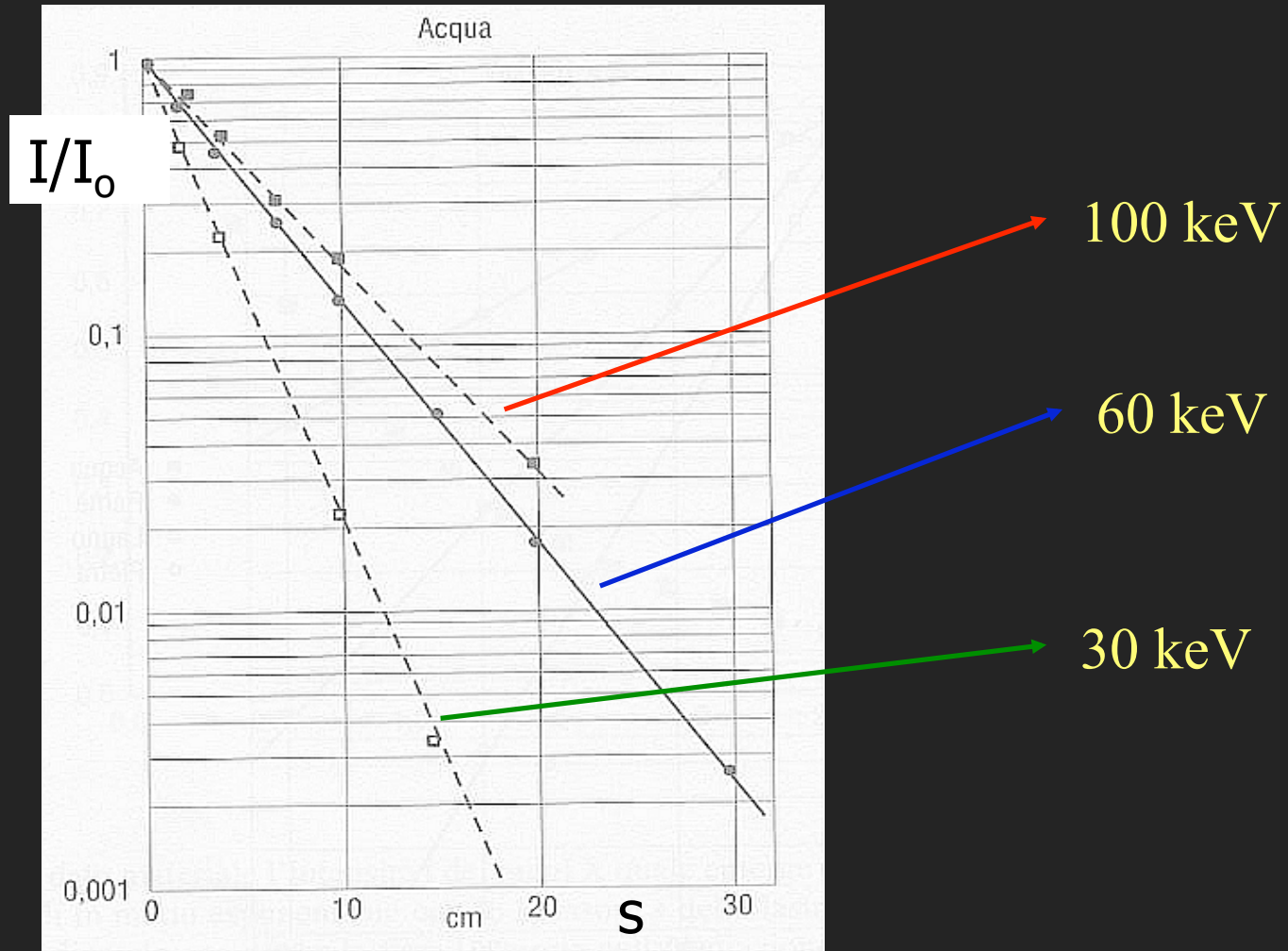


$s$

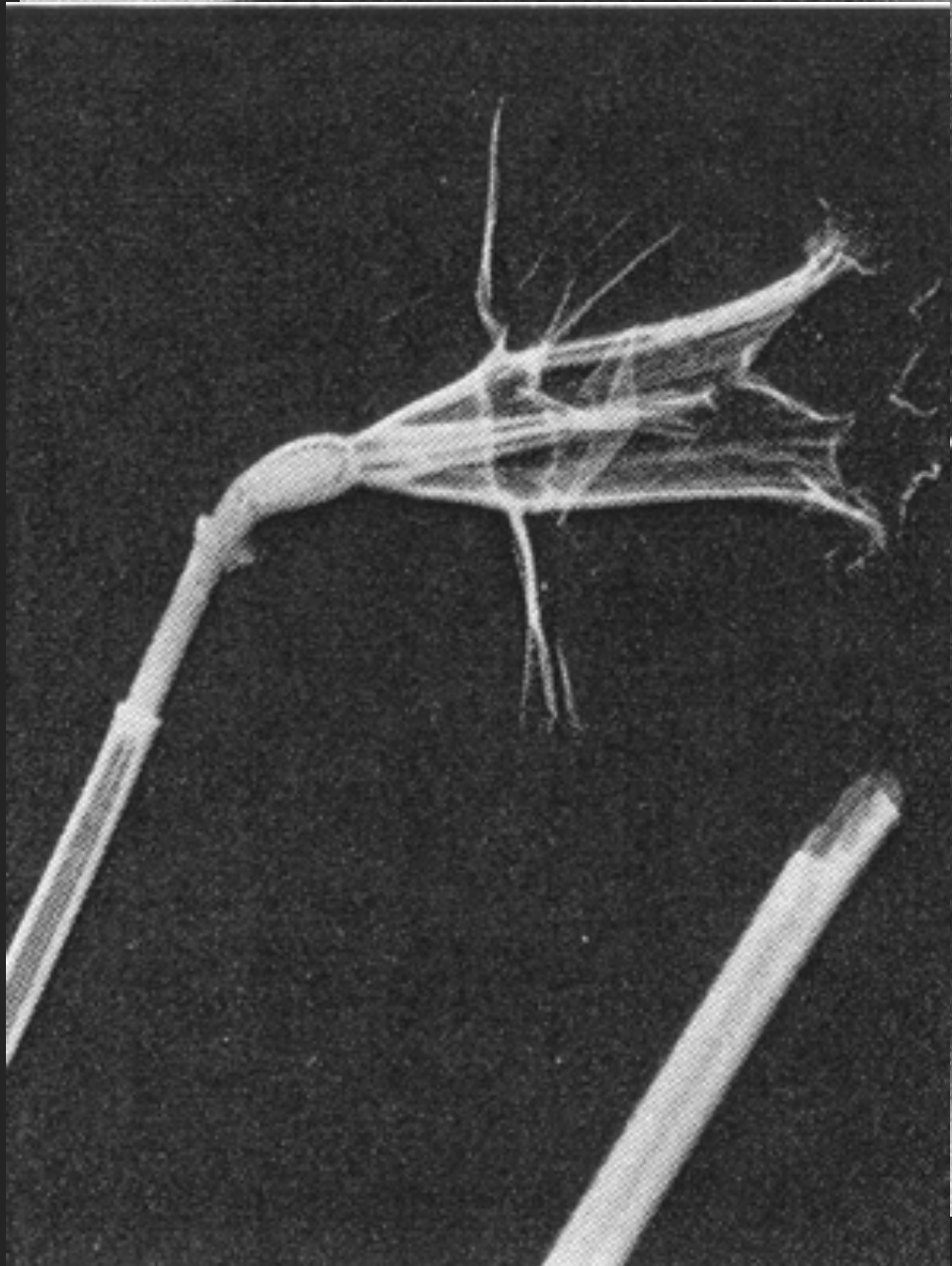
## materiali diversi attenuano diversamente i raggi X



... e naturalmente raggi X più energetici sono meno attenuati



da: Ascani Orsini, Gilardoni, Mucchi  
X-Rays in Art  
Ed. Gilardoni, Mandello Lario (CO)



*la trasparenza di un fiore  
radiografato a 5 kV...*

*...e a 20 kV*

## Attenuazione dei raggi X nella materia

Legge di Beer-Lambert per fotoni monocromatici e materiali omogenei:

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

dove:

- $I_0$  è l'intensità iniziale del fascio di raggi X o  $\gamma$
- $I$  è l'intensità del fascio dopo l'attraversamento dello spessore di materiale preso in considerazione
- $\mu$  è il **coefficiente di attenuazione lineare** del materiale
- $s$  è lo spessore del materiale considerato.

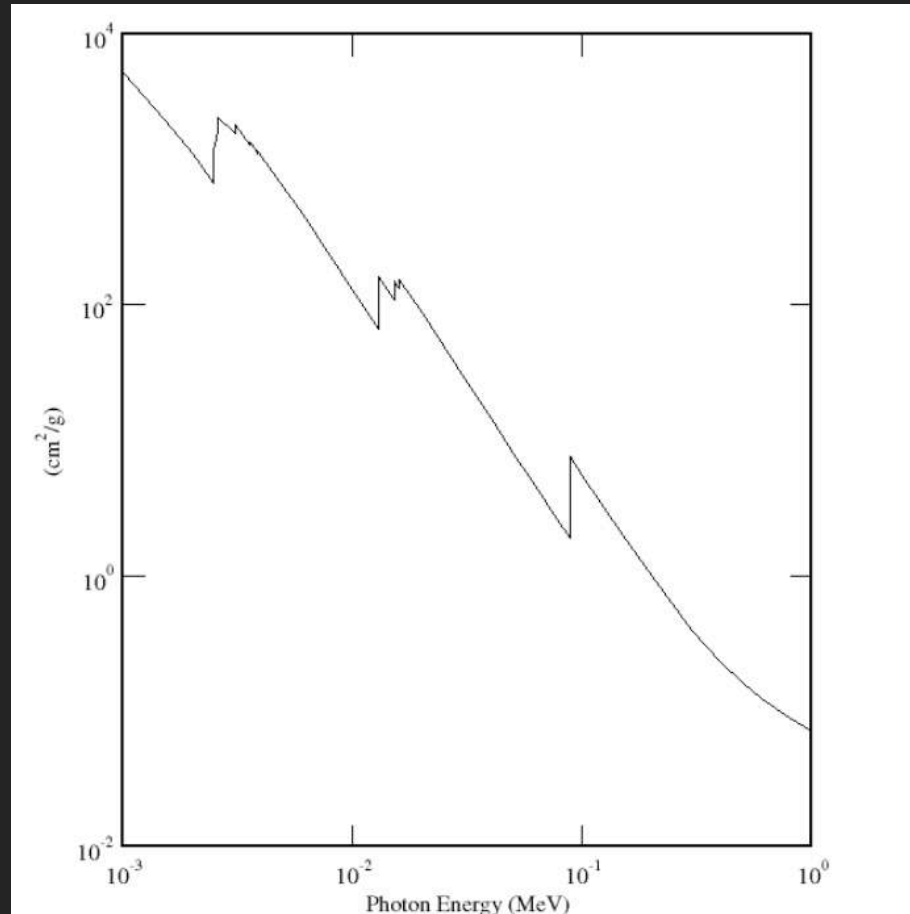
# Assorbimento dei raggi X nella materia



**XCOM: Photon  
Cross Sections  
Database**

NIST Standard Reference Database 8

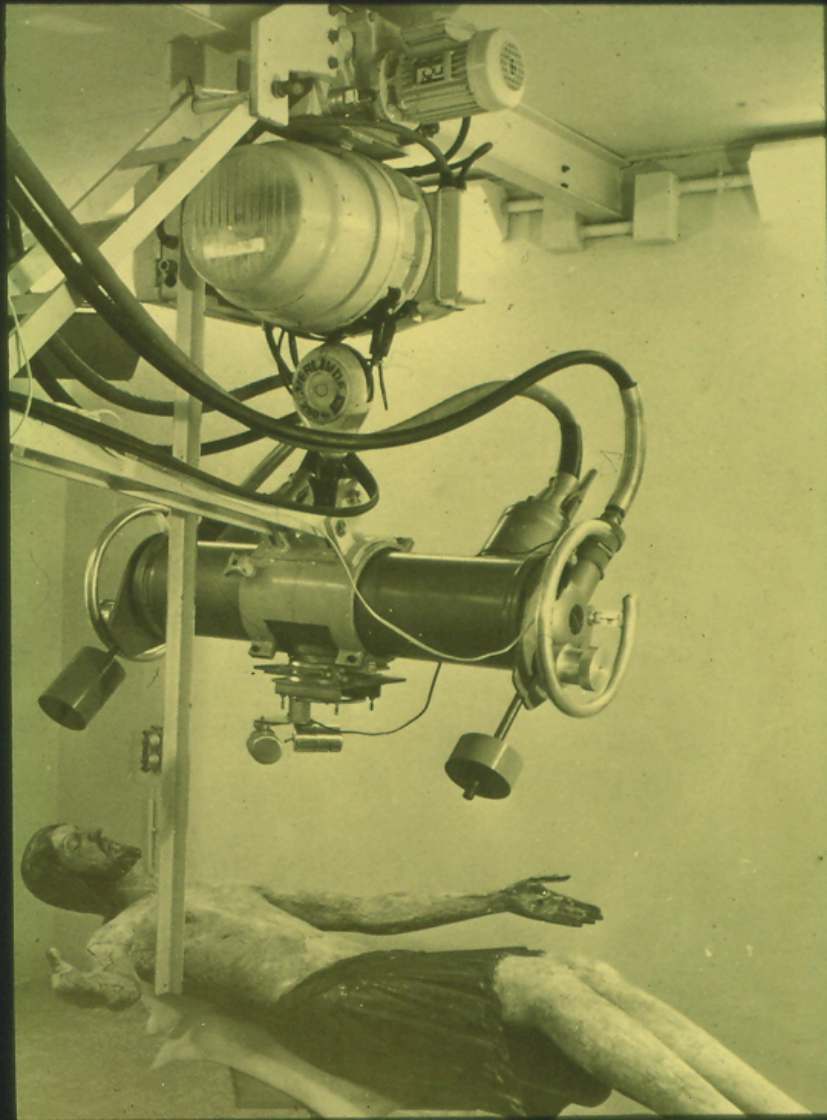
[http://  
physics.nist.gov/  
PhysRefData/Xcom/  
Text/XCOM.html](http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html)



$$\frac{\mu}{\rho} \quad [\text{cm}^2/\text{g}]$$

Coefficiente di assorbimento  
di massa per il piombo.





da:  
M.Hours  
La vie mysterieuse des  
chefs d'ouvre  
Ed. Louvre, Paris

*Quali caratteristiche del dipinto danno luogo all'immagine radiografica?*

*spessore*

*numero atomico*

*densità*

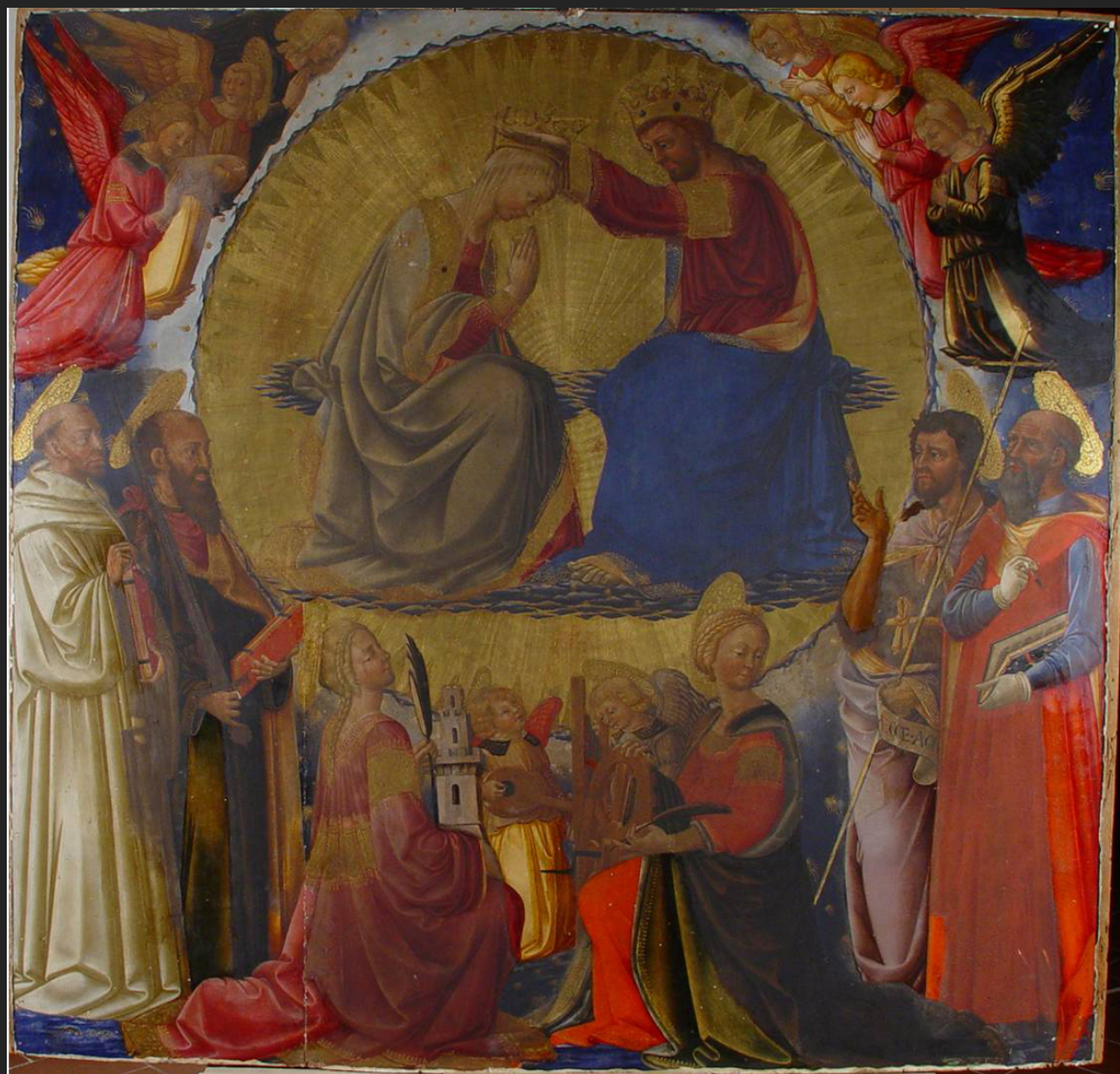


*Neri di Bicci,  
1460-70*

*Incoronazione  
della Vergine e  
Santi*

*tempera e oro su  
tavola*

*in restauro  
presso  
l'Università  
Internazionale  
dell'Arte di  
Firenze*



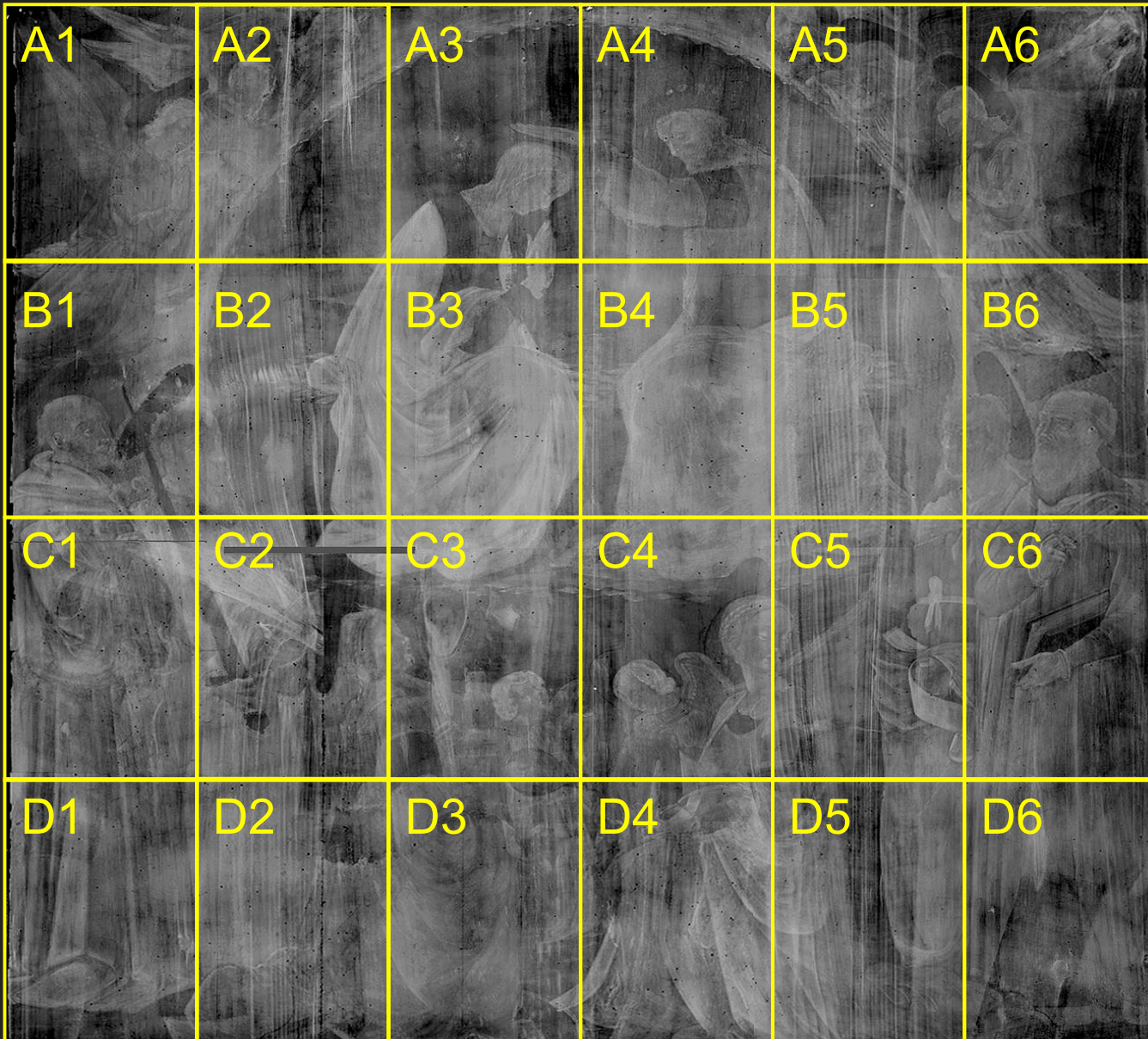
151 cm

150 cm

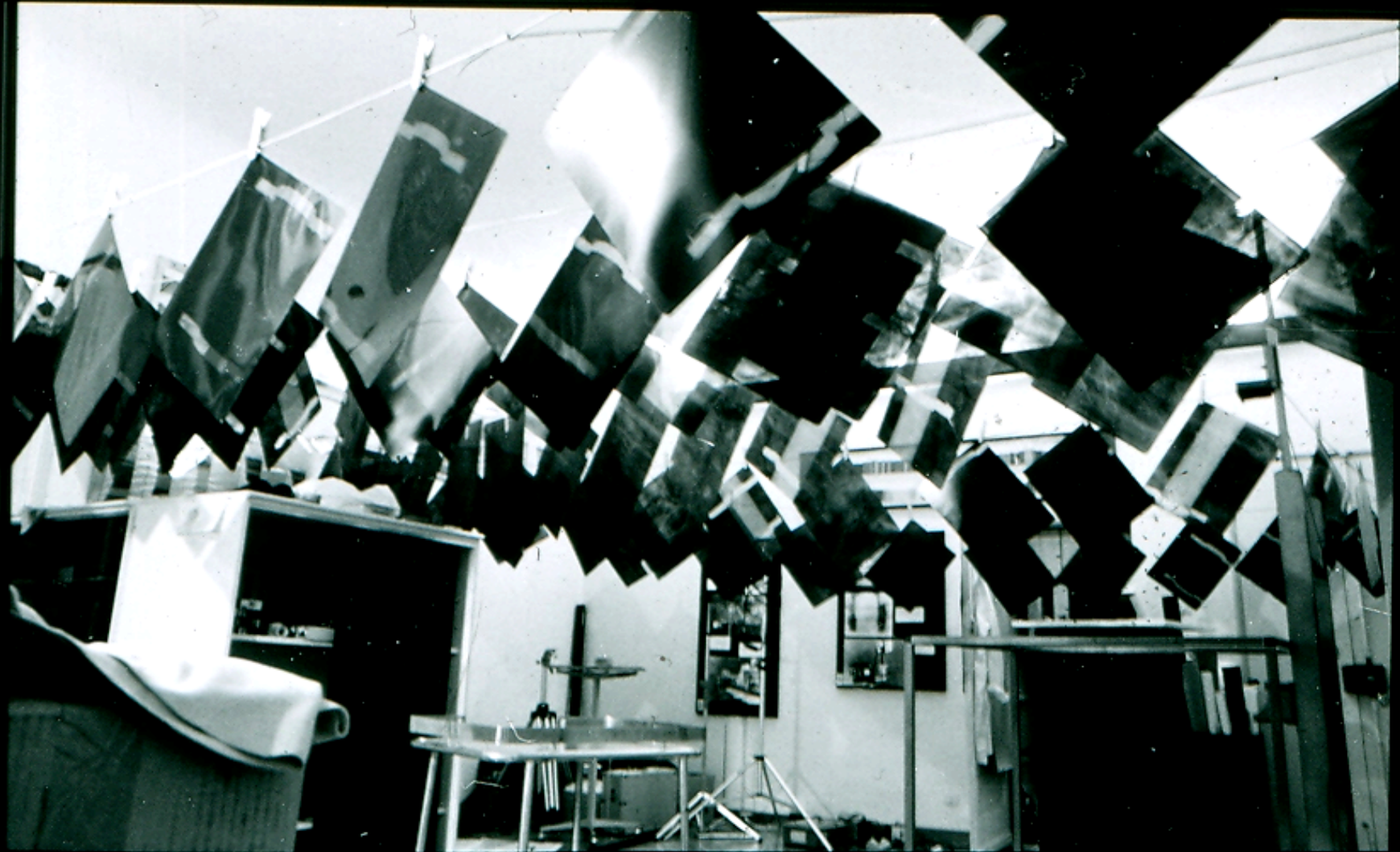


*come si esegue  
la radiografia  
tradizionale  
di un dipinto*

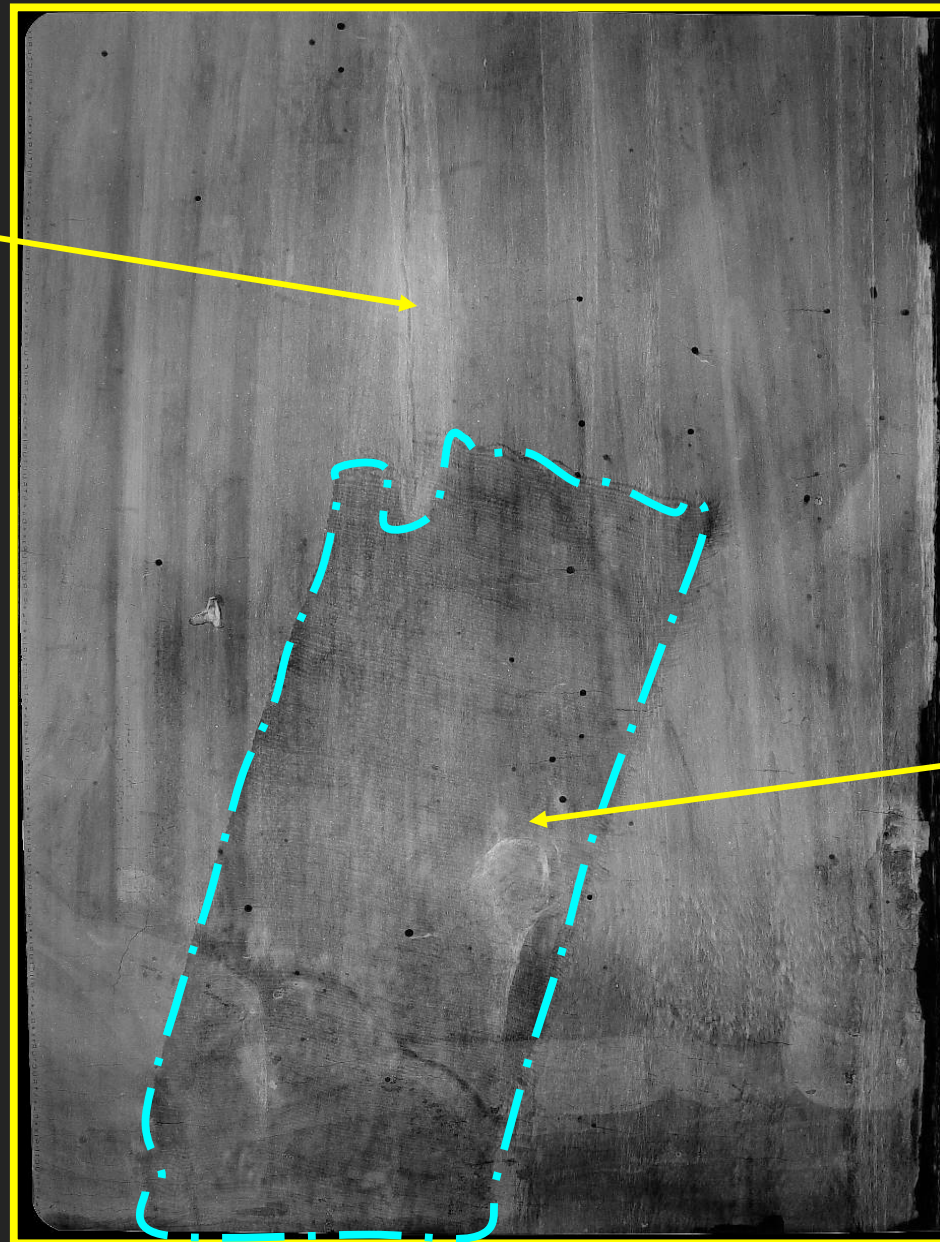
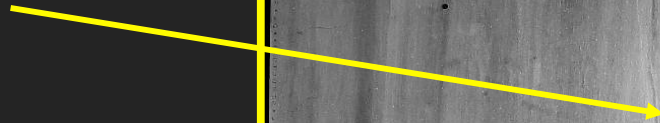








FENDITURA



TELA DI  
RINFORZO AL  
NODO





GALLERIE DI  
TARLI

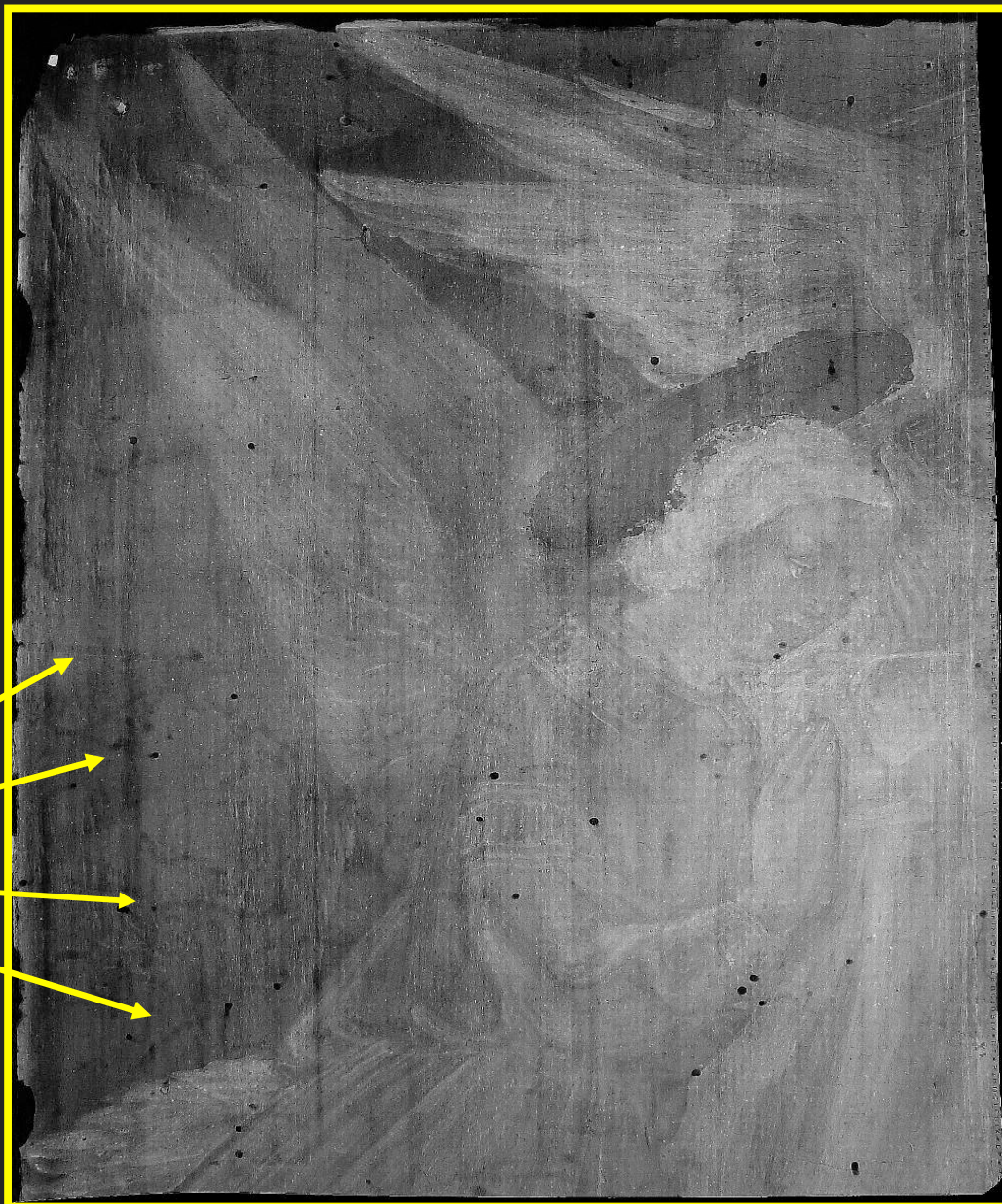
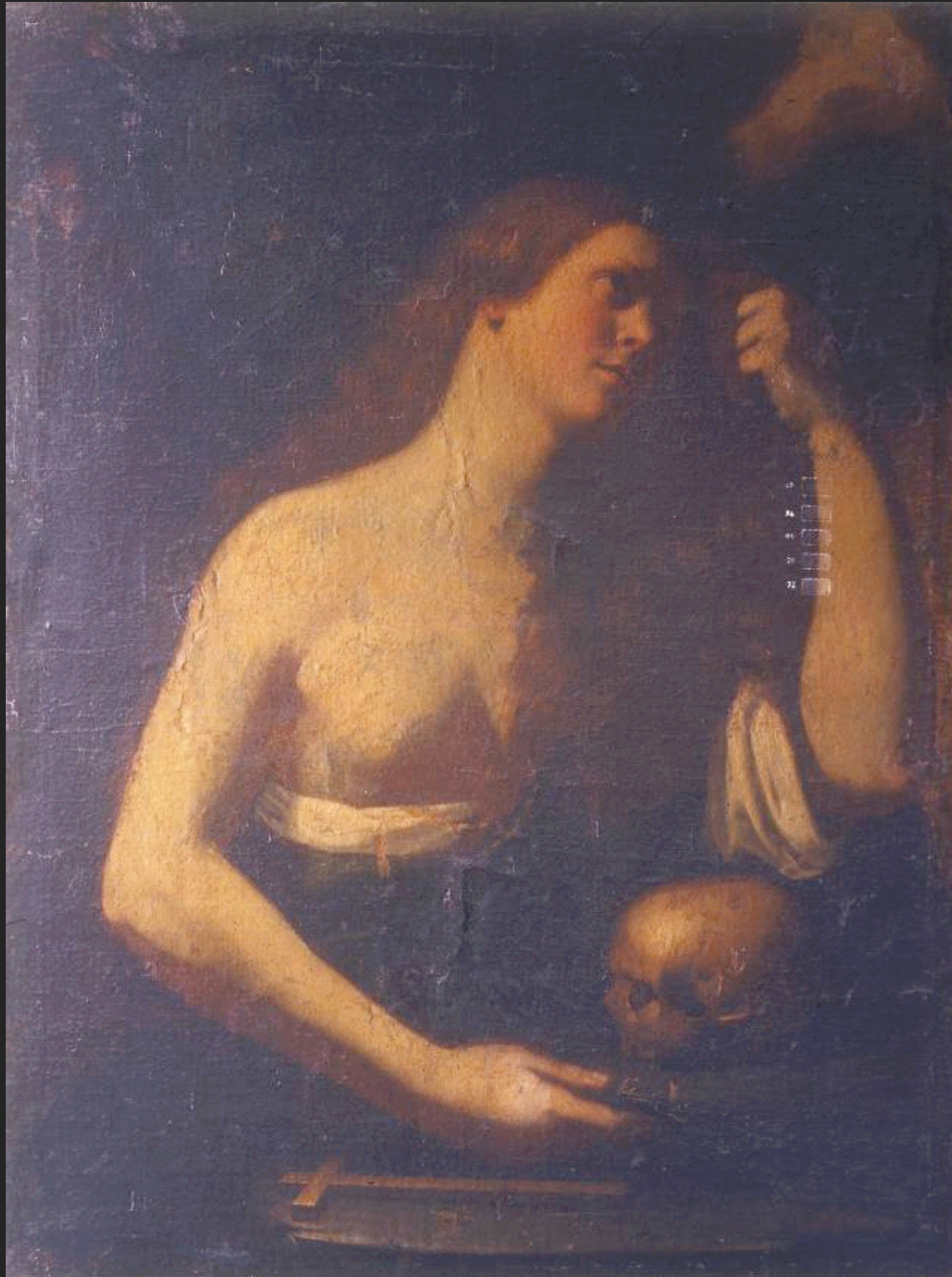


TABELLA III/4

Colore, composizione chimica e assorbimento ai raggi X dei più importanti pigmenti (vedere tab. II/4). I colori composti si ottengono mescolando i pigmenti base.

Colore	Denominazione	Composizione chimica	Assorbimento ai raggi X
Bianco	Bianco d'argento	Carbonato di argento e di piombo	molto alto
	Bianco di piombo	Carbonato di piombo	molto alto
	Bianco di zinco	Ossido di zinco	alto
	Bianco di China	Ossido di zinco	alto
	Bianco di calce	Carbonato di calcio	medio
Giallo e Arancio	Giallo cromo (chiaro, scuro, arancio)	Cromato di piombo	molto alto
	Giallo di cadmio (chiaro, medio, scuro, arancio)	Solfuro di cadmio	alto
	Giallo di zinco	Cromato di zinco	alto
	Giallo aurora	Solfuro di cadmio	alto
	Giallo oca (dorato, trasparente, bruno, di montagna, Siena crudo, Siena bruciato)	Ossido di ferro, allumina	medio-alto
	Gommagutta	Resina di Cambogia (organica)	basso
	Giallo di Napoli	Antimonio di piombo	molto alto
	Massiccotto	Ossido di piombo	molto alto
	Giallo di Marte	Ossido di ferro	medio
Lacca gialla di guado	Organica	basso	
Rosso	Rosso di Saturno o minio	Ossido di piombo	molto alto
	Vermiglione-cinabro	Solfuro di mercurio	molto alto
	Rosso di Venezia	Ossido di ferro	medio
	Lacca carminata	Organica	basso
	Lacca di garanza rosa, bruna, porpora	Organica	basso
	Terra rossa cruda e bruciata	Ossido di ferro - allumina	medio-alto
Bruno	Bruno di Firenze	Cianuro di rame	alto
	Bruno di Marte	Ossido di ferro	medio
	Bruno di Prussia	Cianuro di ferro	medio
	Seppia, inchiostro di mollusco	Organica	basso
	Bistro fuliggine	Organica	basso
	Bitume, asfalto	Organica	basso
Azzurro	Bleu ceruleo	Stannato di cobalto	alto
	Bleu di cobalto	Alluminato di cobalto	medio
	Oltremare chiaro	Solfuro di sodio	medio
	Bleu di Prussia	Cianuro di ferro	medio-alto
	Indaco vegetale	Organica	basso
Violetto	Violetto di cobalto	Fosfato di cobalto	medio
	Violetto di Marte	Ossido di ferro	medio-alto
	Violetto minerale	Fosfato di manganese	medio
Verde	Verde Verona	Arseniato di rame	alto
	Verde cromo	Ossido di cromo	medio
	Verde di cobalto	Ossido di zinco e cobalto	alto
	Lacca verde	Organica	basso
Grigio e Nero	Nero d'avorio	Fosfato di calcio e organica	medio
	Nero di ferro	Ossido di ferro	medio-alto
	Nero di vite	Organica	basso
	Nero fumo di lampada	Organica	basso
	Nero di carbone	Organica	basso
Tutti i colori	Acrilici	Organica	basso



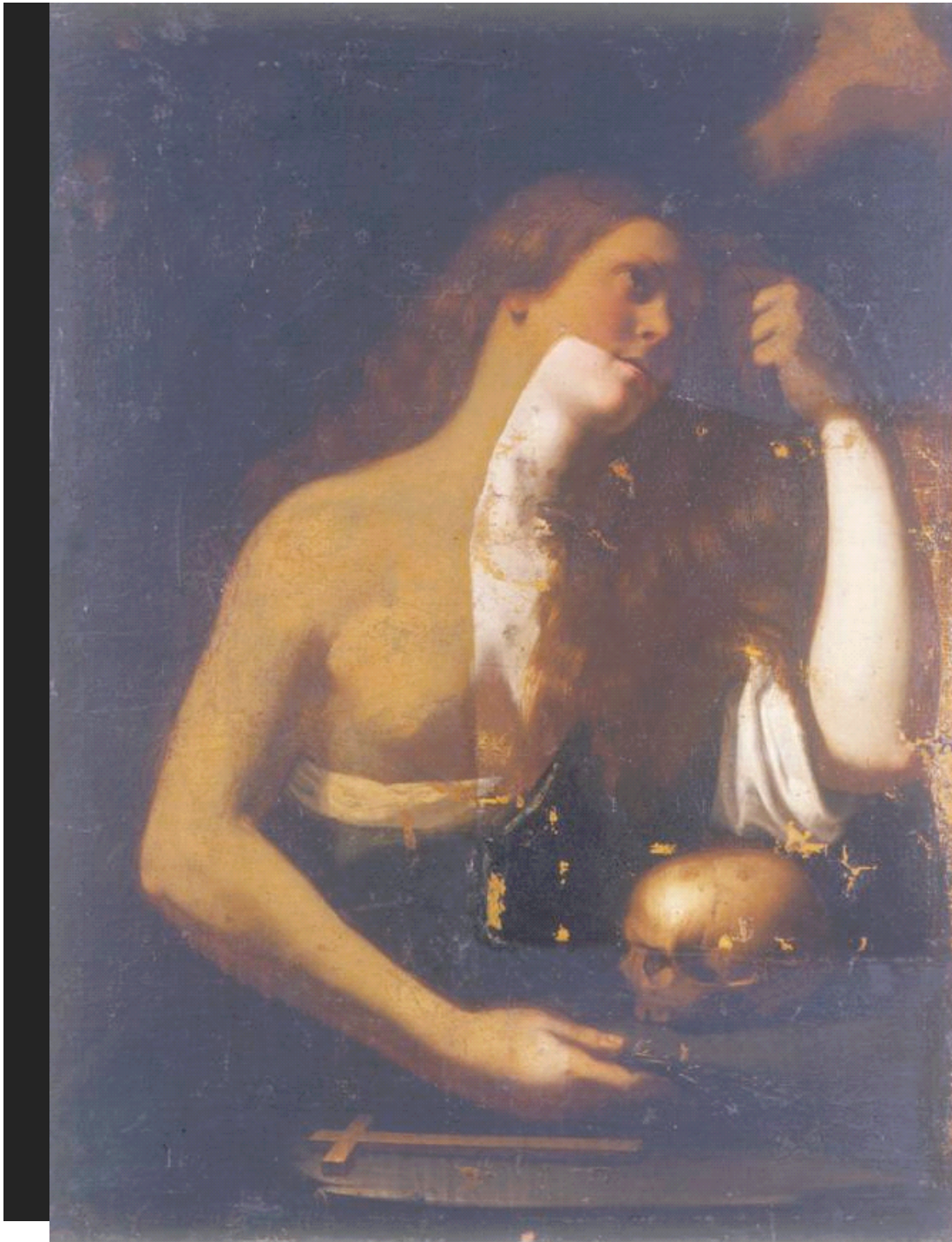


*Anonimo XVII sec.  
Maddalena penitente  
Coll.privata*

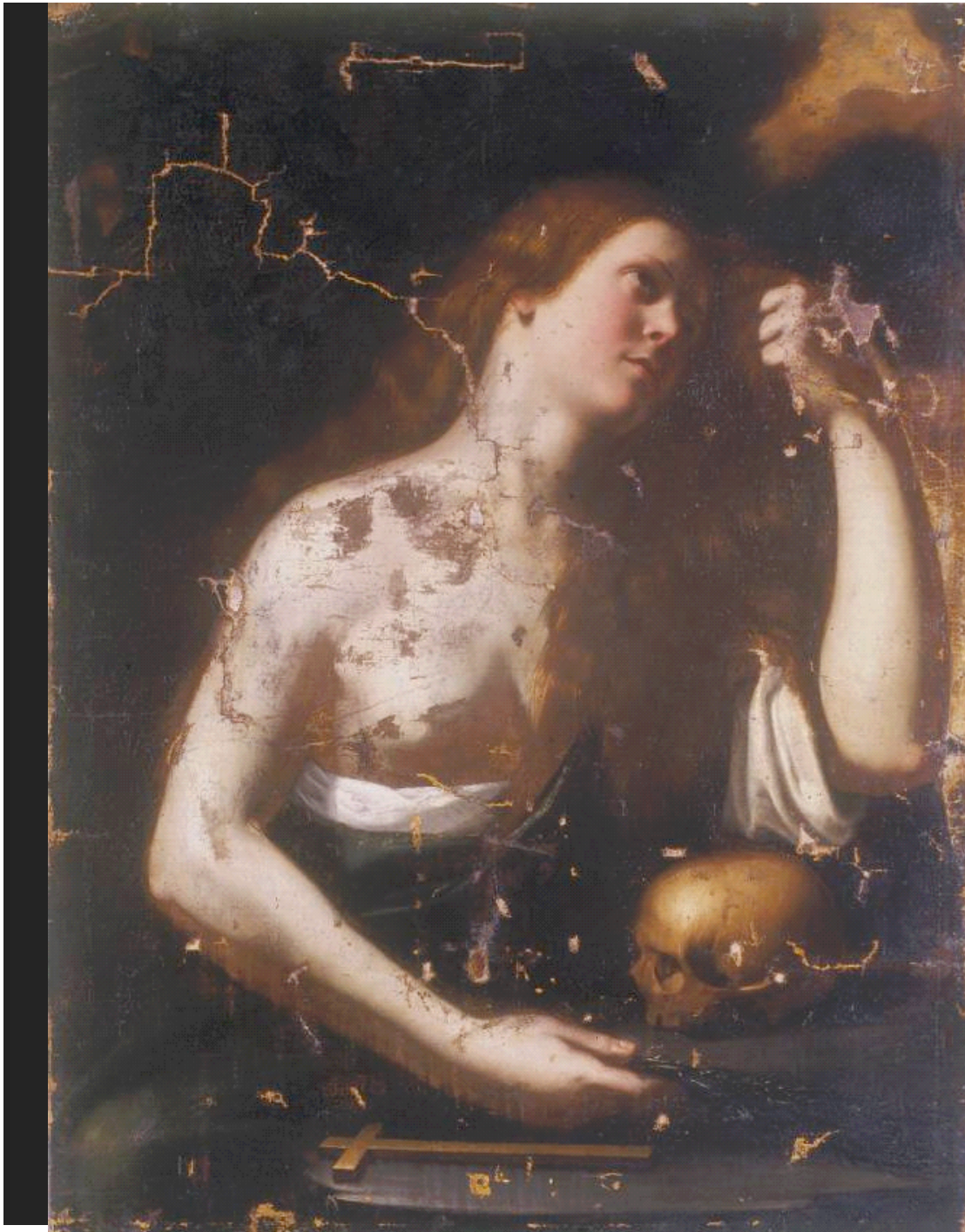
*Foto in luce visibile prima del  
recente restauro*

**Figura 5.12:** foto in luce visibile del dipinto prima del recente restauro. Sono visibili sul collo





*Foto in luce visibile durante  
la fase di asportazione della  
vernice ingiallita*



*Foto in luce visibile dopo  
l'asportazione della vernice  
ingiallita*

**Figura 5. 14:** foto in luce visibile del dipinto a pulitura terminata.





*Radiografia X*

## Radiografia digitale di opere di grandi dimensioni



# Radiografia digitale di opere di grandi dimensioni

## Struttura

Scansione dell'opera grazie alla traslazione XZ del tubo radiogeno e del rivelatore

Dimensioni struttura 2.56 x 2.26 x 1.00 m

Dimensioni massime del dipinto:  
2.50 m x 1.50 m

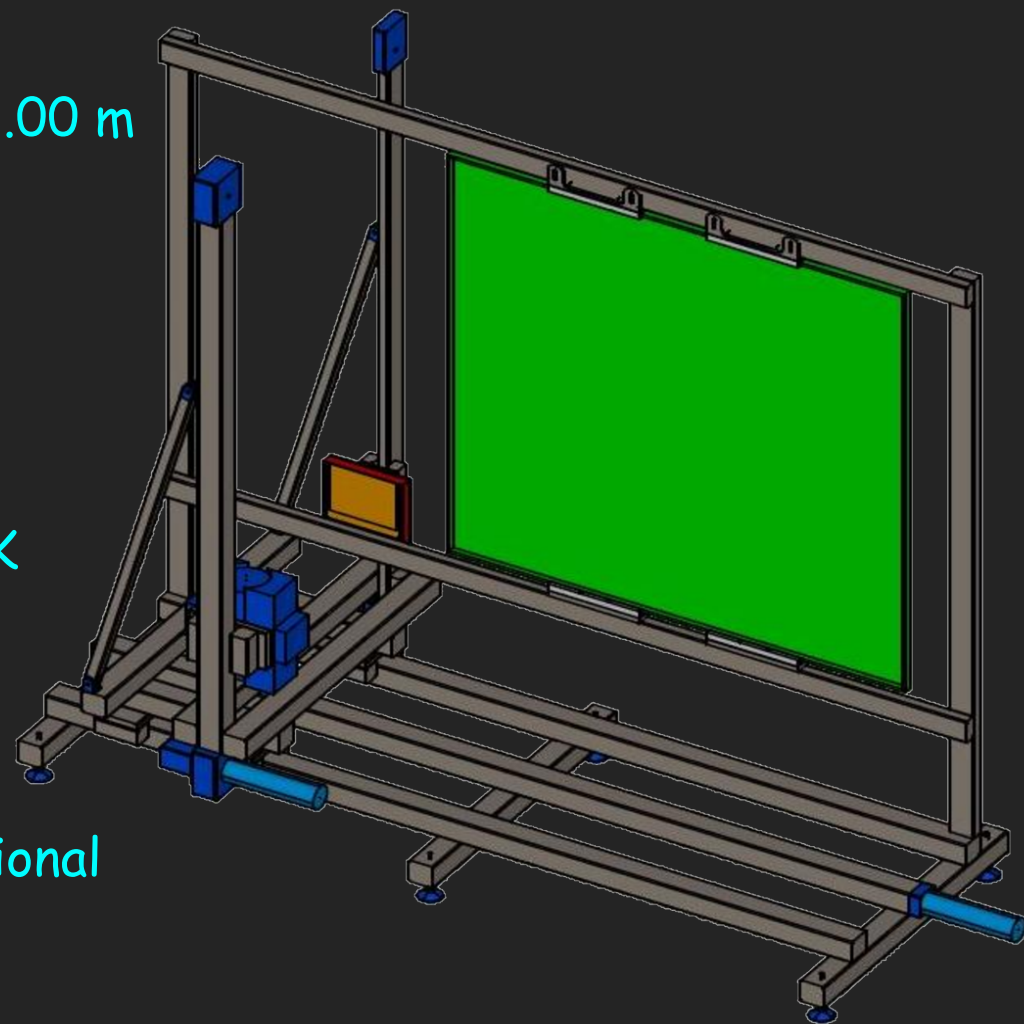
## Rivelatore

Flat panel CCD Hamamatsu C7930DK

Dimensioni CCD 220.8 x 176 mm

Dimensioni pixel 50 x 50  $\mu\text{m}$

Acquisizione con frame grabber National Instruments PCI 1424, 12 bit/pixel





Anonimo  
Maddalena penitente  
olio su tela, XVIIsec.

Bixce visibile

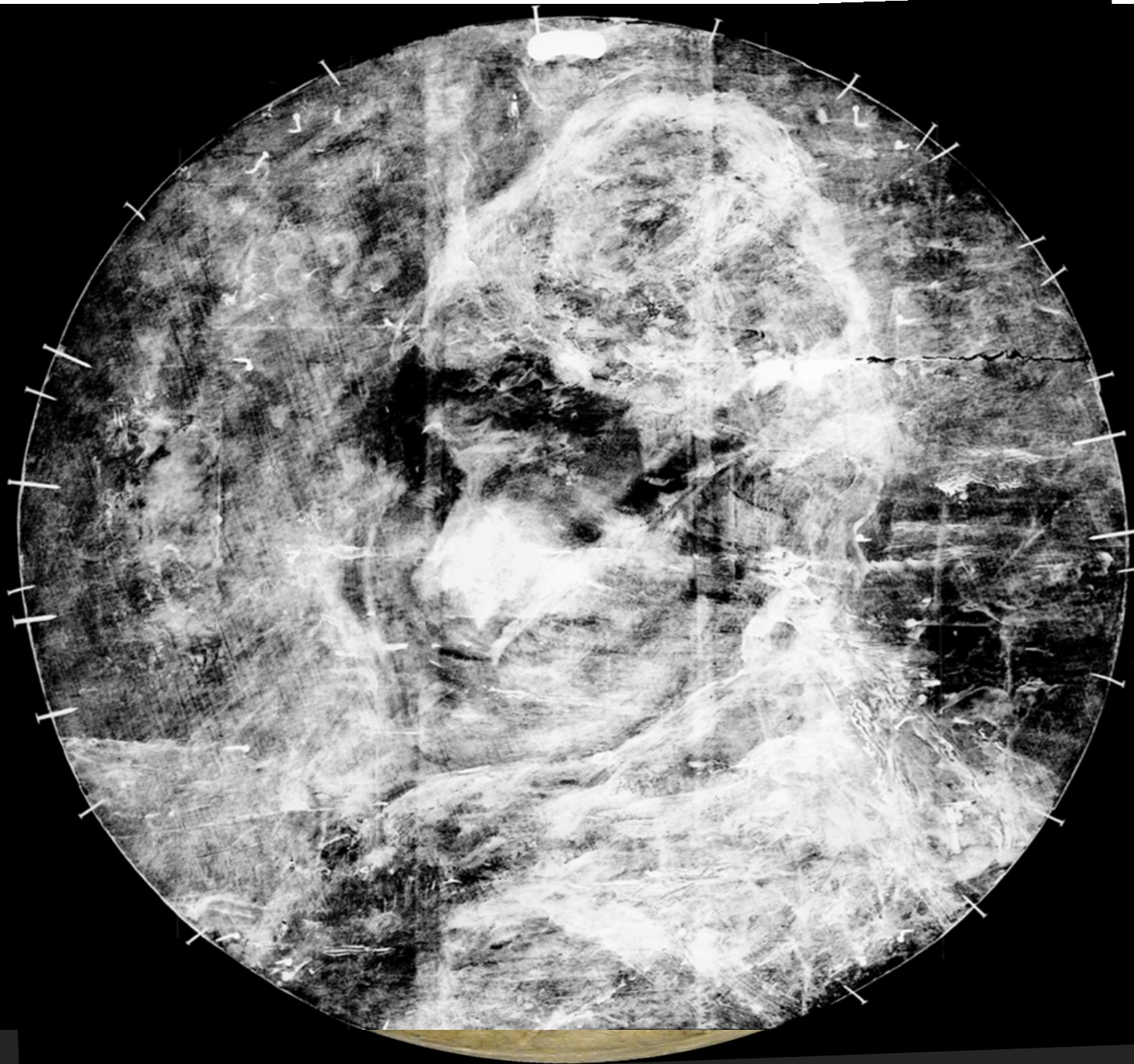






Anonimo  
"Paesaggio"  
Olio su tavola, XX sec.  
Collezione privata

Rea Visibile digitale



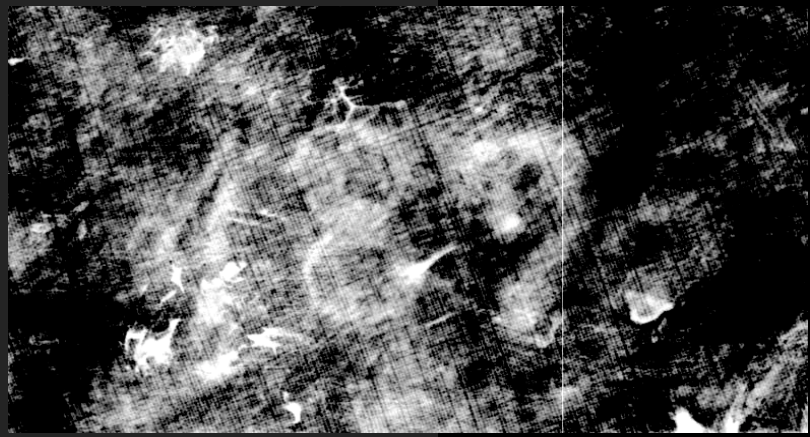
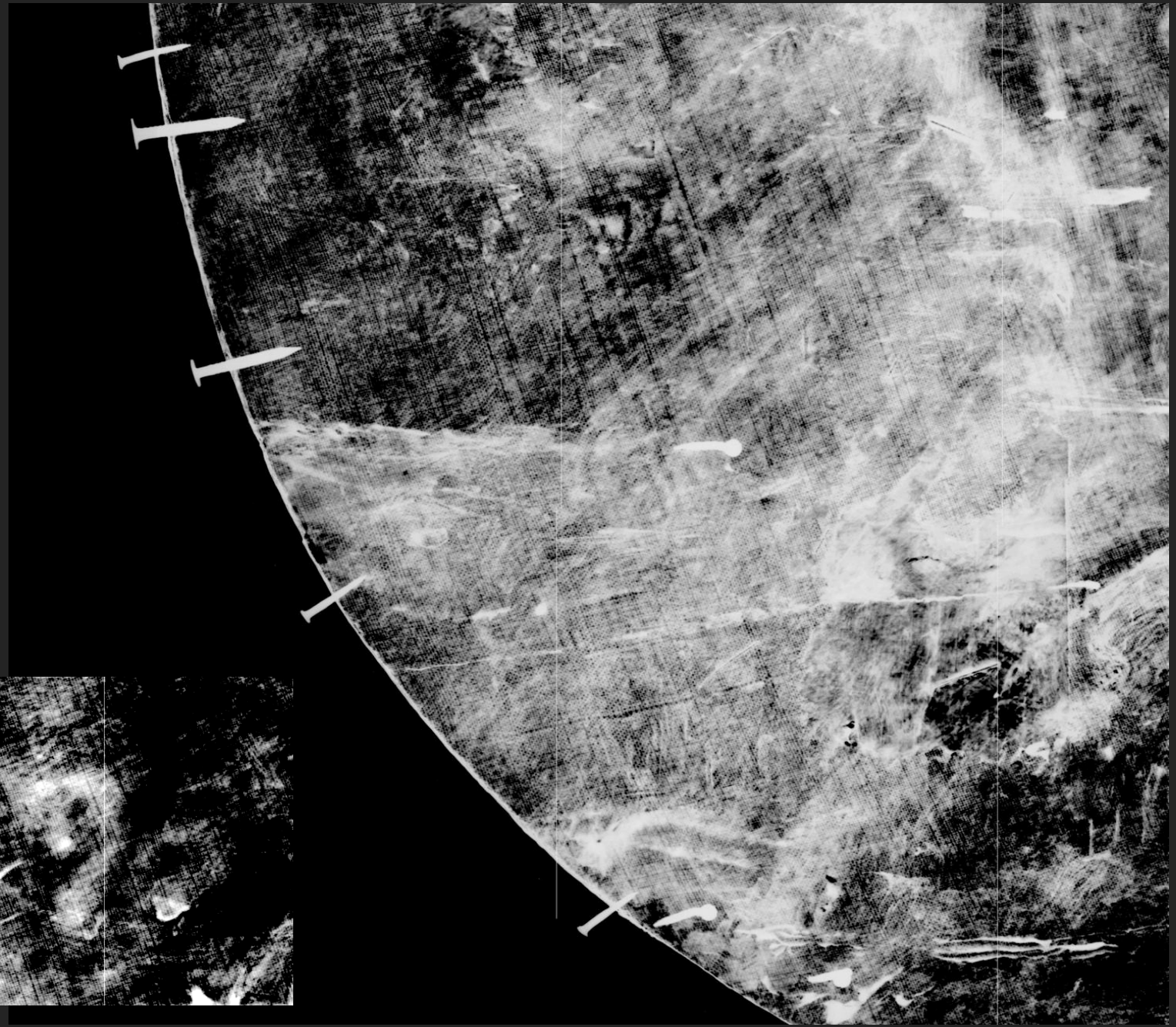


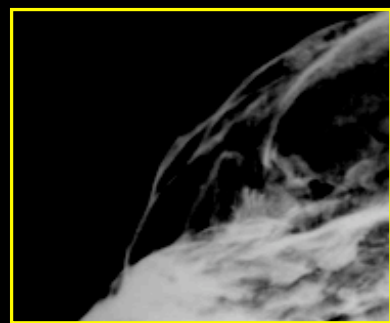
 *Bordo*

 *Chiodi*

 *Tela*

 *Data*





*Crocifisso  
ligneo  
processionale  
XVIII sec.  
coll.privata*

*Particolare in  
Radiografia digitale*



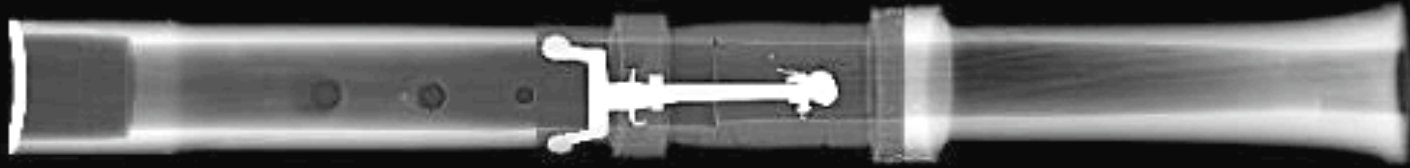
*Lunghezza del presunto condotto*



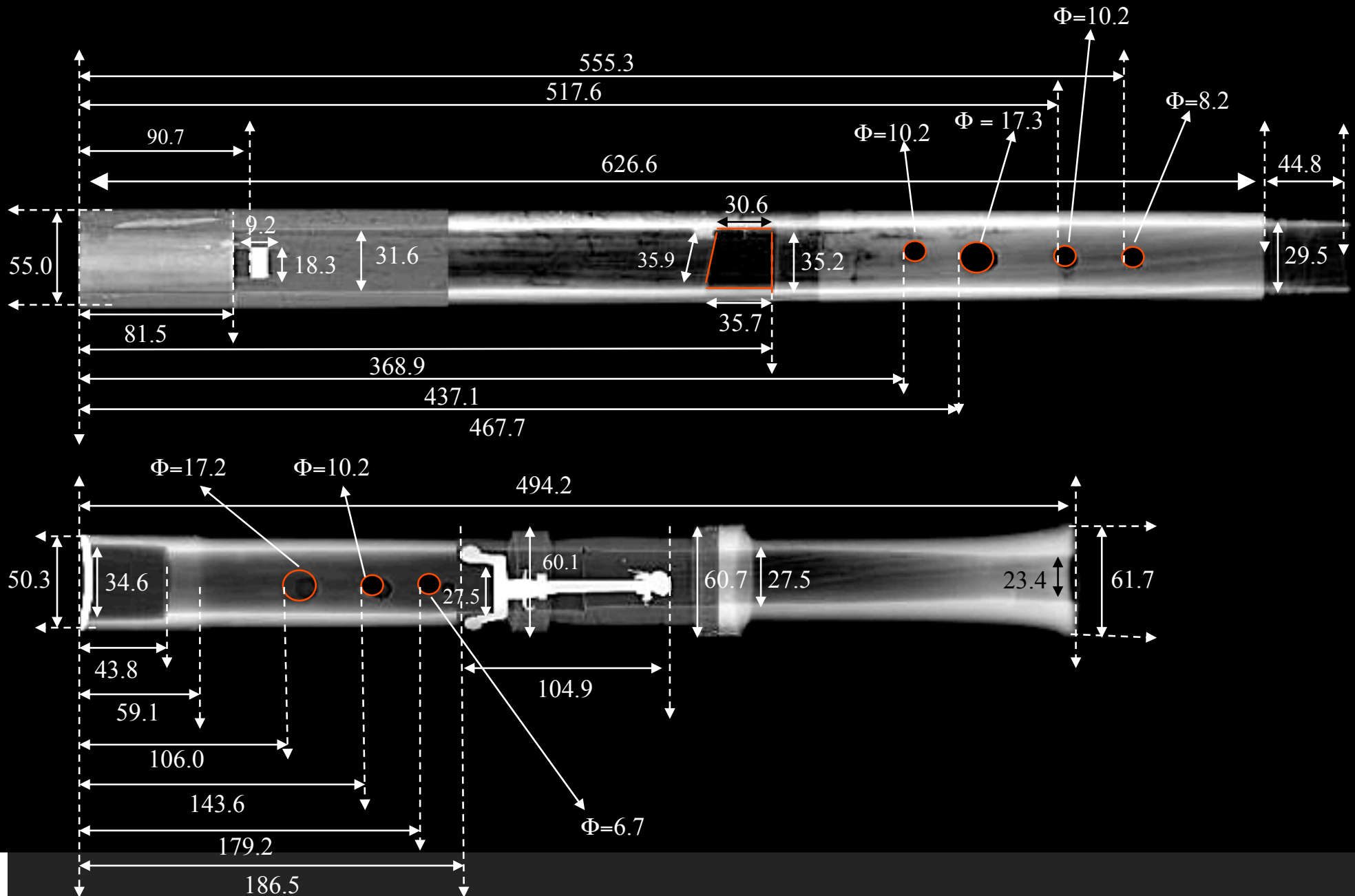
**Pezzo da radiografare**

*Studio topografico di un flauto  
rinascimentale con la radiografia  
digitale*





# Immagine con quote (mm)

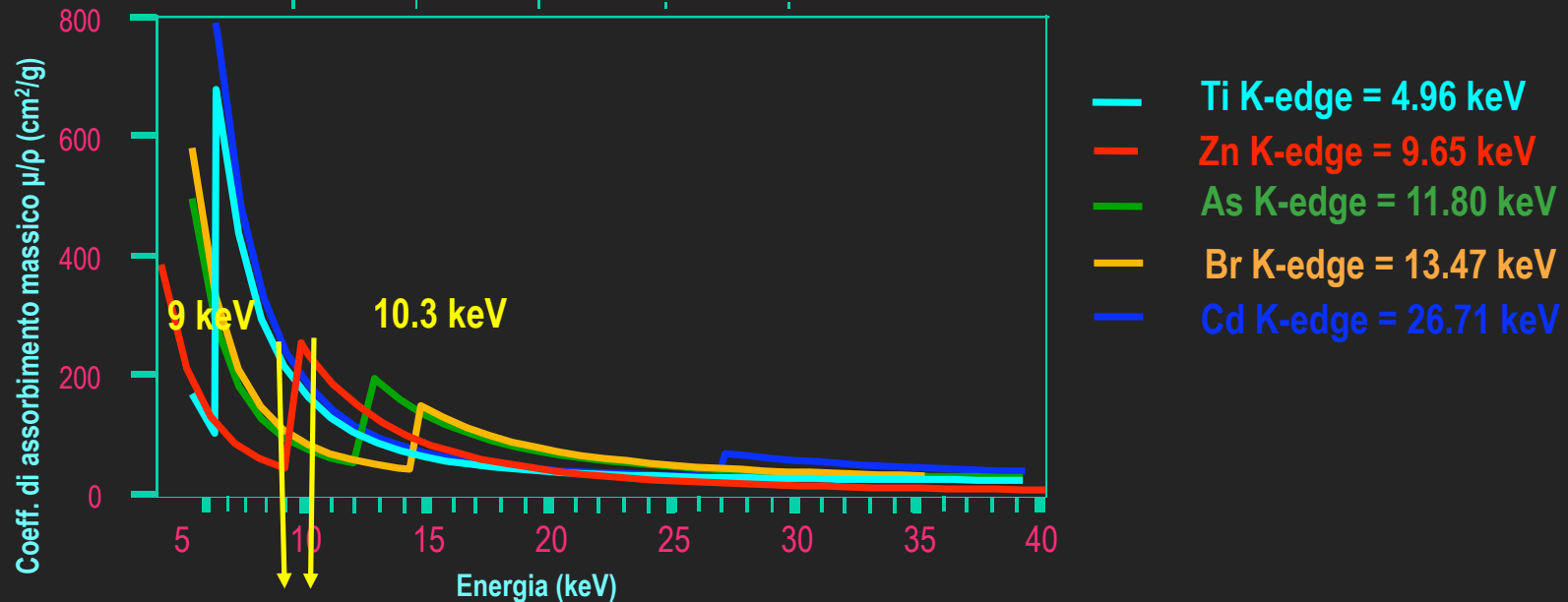


Si sono misurate le dimensioni reali del flauto manipolando le immagini, con un'accuratezza del rilievo topografico pari a 70 micrometri(1 pixel)

Si sono individuate varie irregolarita' nel legno e/o parti stuccate a causa del cattivo stato di conservazione dell'oggetto o di cambiamenti fatti alla sua struttura originaria nel corso del tempo

# Radiografia Differenziale al K-edge

Viene sfruttata la grande variazione del coefficiente di assorbimento nell'intorno del K-edge di un elemento



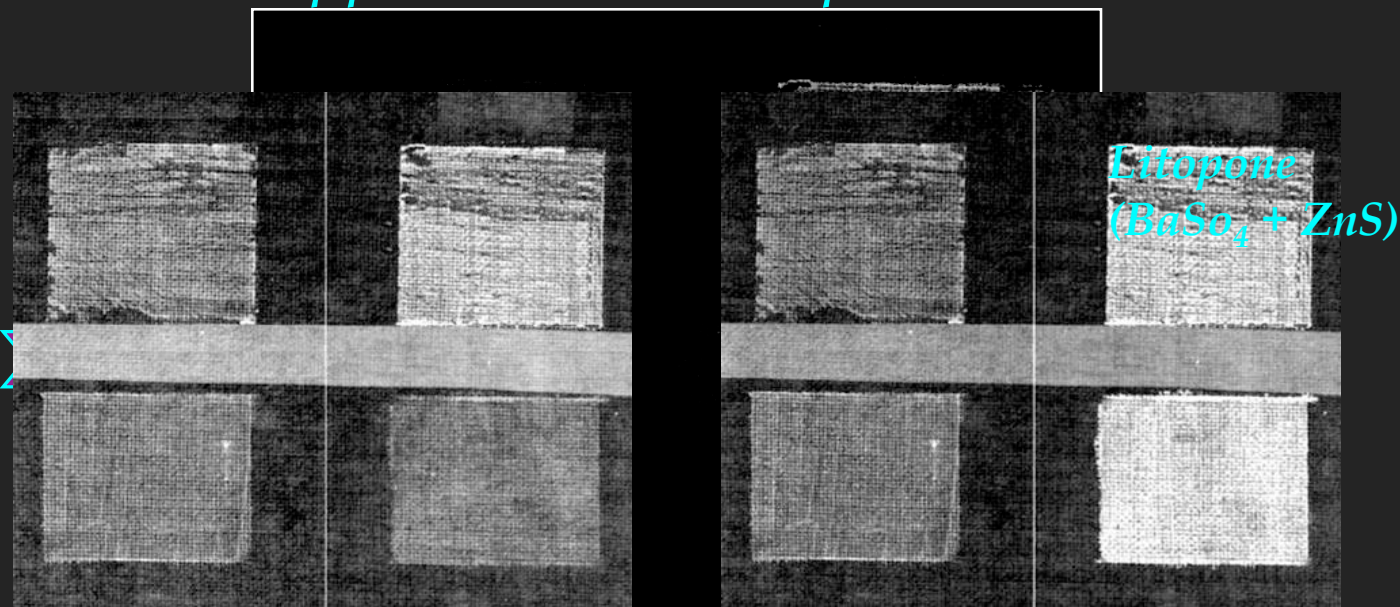
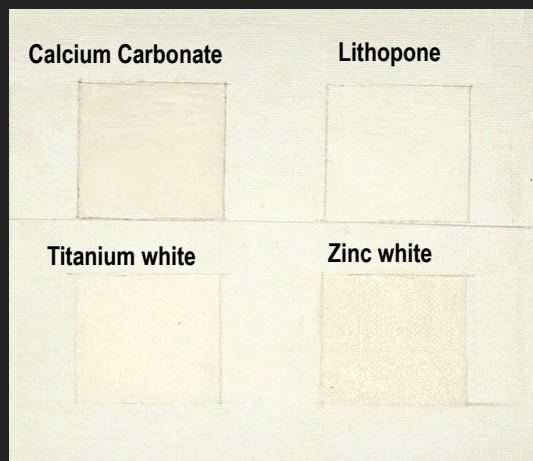
Viene utilizzata una radiazione X monocromatica per realizzare la radiografia del dipinto a due differenti energie



Processando le immagini ottenute con appositi algoritmi si ottiene una mappatura, pixel per pixel, della densità superficiale dell'elemento cercato, componente di un pigmento

## *Bianco di Zinco (ZnO)*

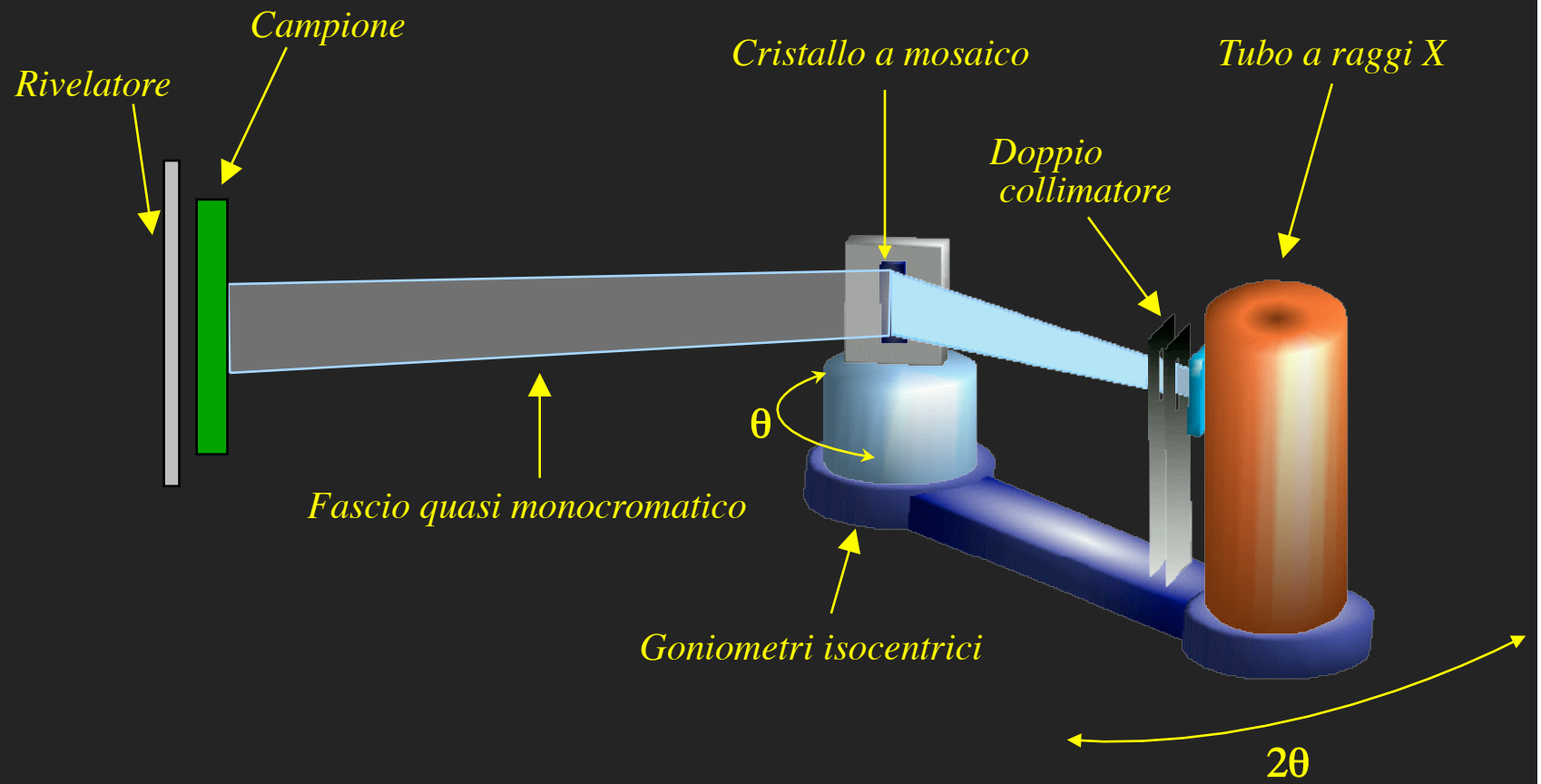
*Mappatura dello Zn presente*



*Rx a energia sotto  
il K<sub>edge</sub>*

*Rx a energia sopra  
il K<sub>edge</sub>*

Element	K (KeV)	Pigments
29 (Cu)	8.9789	Azurite, red enamel, green enamel, Malachite green Viridian green, verdigris
30 (Zn)	9.6586	Zinc white, Cadmium yellow, Cobalt green, Zinc green
33 (As)	11.8667	Realgar, Cobalt violet, Viridian green
38 (Sr)	16.1046	Strontium yellow
42 (Mo)	19.9995	Chrome orange
48 (Cd)	26.7112	Cadmium orange, cadmium yellow, cadmium red, cadmium green, yellow enamel



Setup sperimentale

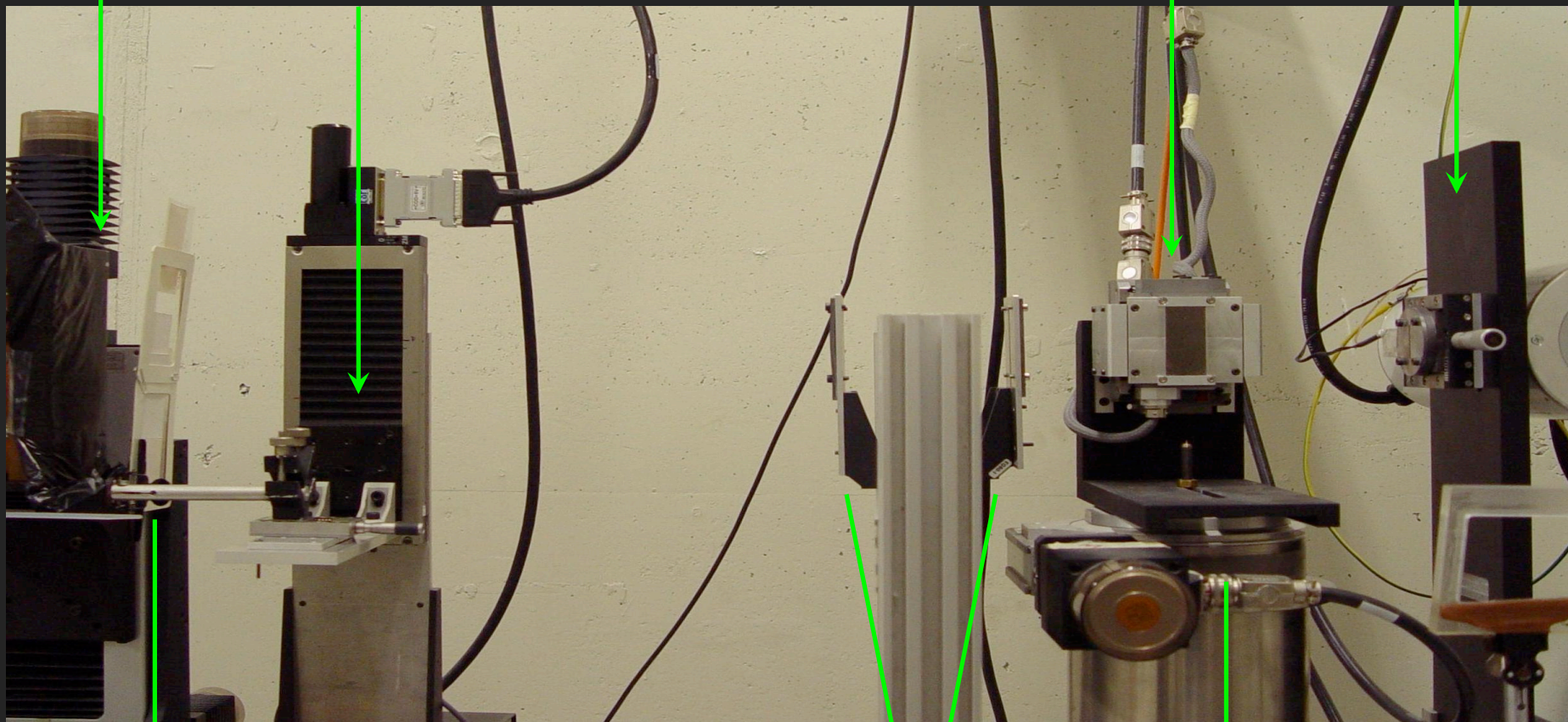


Supporto,  
motori e  
*rivelatore*

Supporto e  
motori  
oggetto test

Motori *crystallo*

Supporto e  
goniometro  
*tubo raggi X*

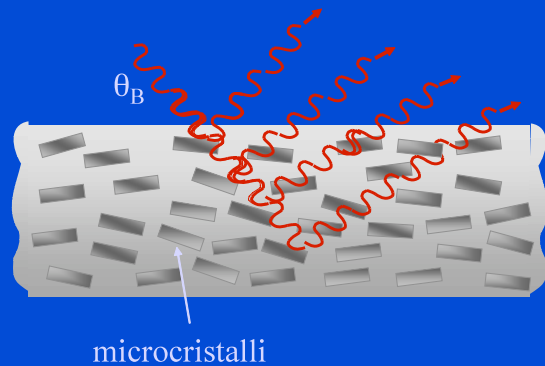


*Oggetto test*

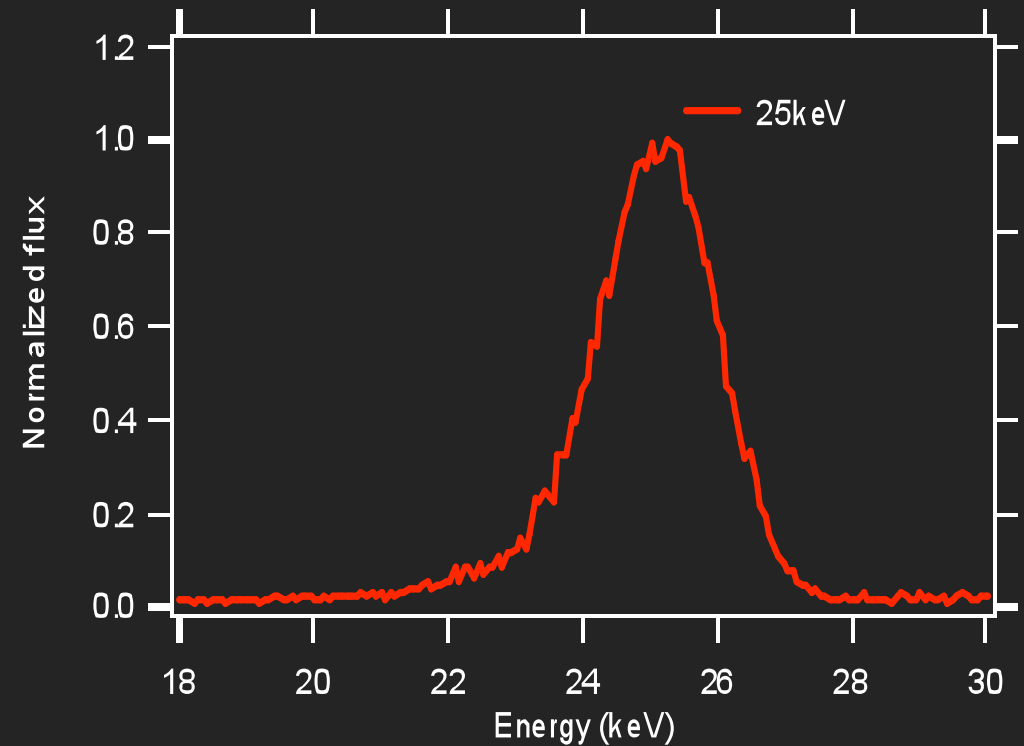
Collimatori

Goniometro *crystallo*

## Cristallo di grafite a mosaico



$$2d \sin\theta_B = n hc/E$$

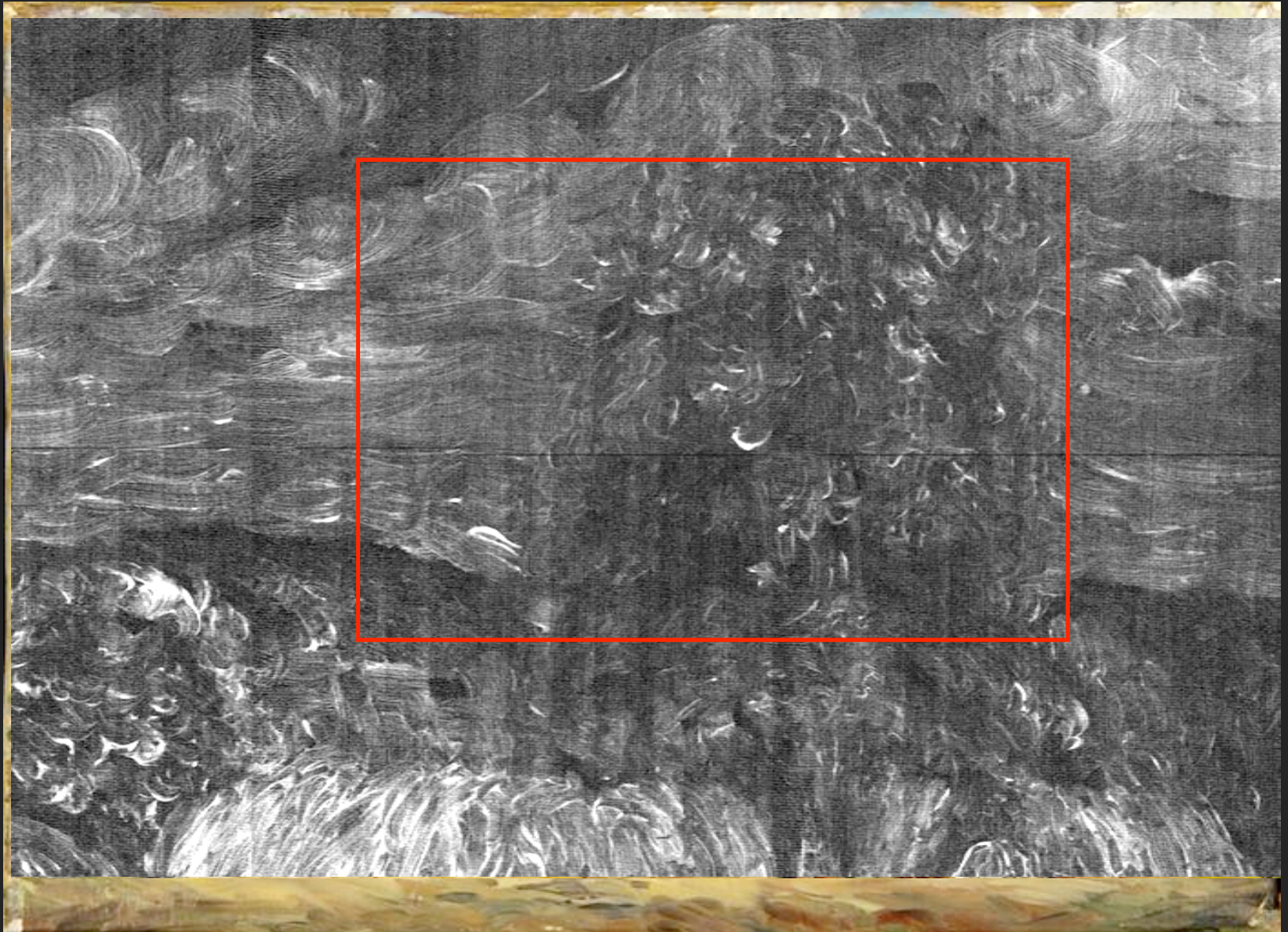


Il cristallo a mosaico non è un monocristallo: si ottiene un flusso di fotoni più intenso ma una distribuzione non monocromatica



*Mietitura a  
Montfoucault  
Copia da  
Pissarro,  
olio su tela,  
1980*

*Rectangolare  
differenziale*





➔ Radiografie monocromatiche

○ Immagine Low 9keV

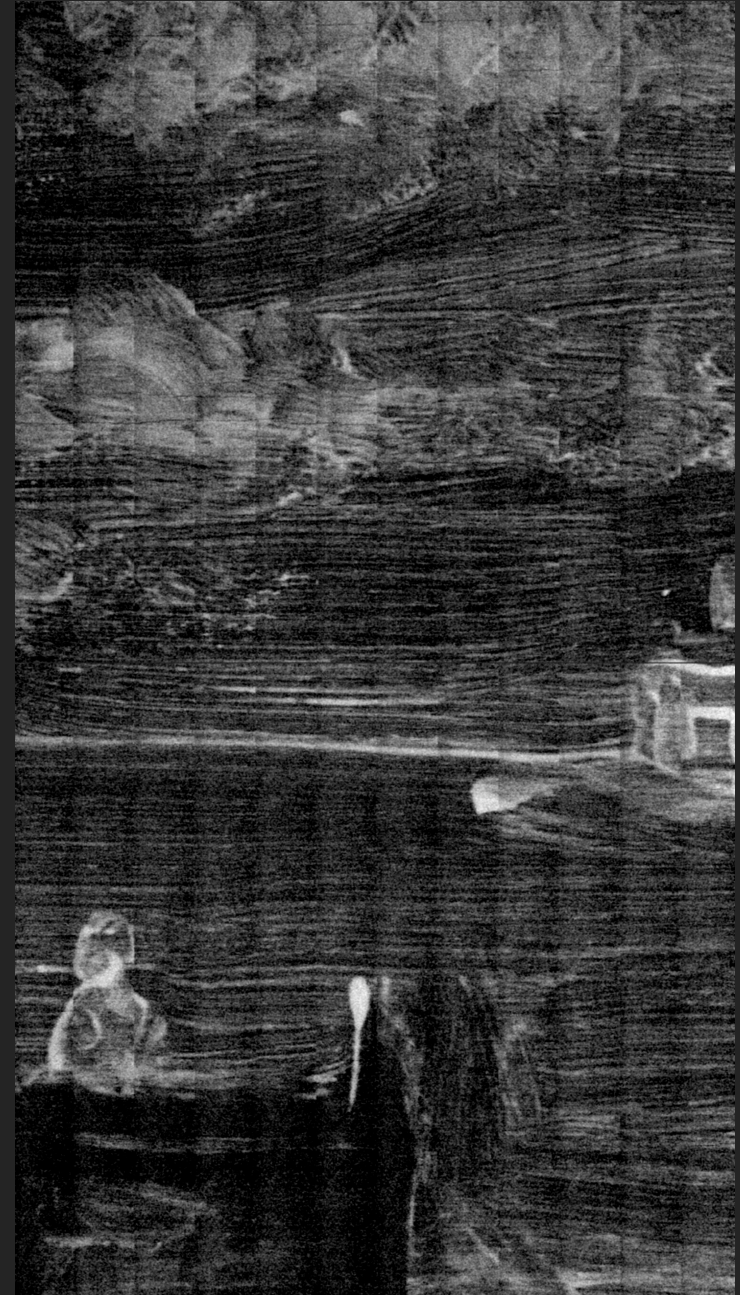
○ Immagine High 10,3keV

➔ Distribuzione degli elementi g/cm<sup>2</sup>

○ Tutti gli elementi

○ Zinco

Anonimo, XX sec.  
Paesaggio di Mare  
Olio su tavola



*Ringraziamenti a:*

*prof. Raffaella Rimaboschi, società Artconservation - Firenze e Unife  
Fondazione dell'Università Internazionale dell'Arte di Firenze,  
per la diagnostica del Neri di Bicci*

*dott.ssa Maria Pia Morigi, Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna,  
per le slides introduttive*

*dott.ssa Fauzia Albertin, Dipartimento di Fisica dell'Università di Ferrara  
dott.ssa Micol Ricca, Tecnologie per i Beni Culturali Unife*