



**Università
degli Studi
di Ferrara**



La fisica per i Beni Culturali senza acceleratori

Dott.ssa Anna Impallaria
Prof. Ferruccio Petrucci

Laboratorio di Archeometria,
Dip. Fisica e Scienze della Terra, UniFE
INFN-CHNet, Ferrara

Le tecniche per immagini

NON invasive



Non si modifica l'oggetto in esame (no campioni)

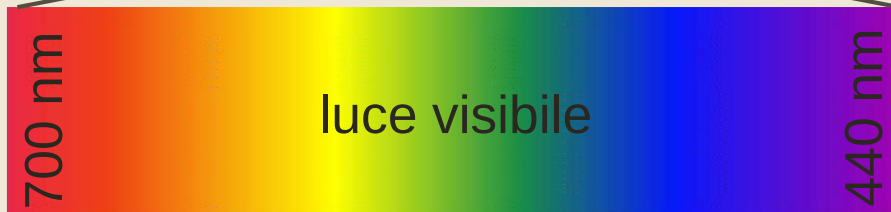
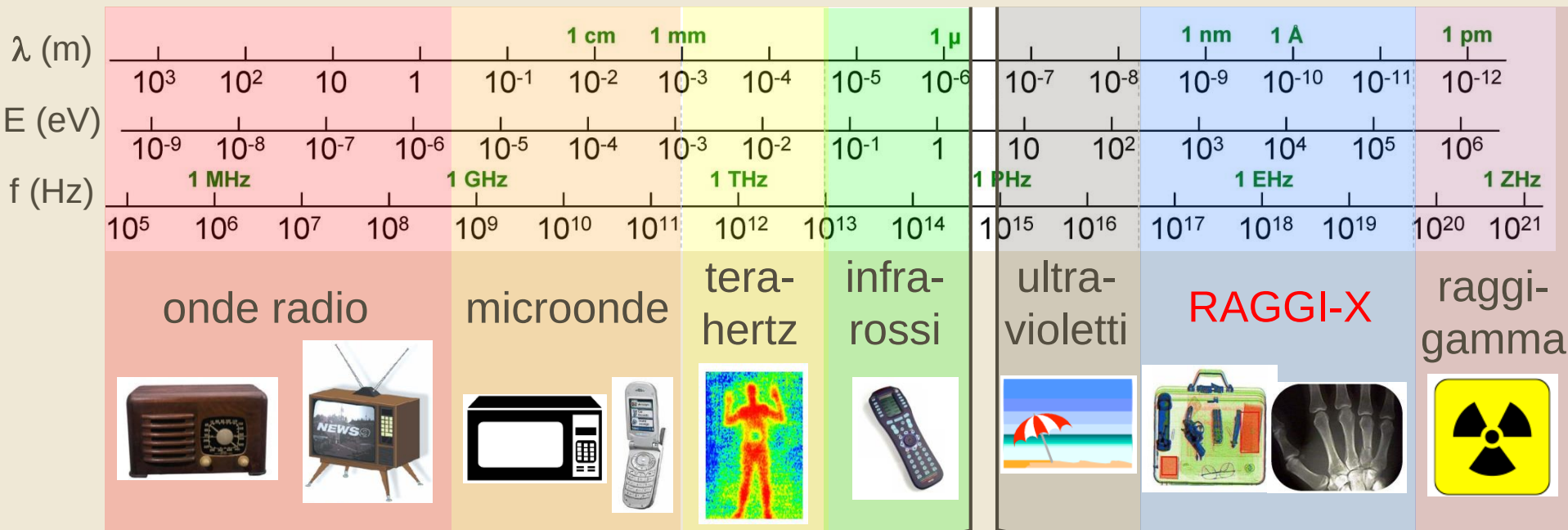
NON distruttive



Il campione (o l'area) analizzato si conserva identico

Risultato ottenuto è un'immagine

Lo spettro elettromagnetico



La struttura di un dipinto

- **Vernice**

Strato di sacrificio che protegge il dipinto e rende più brillanti i colori

- **Strato Pittorico:**

Pigmento = colore e potere coprente

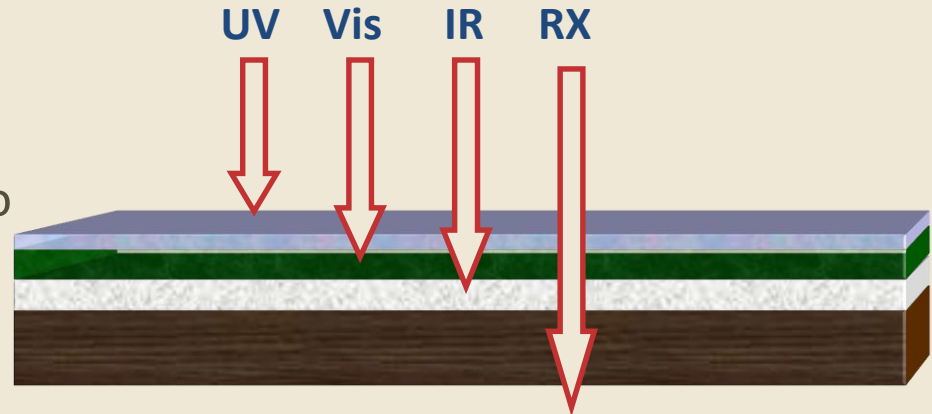
Legante = mantiene il pigmento ancorato allo strato preparatorio

- **Disegno**

- **Strato preparatorio: gesso e colla**

Rende la superficie liscia e omogenea, e idonea a ricevere il colore

- **Supporto: legno o tela**



L'analisi in luce radente



Evidenzia le asperità
della superficie.

Filippo De Pisis
Il gladiolo fulminato
1930, olio su cartone incollato su legno
71,5 x 51 cm
Ferrara,
Museo De Pisis

La Fluorescenza UV

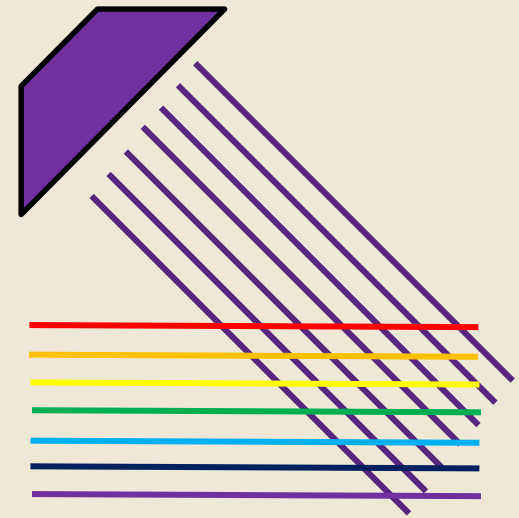
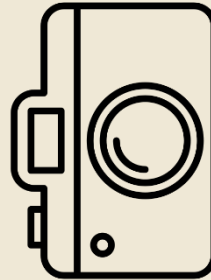
Fluorescenza: Proprietà per cui irraggiando un materiale con radiazione di una data Energia, questi emette una radiazione di Energia minore (λ maggiore)

La Fl. UV è tipica per i materiali organici (ad es. Vernici) ed è maggiore per materiali più antichi

Integrazioni pittoriche - restauri, vernici e pigmenti differenti

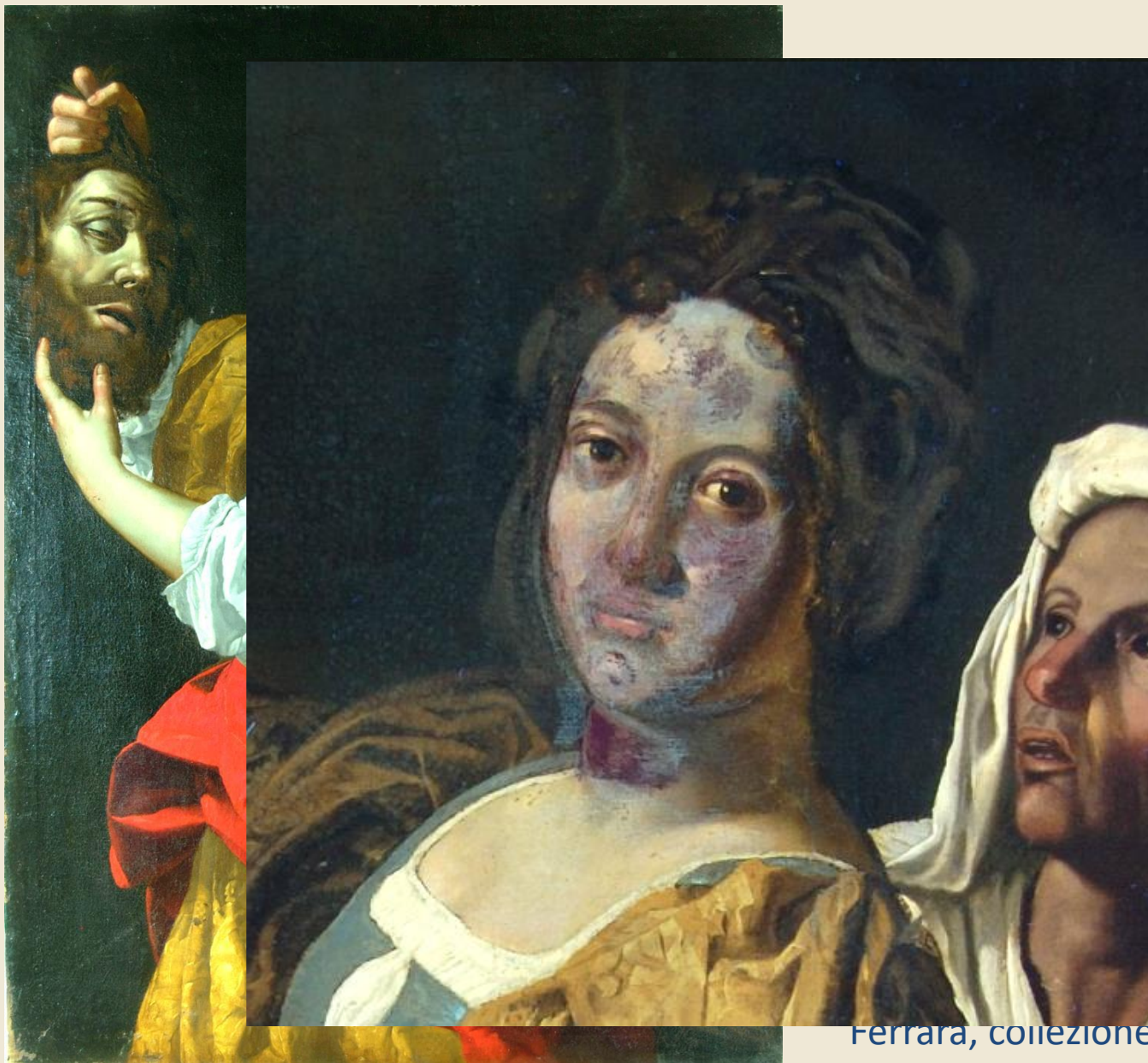
$400 \text{ nm} < \text{UV} < 10 \text{ nm}$

Lampada di Wood



Dipinto





Stileschi,
e,
ela,

Ferrara, collezione privata

Fluorescenza UV (foto)

La Riflettografia IR

Propagazione della luce*:

In un mezzo trasparente e omogeneo, che contiene particelle disperse, poco assorbenti e di dimensioni confrontabili con λ incidente, l'attenuazione del fascio è dovuta per lo più alla diffusione (scattering).

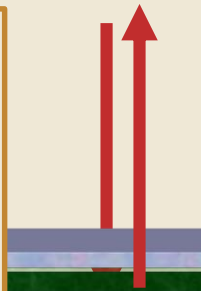
$750 \text{ nm} < \text{NIR} < 3 \text{ }\mu\text{m}$

Mezzo = legante
Particelle = pigmenti

$$S = 1/\lambda$$

Aumentando λ , la propagazione in avanti è favorita

Disegno preparatorio:
Contrasto tra materiale assorbente (carbonioso) e materiale riflettente (preparazione chiara).



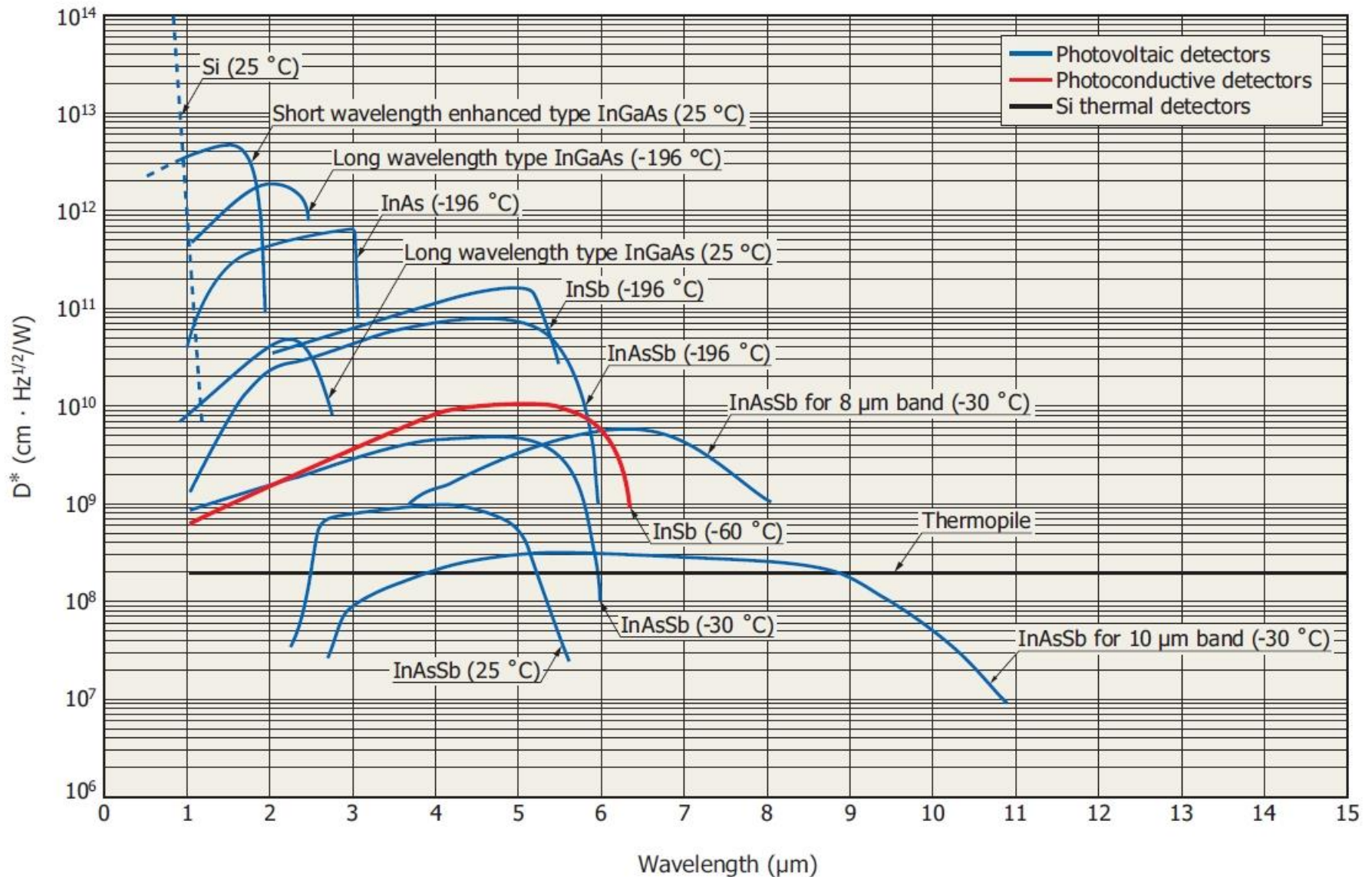
N.B. Il risultato riflettografico dipende dalla trasparenza degli strati pittorici (spessore, pigmenti) e dal tipo di rivelatore (range spettrale)

* Teoria di Kubeka-Munk (diffusione) e teoria di Mie (dimensione particelle)



Cosmè Tura
Sant'Antonio da Padova
XV sec., olio su tavola
178 x 80 cm
Modena, Galleria Estense

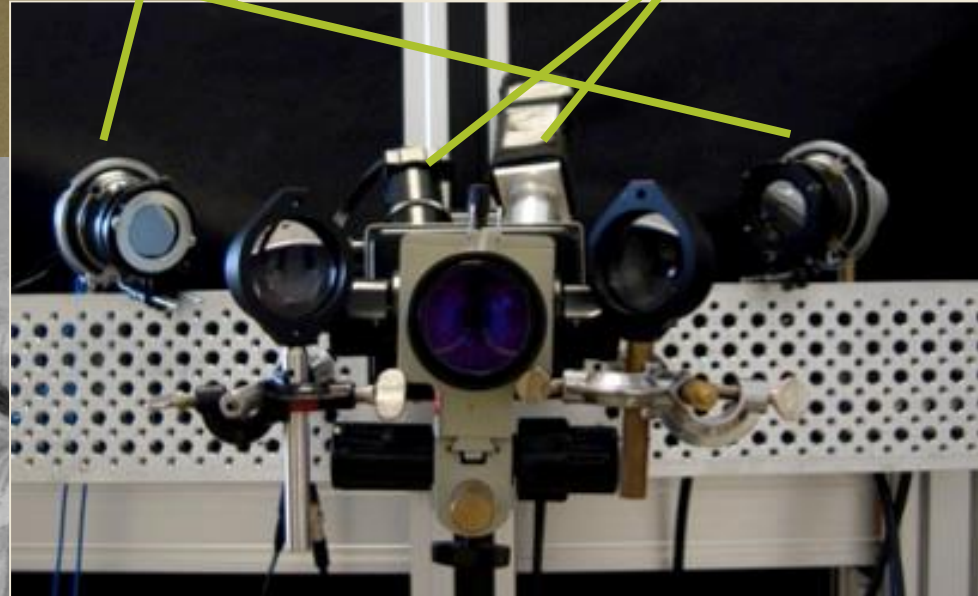
I rivelatori



Sensibilità spettrale di rivelatori IR a stato solido dal catalogo Hamamatsu '17

LAMPADE

DETECTOR



IR (InGaAs)

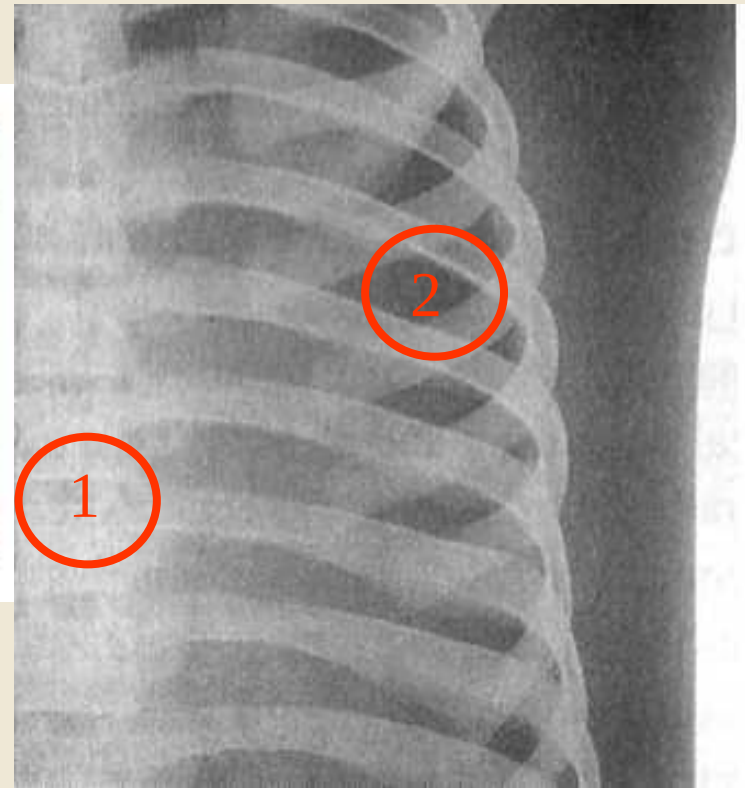
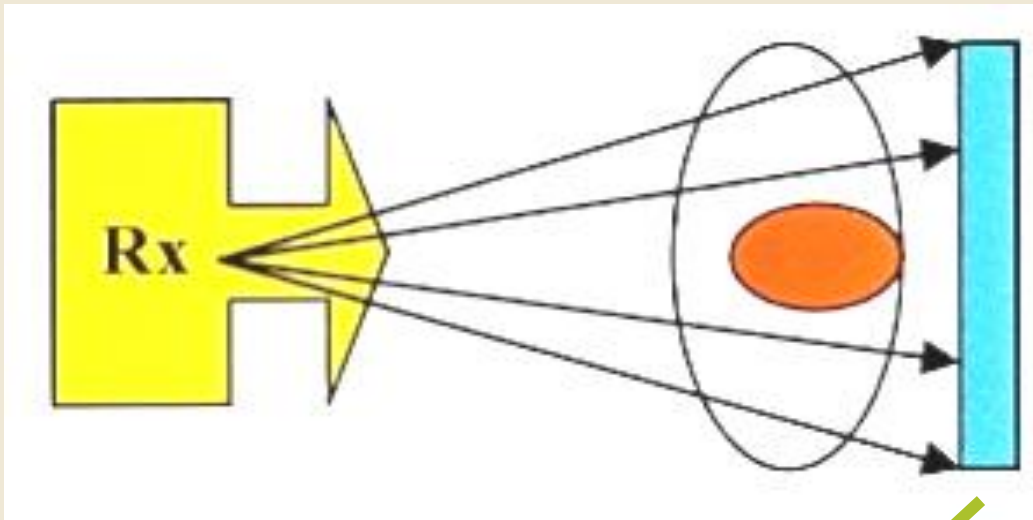
CCD (Silicio): 850-1100 nm

InGaAs: 1000-2300 nm

Visibile

G. Nardozzi, "Viole", Pastello, 1889, Collezione privata

La Radiografia X



Rivelatore : lastra radiografica

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



zone chiare

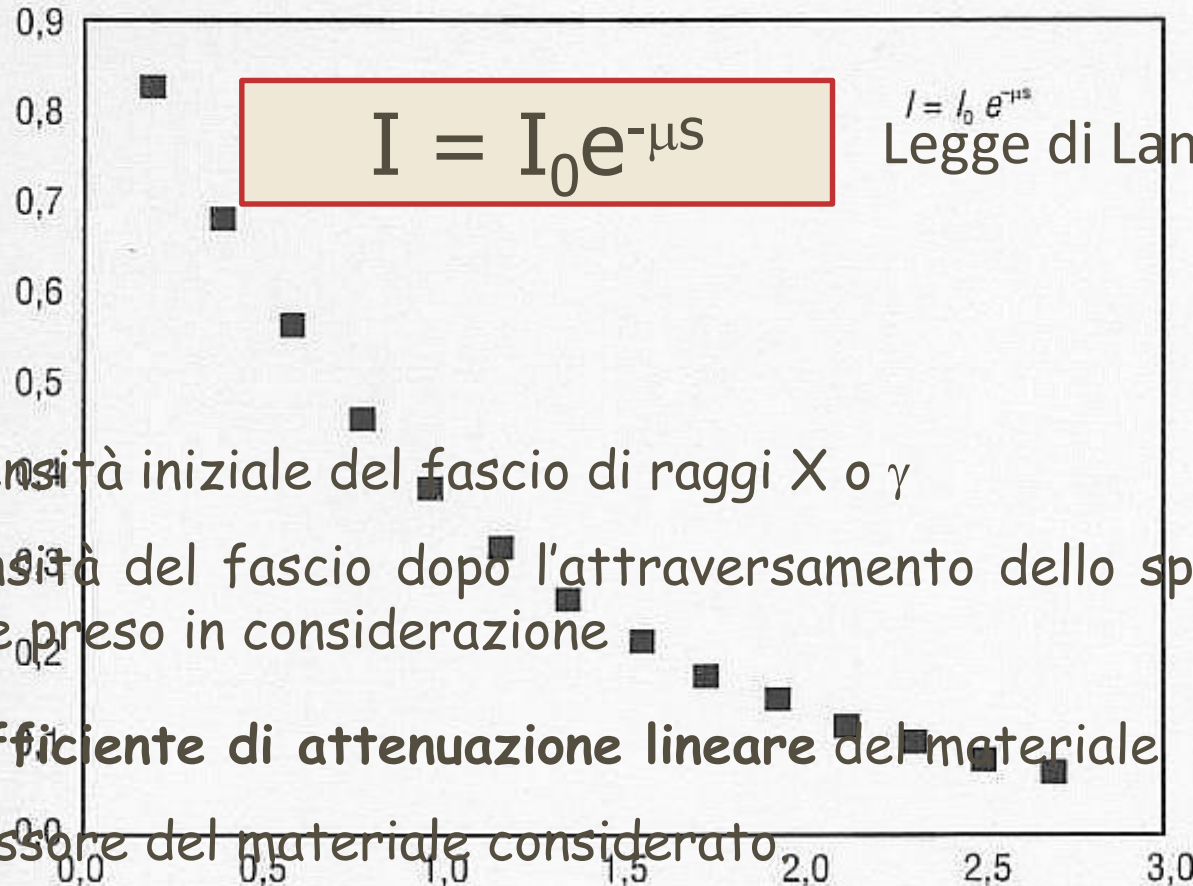


zone scure

Attenuazione dei raggi X nella materia

Per raggi X monoenergetici e materiali omogenei:

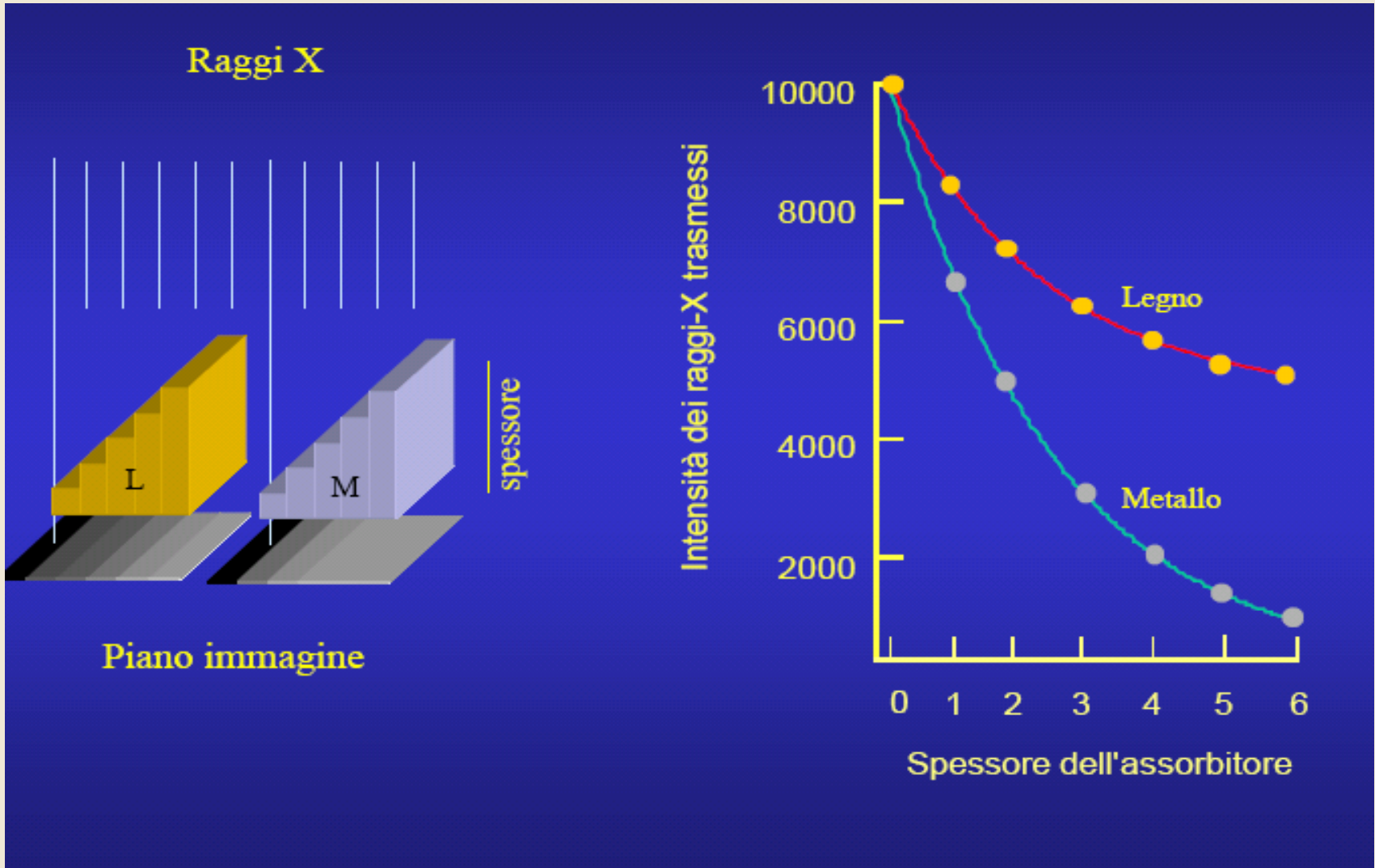
I/I_0



dove:

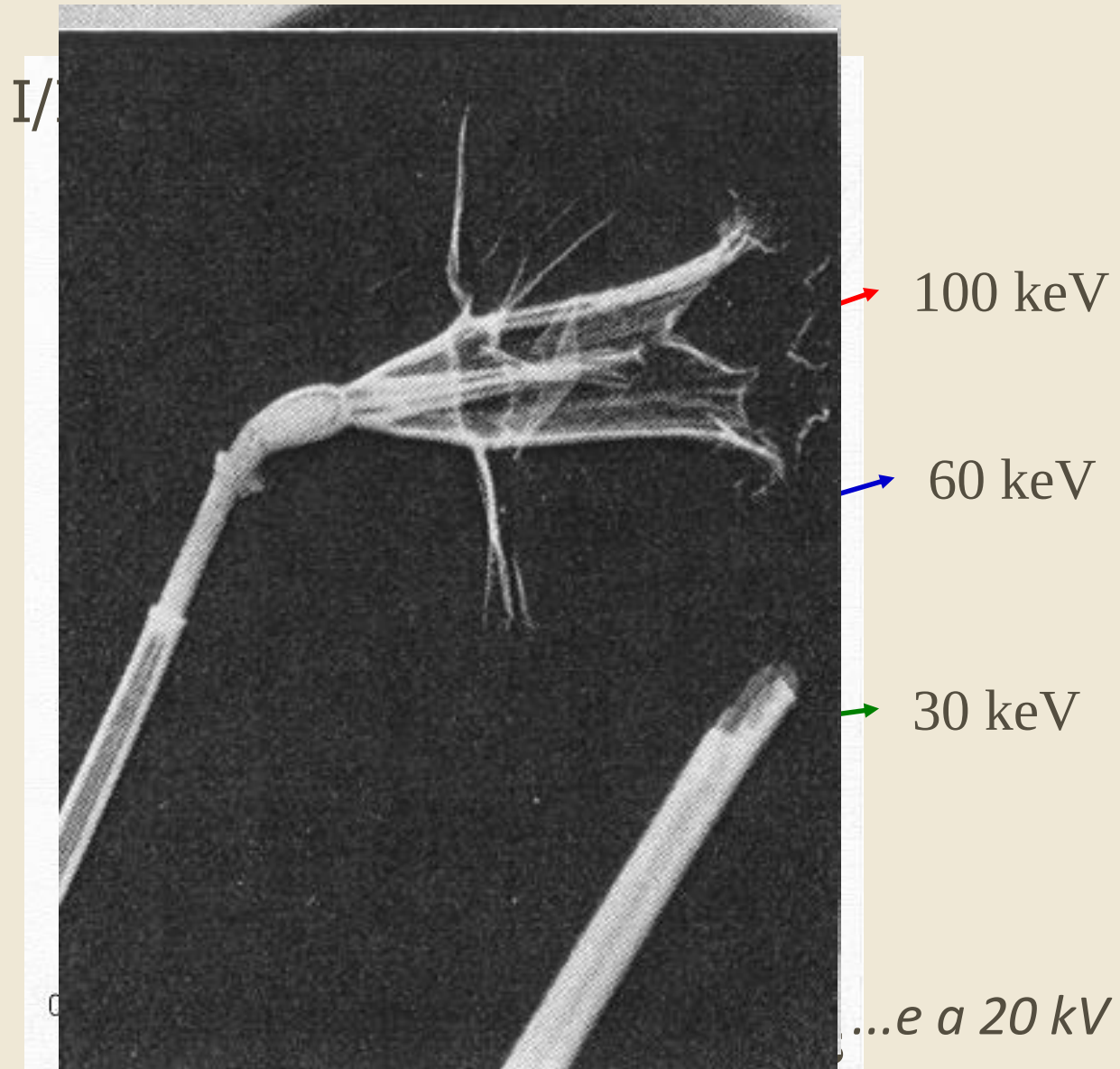
- I_0 è l'intensità iniziale del fascio di raggi X o γ
- I è l'intensità del fascio dopo l'attraversamento dello spessore di materiale preso in considerazione
- μ è il **coefficiente di attenuazione lineare** del materiale
- S è lo spessore del materiale considerato

Materiali diversi attenuano il fascio diversamente:



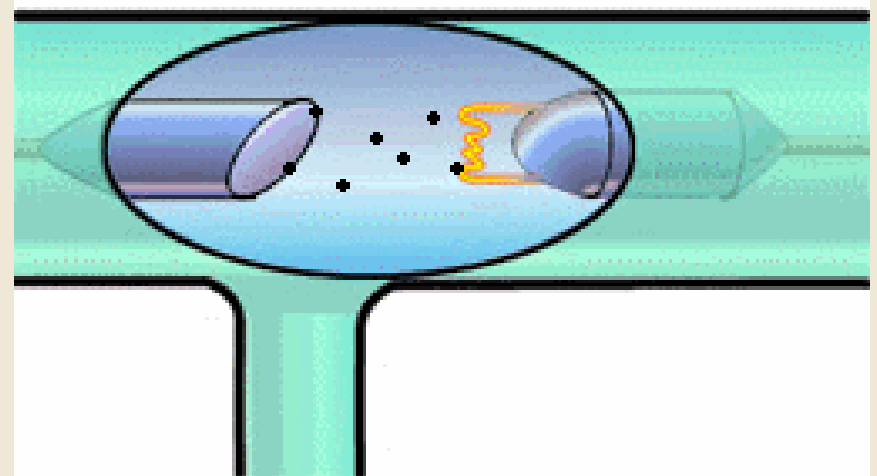
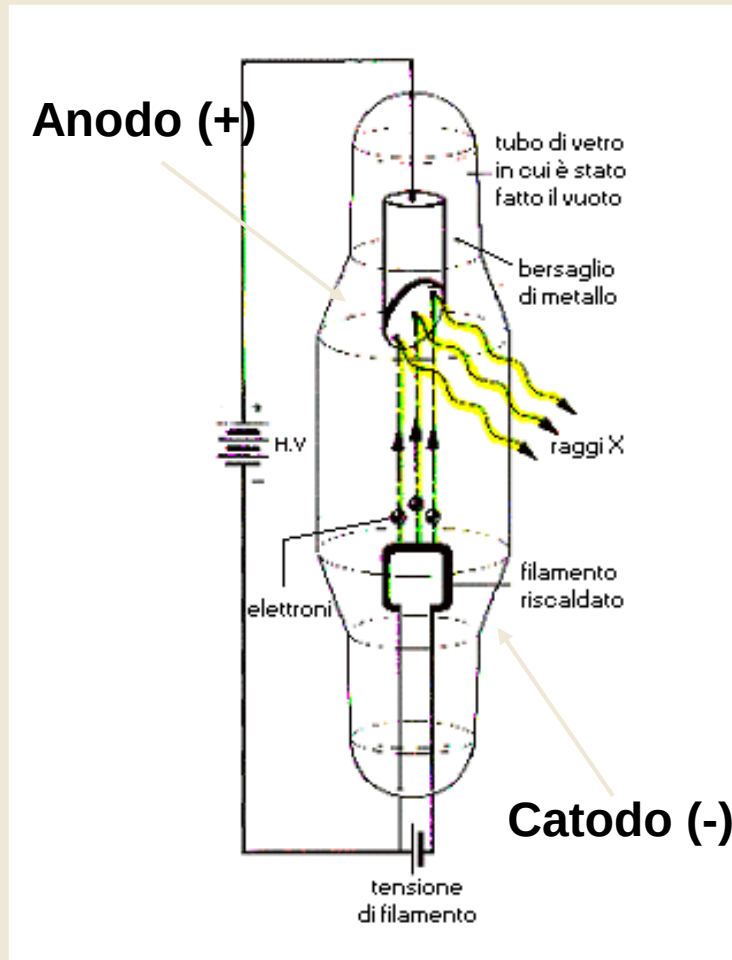
E fasci a maggiore Energia sono attenuati meno:

*Radiografia di
un fiore a 5
kV...*



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

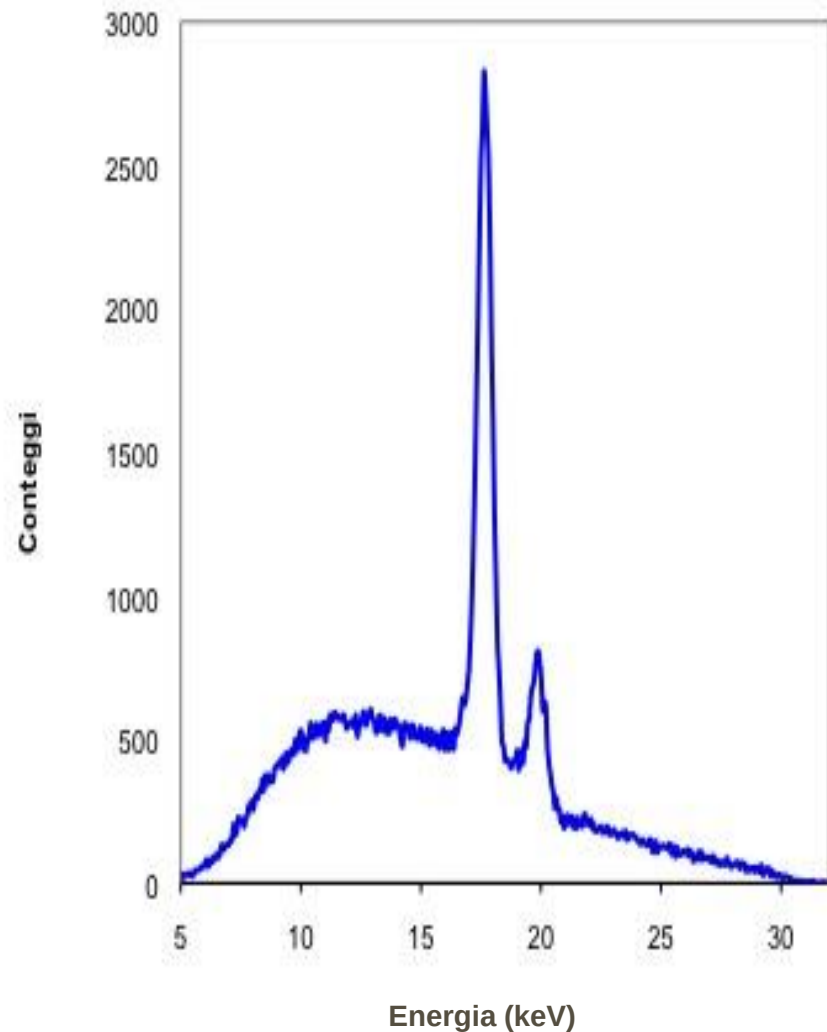
Sorgente: il tubo a raggi X



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



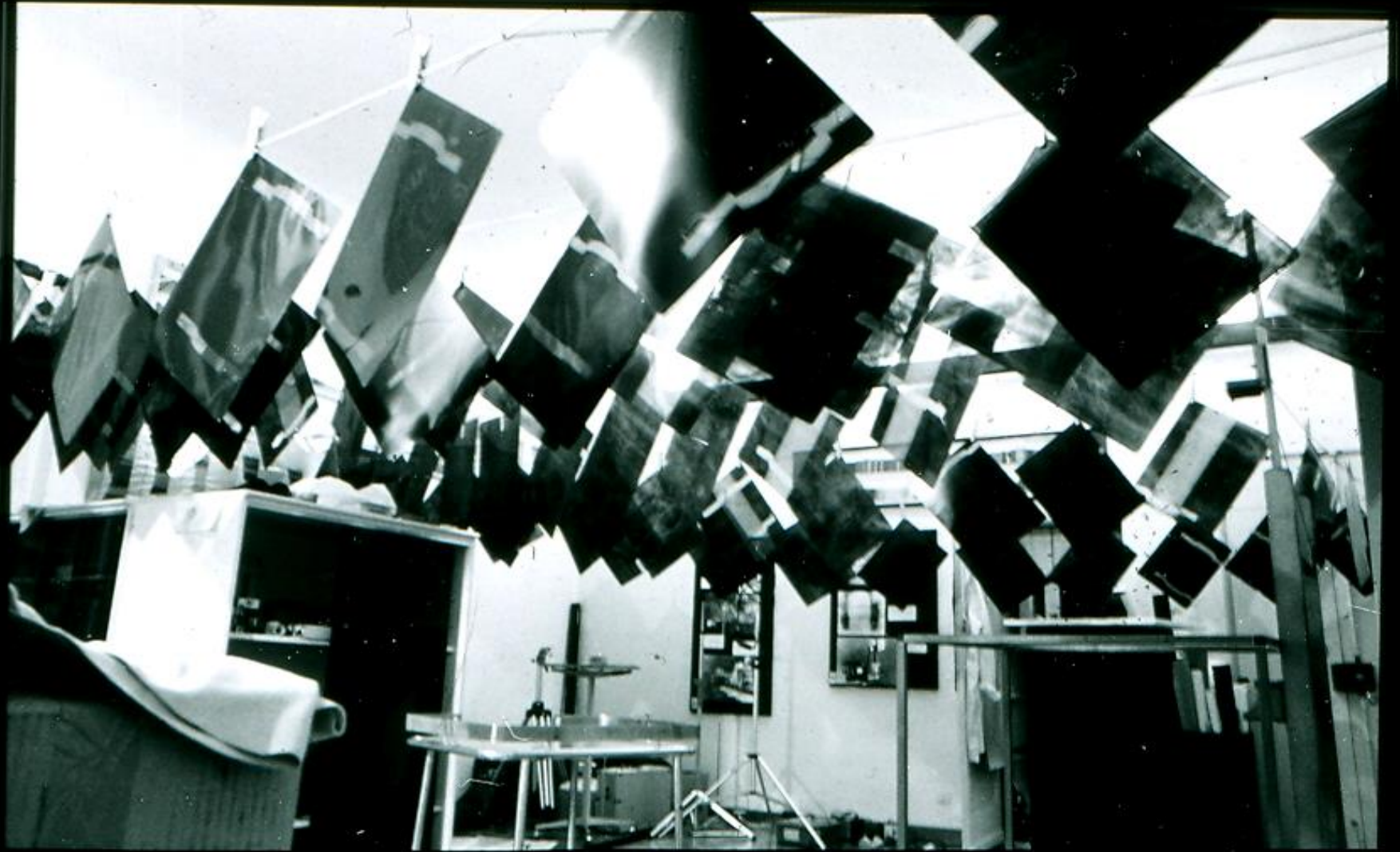
Quali caratteristiche del dipinto danno luogo all'immagine radiografica?

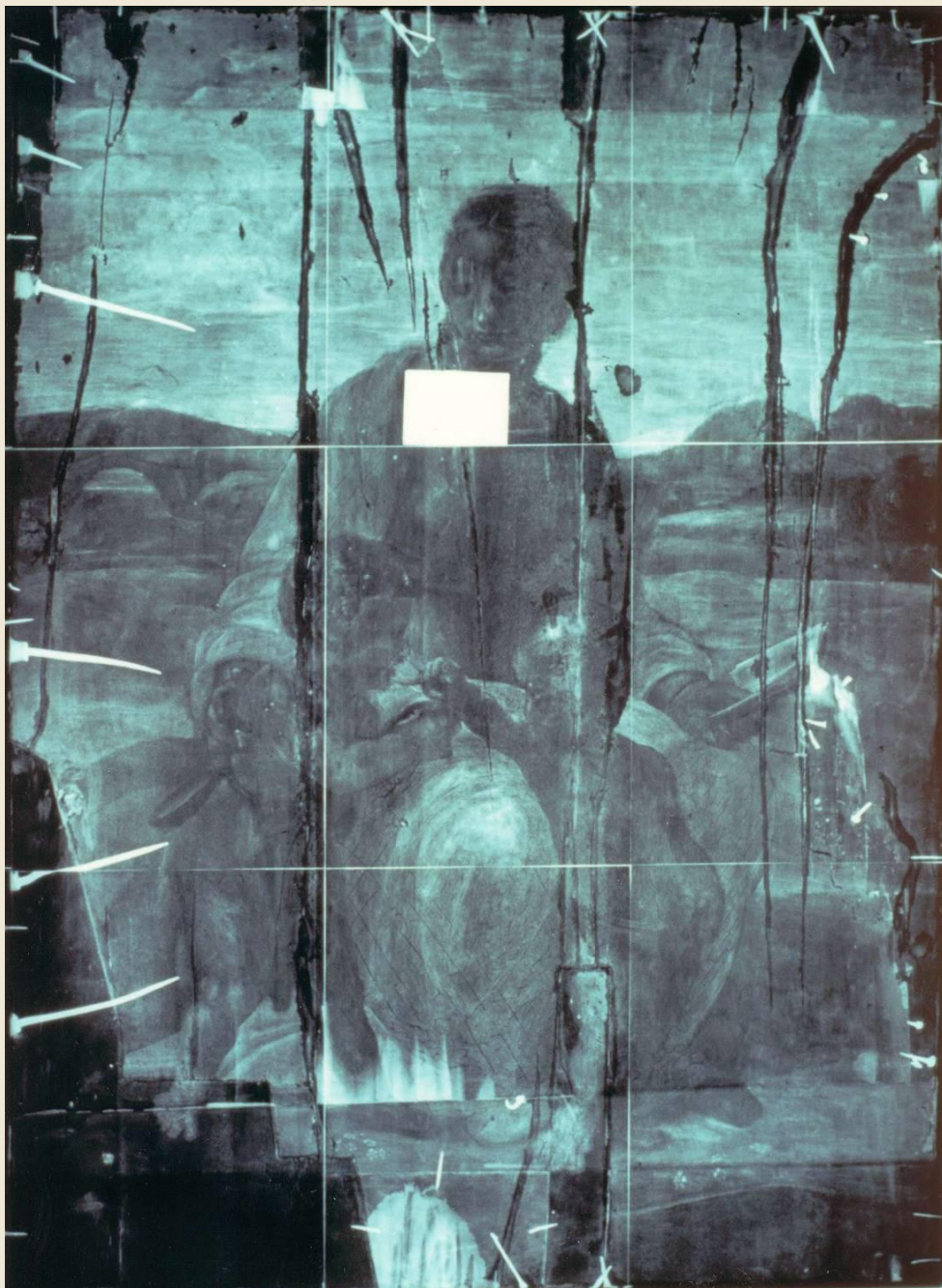
$$I = I_0 e^{-\mu s}$$

spessore

numero atomico

densità





Raffaello
Madonna del Cardellino
Firenze, Galleria Palatina

Foto in luce visibile

Radiografia E.Di.Tech., Firenze

La radiografia X digitale

1

Si basa sull'uso di rivelatori flat panel:

Matrice di fotodiodi CMOS + schermo scintillatore $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$

Radiografia Digitale

4096 grey levels

Visualizzazione immediata

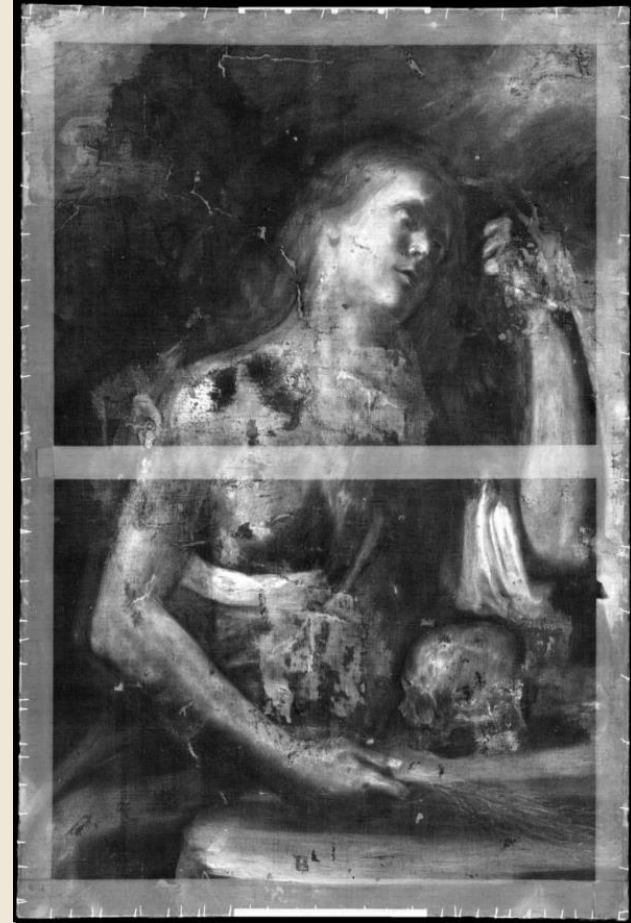
Feedback dei parametri di esposizione

Elaborazione

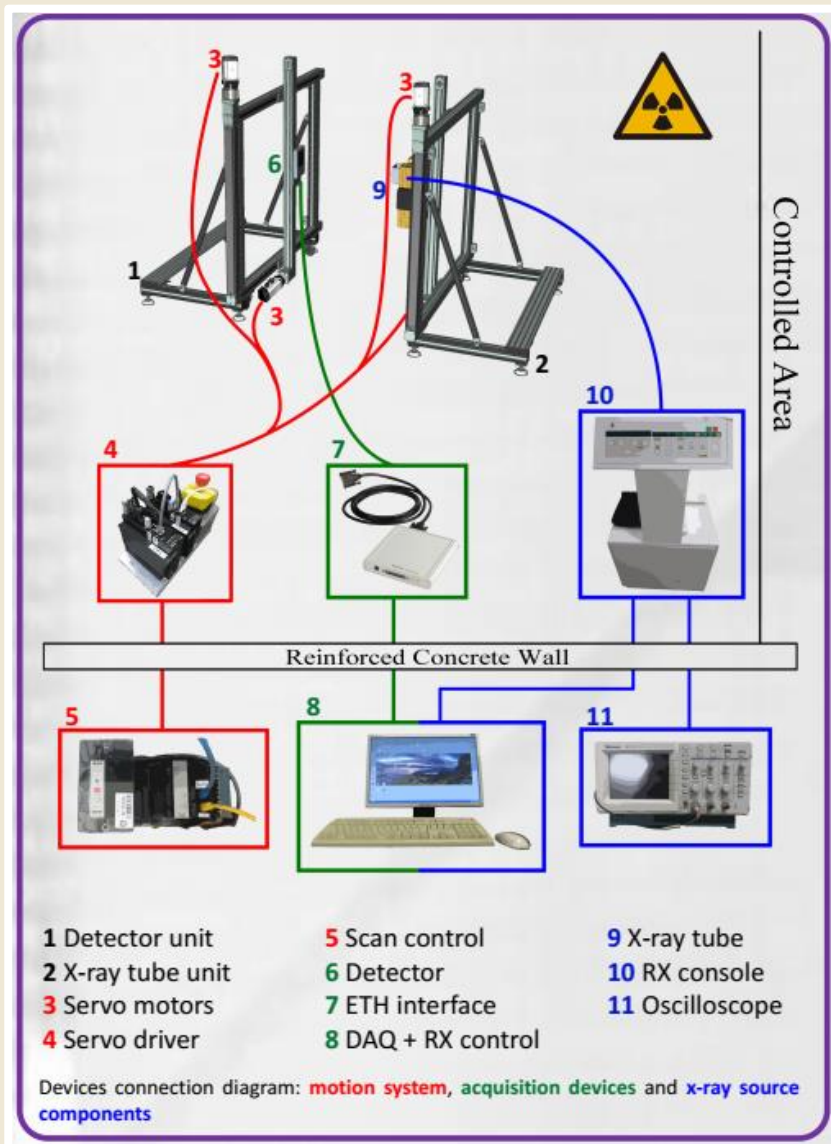
- 2 Nessun limite nelle dimensioni
Radiografia *In situ*



RX Tradizionale vs RX Digitale



Lo scanner radiografico



Due unità **indipendenti**:

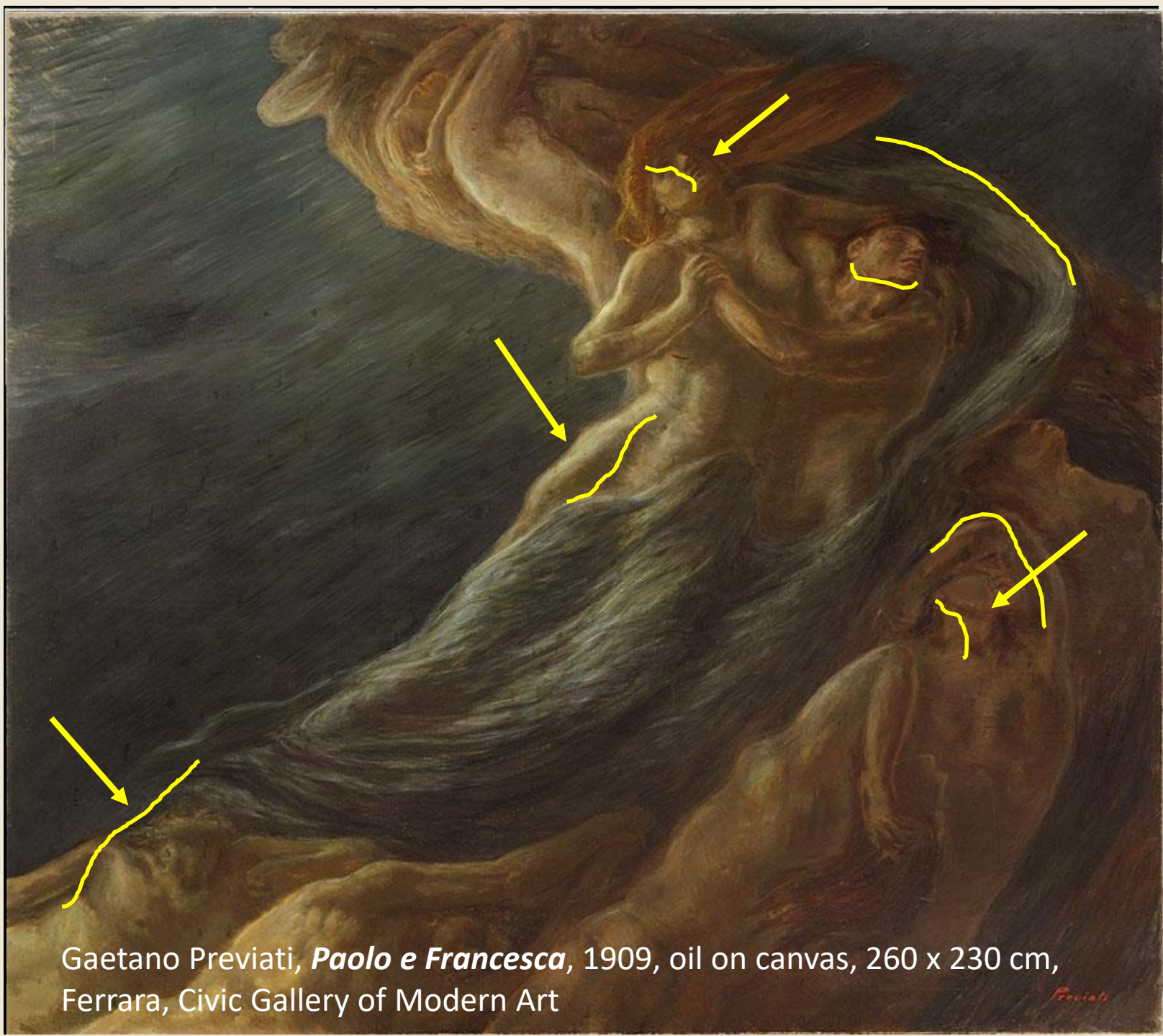
- 1.40 x 1.53 x 0.74 m
- peso ~ 55 kg
- 1 m² area di scansione



Siracusa, 2016

Padiglione di Arte Contemporanea, Ferrara 2017

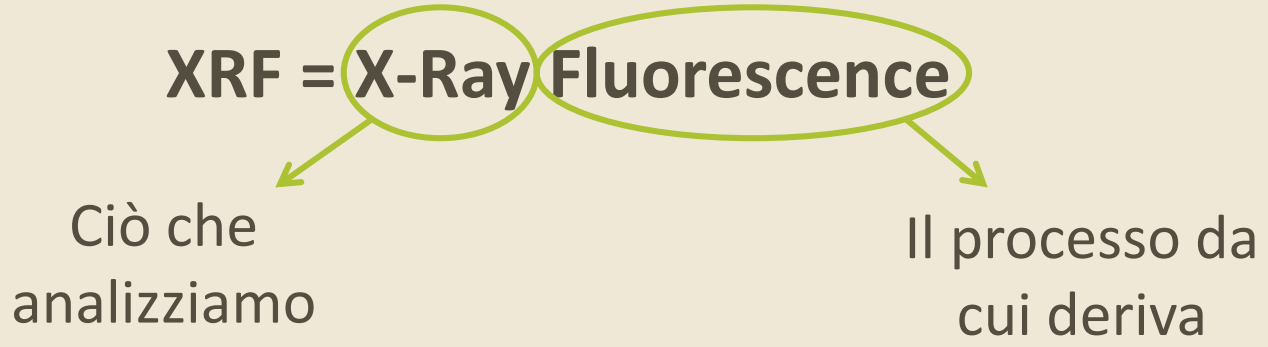




Gaetano Previati, *Paolo e Francesca*, 1909, oil on canvas, 260 x 230 cm, Ferrara, Civic Gallery of Modern Art

L'analisi XRF

XRF = X-Ray Fluorescence



Ciò che
analizziamo

Il processo da
cui deriva

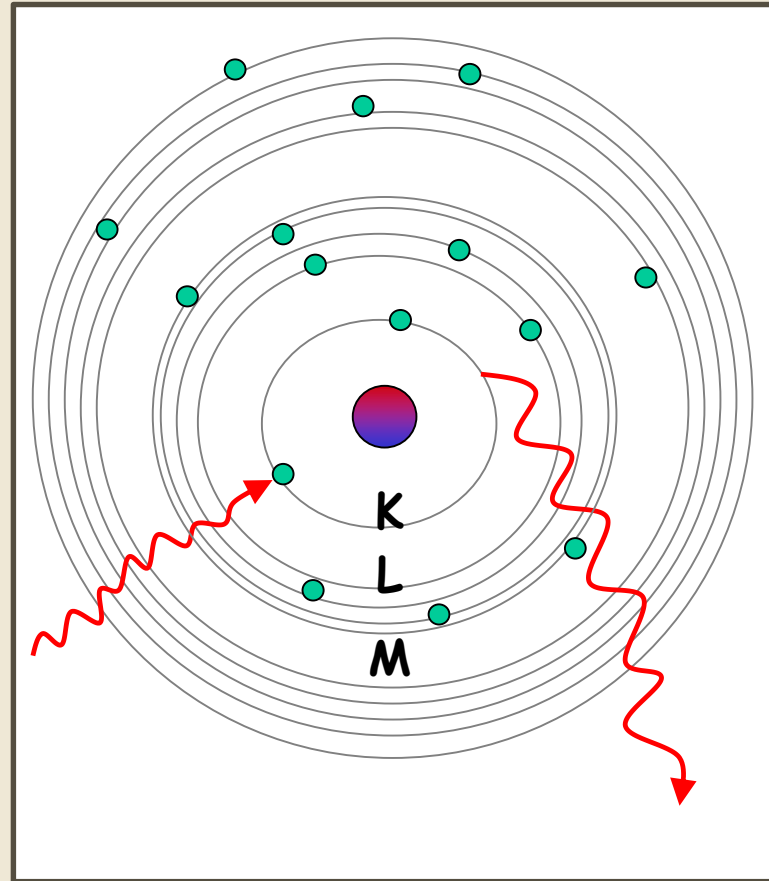
Tecnica **non invasiva**: **NO** prelievo di materiale dall'opera

Tecnica **non distruttiva**: **Nessuna** modifica chimico-fisica al materiale analizzato

Può essere **portatile**: È largamente impiegata per l'analisi dei materiali nei beni culturali

Fluorescenza X

Fascio X
primario



Effetto
fotoelettrico

Fascio X in uscita
(caratteristico)

- 1- ionizzazione dell'atomo
- 2- riempimento della lacuna con un elettrone da un orbitale più esterno (stabilizzazione)

L'elettrone che va a riempire la lacuna, trovandosi a un livello energetico di partenza a più alta energia, deve **perdere energia** per spostarsi nell'orbitale più interno.

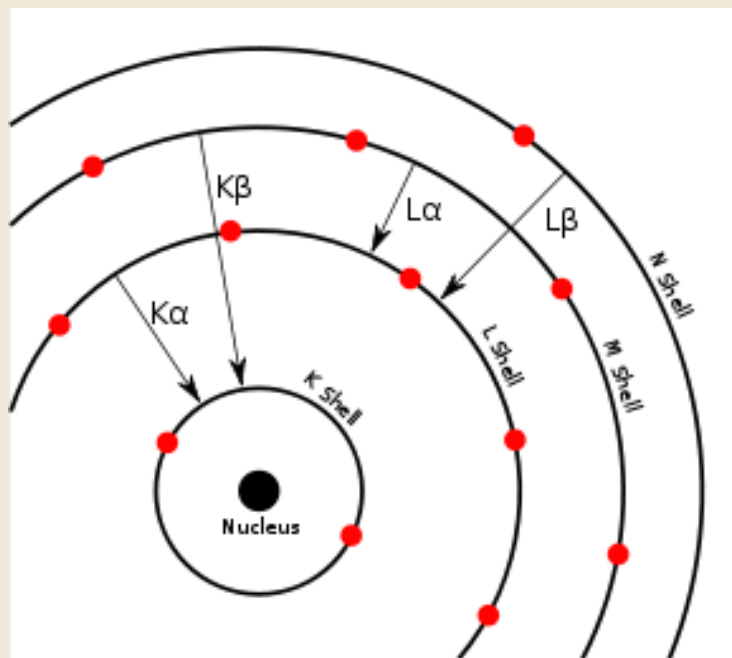


Emissione di raggi X

$$E_X = \Delta E = E_{\text{iniziale}} - E_{\text{finale}}$$



Raggi X caratteristici
dell'elemento chimico



Nomenclatura

Table 1-2. Photon energies, in electron volt, of principal K-, L-, and M-shell emission lines.

Element	K α_1	K α_2	K β_1	L α_1	L α_2	L β_1	L β_2	L γ	M α_1
3 Li	54.3								
4 Be	108.5								
5 B	183.3								
6 C	277								
7 N	392.4								
8 O	524.9								
9 F	676.8								
10 Ne	848.6	848.6							
11 Na	1,040.98	1,040.98	1,071.1						
12 Mg	1,253.60	1,253.60	1,302.2						
13 Al	1,486.70	1,486.27	1,557.45						
14 Si	1,739.98	1,739.38	1,835.94						
15 P	2,013.7	2,012.7	2,139.1						
16 S	2,307.84	2,306.64	2,464.04						
17 Cl	2,622.39	2,620.78	2,815.6						
18 Ar	2,957.70	2,955.63	3,190.5						
19 K									
20 Ca									
21 Sc									

Table 1-2. Energies of x-ray emission lines (continued).

Element	K α_1	K α_2	K β_1	L α_1	L α_2	L β_1	L β_2	L γ	M α_1
22 Ti	4,510.84	4,504.86	4,931.81	452.2	452.2	458.4			
23 V	4,952.20	4,944.64	5,427.29	511.3	511.3	519.2			
24 Cr	5,414.72	5,405.509	5,946.71	572.8	572.8	582.8			
25 Mn	5,898.75	5,887.65	6,490.45	637.4	637.4	648.8			
26 Fe	6,403.84	6,390.84	7,057.98	705.0	705.0	718.5			
27 Co	6,930.32	6,915.30	7,649.43	776.2	776.2	791.4			
28 Ni	7,478.15	7,460.89	8,264.66	851.5	851.5	868.8			
29 Cu	8,047.78	8,027.83	8,905.29	929.7	929.7	949.8			
30 Zn	8,638.86	8,618.79	9,572.0	1,011.7	1,011.7	1,034.7			
31 Ga	9,264.2	9,244.2	10,264.2	1,097.92	1,097.92	1,124.8			
32 Ge	9,982.1	9,962.1	10,982.1	1,188.00	1,188.00	1,218.5			
33 As	11,726.2	11,706.2	12,726.2	1,282.0	1,282.0	1,317.0			
34 Se	12,495.9	12,475.9	13,495.9	1,379.10	1,379.10	1,419.23			
35 Br	13,291.4	13,271.4	14,291.4	1,480.43	1,480.43	1,525.90			
36 Kr	14,112	14,092	15,112	1,586.0	1,586.0	1,636.6			
37 Rb	14,961.3	14,941.3	15,961.3	1,694.13	1,692.56	1,752.17			
38 Sr	15,835.7	15,815.7	16,835.7	1,806.56	1,804.74	1,871.72			
39 Y	16,737.8	16,717.8	17,737.8	1,922.56	1,920.47	1,995.84			
40 Zr	17,667.8	17,647.8	18,667.8	2,042.36	2,039.9	2,124.4*	2,219.4	2,302.7	
41 Nb	18,622.5	18,602.5	19,622.5	2,165.89	2,163.0	2,257.4	2,367.0	2,461.8	
42 Mo	19,608.3	19,588.3	20,608.3	2,293.16	2,289.85	2,394.81	2,518.3	2,623.5	
43 Tc	20,619	20,599	21,619	2,424	2,420	2,538	2,674	2,792	
44 Ru	21,656.8	21,636.8	22,656.8	2,558.55	2,554.31	2,683.2*	2,816.0	2,944.6	
45 Rh	22,723.6	22,703.6	23,723.6	2,696.74	2,692.05	2,834.4			
46 Pd	23,818.7	23,798.7	24,818.7	2,838.61	2,833.29	2,990.2			
47 Ag	24,942.4	24,922.4	25,942.4	2,984.31	2,978.21	3,150.9			
48 Cd	26,095.5	26,075.5	27,095.5	3,133.73	3,126.91	3,316.5			
49 In	27,275.9	27,255.9	28,275.9	3,286.94	3,279.29	3,487.2			
50 Sn	28,486.0	28,466.0	29,486.0	3,443.98	3,435.42	3,662.8			
51 Sb	29,725.6	29,705.6	30,725.6	3,604.72	3,595.32	3,843.5			
52 Te	30,995.7	30,975.7	31,995.7	3,769.33	3,758.8	4,029.5			
53 I	32,294.7	32,274.7	33,294.7	3,937.65	3,926.04	4,220.7			
54 Xe	33,624	33,604	34,624	4,109.9	—	—			
55 Cs	34,986.9	34,966.9	35,986.9	4,286.5	4,272.2	4,619.8			
56 Ba	36,378.2	36,358.2	37,378.2	4,466.26	4,450.90	4,827.5			
57 La	37,801.0	37,781.0	38,801.0	4,650.97	4,634.23	5,042.1			
58 Ce	39,257.3	39,237.3	40,257.3	4,840.2	4,823.0	5,262.2			
59 Pr	40,748.2	40,728.2	41,748.2	5,033.7	5,013.5	5,488.9			
60 Nd	42,271.3	42,251.3	43,271.3	5,230.4	5,207.7	5,721.6			
61 Pm	43,826	43,806	44,826	5,432.5	5,407.8	5,961			
62 Sm	45,413	45,393	46,413	5,636.1	5,609.0	6,205.1			

LBNL/PUB-490 Rev. 3

Center for X-Ray Optics
and
Advanced Light Source

X-RAY DATA BOOKLET

Albert Thompson Ingolf Lindau
David Attwood Yanwei Liu
Eric Gullikson Piero Pianetta
Malcolm Howells Arthur Robinson
Kwang-Je Kim James Scofield
Janos Kirz James Underwood
Jeffrey Kortright Gwyn Williams

Herman Winick

October 2009

Lawrence Berkeley National Laboratory
University of California
Berkeley, CA 94720

This work was supported in part by the U.S. Department
of Energy under Contract No. DE-AC02-05CH11231

X-ray emission energies

Table 1-2. Energies of x-ray emission lines (continued).

Element	K α_1	K α_2	K β_1	L α_1	L α_2	L β_1	L β_2	L γ	M α_1
63 Eu	41,542.2	40,901.9	47,037.9	5,845.7	5,816.6	6,456.4	6,843.2	7,480.3	1,131
64 Gd	42,996.2	42,308.9	48,697	6,057.2	6,025.0	6,713.2	7,102.8	7,785.8	1,185
65 Tb	44,481.6	43,744.1	50,382	6,272.8	6,238.0	6,978	7,366.7	8,102	1,240
66 Dy	45,998.4	45,207.8	52,119	6,495.2	6,457.7	7,247.7	7,635.7	8,418.8	1,293
67 Ho	47,546.7	46,699.7	53,877	6,719.8	6,679.5	7,525.3	7,911	8,747	1,348
68 Er	49,127.7	48,221.1	55,681	6,948.7	6,905.0	7,810.9	8,189.0	9,089	1,406
69 Tm	50,741.6	49,772.6	57,517	7,179.9	7,133.1	8,101	8,468	9,426	1,462
70 Yb	52,388.9	51,354.0	59,370	7,415.6	7,367.3	8,401.8	8,758.8	9,780.1	1,521.4
71 Lu	54,069.8	52,965.0	61,283	7,655.5	7,604.9	8,709.0	9,048.9	10,143.4	1,581.3
72 Hf	55,790.2	54,611.4	63,234	7,899.0	7,844.6	9,022.7	9,347.3	10,515.8	1,644.6
73 Ta	57,532	56,277	65,223	8,146.1	8,087.9	9,343.1	9,651.8	10,895.2	1,710
74 W	59,318.24	57,981.7	67,244.3	8,397.6	8,335.2	9,672.35	9,961.5	11,285.9	1,775.4
75 Re	61,140.3	59,717.9	69,310	8,652.5	8,586.2	10,010.0	10,275.2	11,685.4	1,842.5
76 Os	63,000.5	61,486.7	71,413	8,911.7	8,841.0	10,355.3	10,598.5	12,095.3	1,910.2
77 Ir	64,895.6	63,286.7	73,560.8	9,175.1	9,099.5	10,708.3	10,920.3	12,512.6	1,979.9
78 Pt	66,832	65,112	75,748	9,442.3	9,361.8	11,070.7	11,250.5	12,942.0	2,050.5
79 Au	68,803.7	66,989.5	77,984	9,713.3	9,628.0	11,442.3	11,584.7	13,381.7	2,122.9
80 Hg	70,819	68,895	80,253	9,988.8	9,897.6	11,822.6	11,924.1	13,830.1	2,195.3
81 Tl	72,871.5	70,831.9	82,576	10,268.5	10,172.8	12,213.3	12,271.5	14,291.5	2,270.6
82 Pb	74,969.4	72,804.2	84,936	10,551.5	10,449.5	12,613.7	12,622.6	14,764.4	2,345.5
83 Bi	77,107.9	74,814.8	87,343	10,838.8	10,730.91	13,025.5	12,979.9	15,247.7	2,422.6
84 Po	79,290	76,862	89,800	11,130.8	11,015.8	13,447	13,340.4	15,744	—
85 At	81,520	78,950	92,300	11,426.8	11,304.8	13,876	—	16,251	—
86 Rn	83,780	81,070	94,870	11,727.0	11,597.9	14,316	—	16,770	—
87 Fr	86,100	83,230	97,470	12,031.3	11,895.0	14,770	14,450	17,303	—
88 Ra	88,470	85,430	100,130	12,339.7	12,196.2	15,235.8	14,841.4	17,849	—
89 Ac	90,884	87,670	102,850	12,652.0	12,500.8	15,713	—	18,408	—
90 Th	93,350	89,953	105,609	12,968.7	12,809.6	16,202.2	15,623.7	18,982.5	2,996.1
91 Pa	95,868	92,287	108,427	13,290.7	13,122.2	16,702	16,024	19,568	3,082.3
92 U	98,439	94,665	111,300	13,614.7	13,438.8	17,220.0	16,428.3	20,167.1	3,170.8
93 Np	—	—	—	13,944.1	13,759.7	17,750.2	16,840.0	20,784.8	—
94 Pu	—	—	—	14,278.6	14,084.2	18,293.7	17,255.3	21,417.3	—
95 Am	—	—	—	14,617.2	14,411.9	18,852.0	17,676.5	22,065.2	—

L'analisi **XRF** è una tecnica non-invasiva che, identificando gli elementi presenti nel campione, permette di **riconoscere** molti dei **pigmenti** antichi.

Pigmenti antichi
(pre '800)

origine inorganica

caratterizzati dalla presenza
di 1 o più el. medio-pesanti

Esempi:

Pigmento:

Cinabro



Biacca



Giallorino



Formula:

HgS

$(\text{PbCO}_3)_2 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$

Pb_2SnO_4

Periodo:

Antica Grecia ad oggi

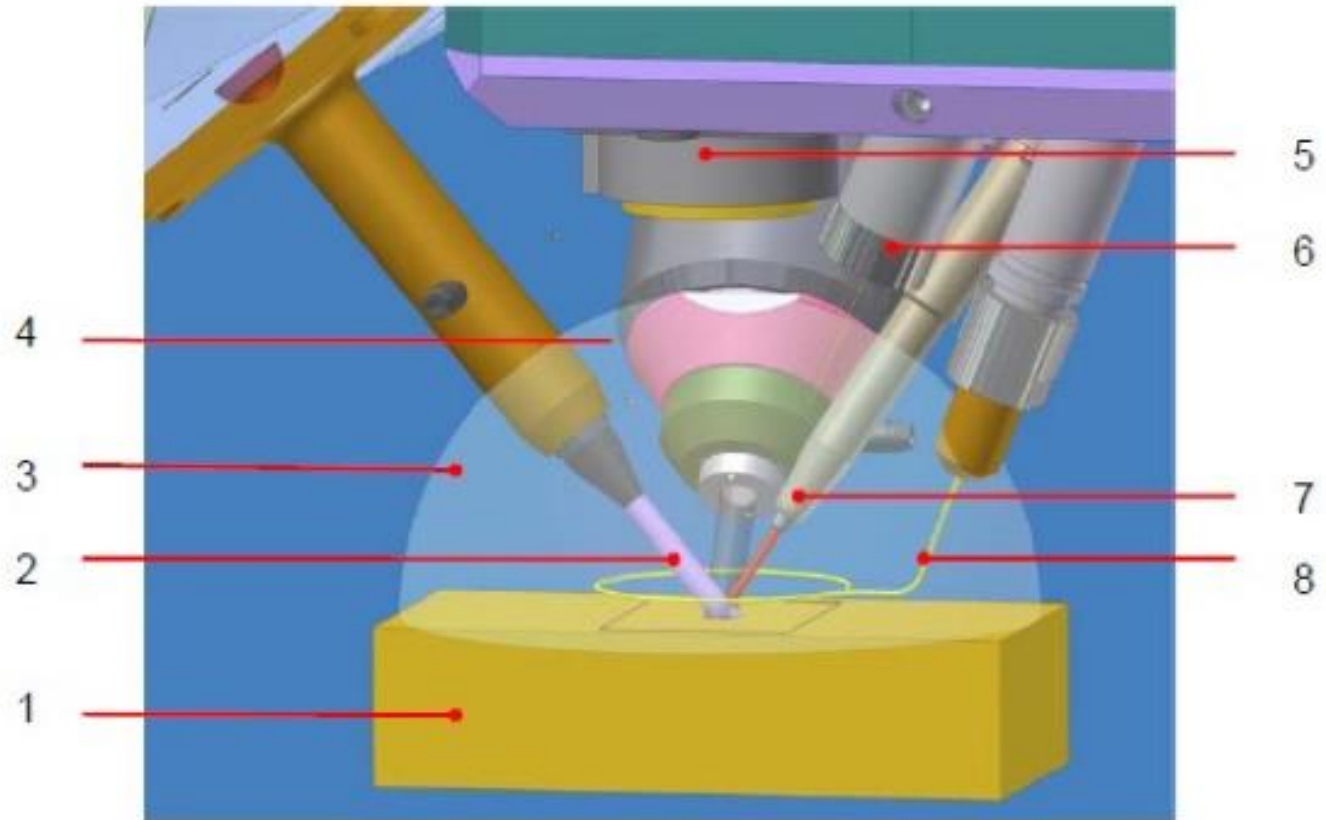
Antichità al XIX secolo

Tardo Medioevo a oggi

La strumentazione: Bruker Artax200



Artax



- 1 Sample
- 2 X-ray excitation beam
- 3 X Ray fluorescence and scattered rad.
- 4 Radiation registered by detector

- 5 CCD camera
- 6 Sample lighting
- 7 Laser pointer for positioning
- 8 Collision sensor

Una recente applicazione:



Carlo Bononi, *Incoronazione della Vergine*, 1617, olio su tela, Ø 2.8 m, Ferrara, Santa Maria in Vado

L'opera prima del
recente restauro
(Maggio, 2017)



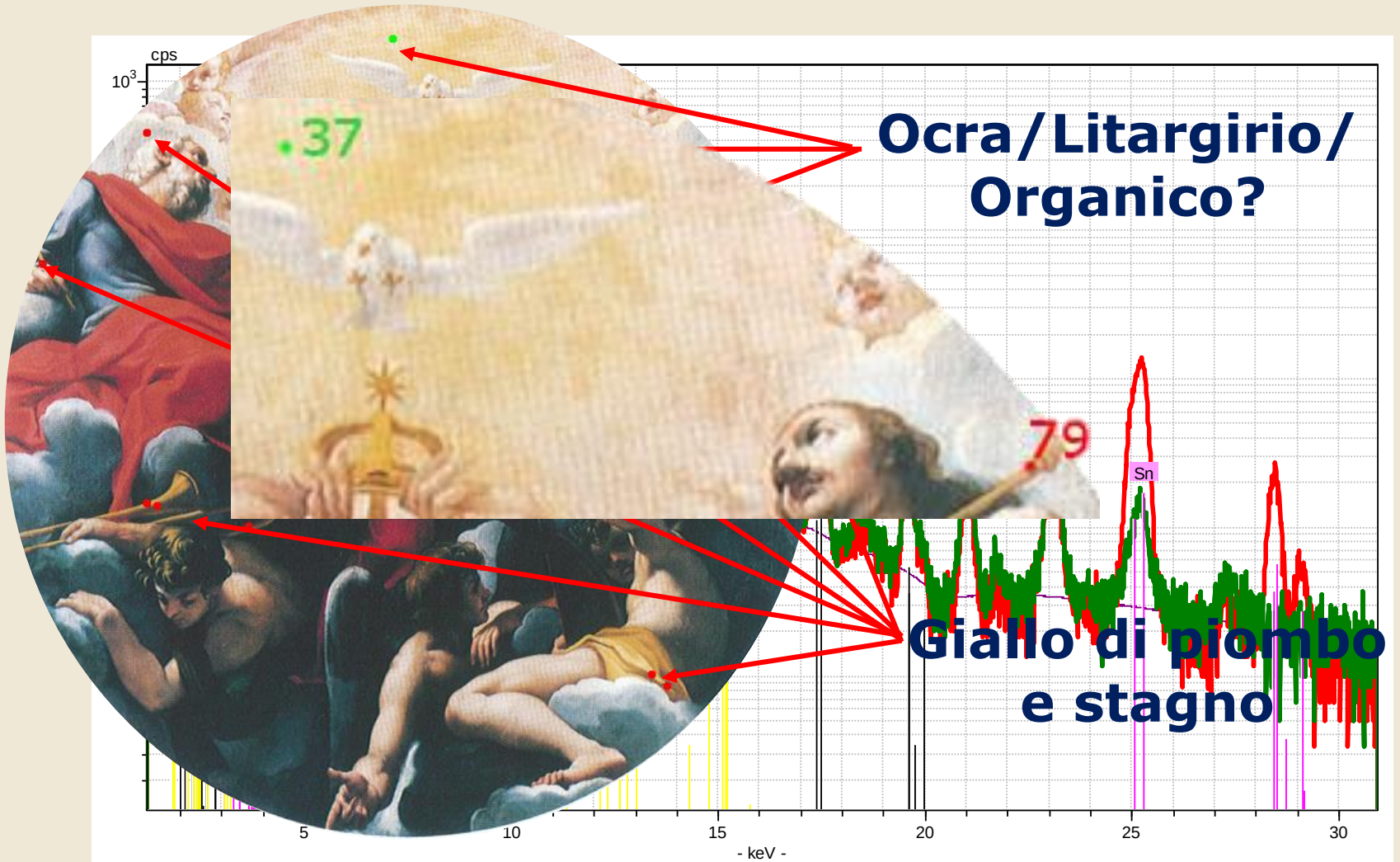
Degrado dovuto ai topi che hanno
mangiato la colla della seconda
tela e agli escrementi dei piccioni.

L'analisi XRF a Santa Maria in Vado



Luglio 2017

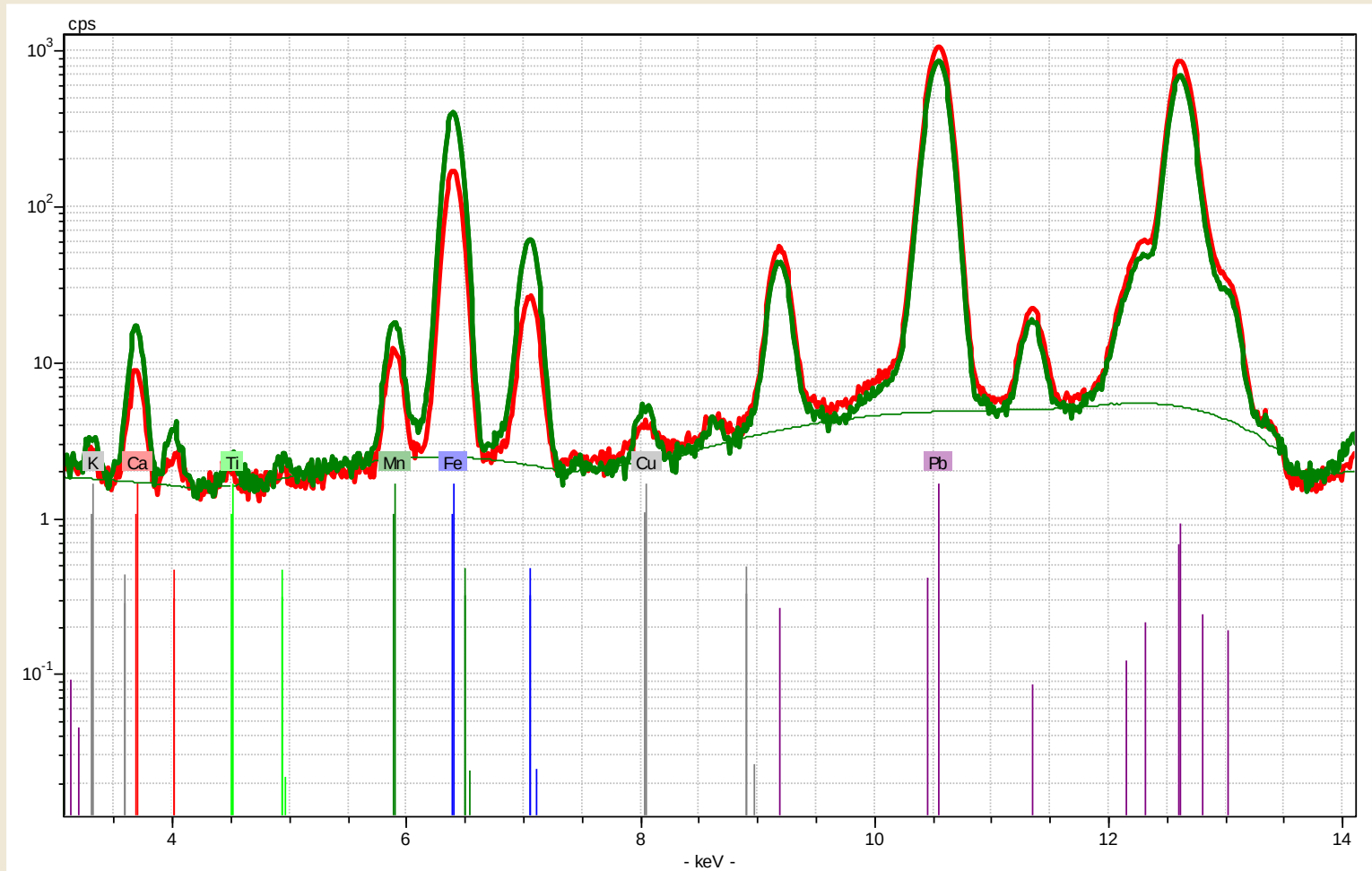
Gialli



37- background yellow

79 - yellow Chirst pastoral staff

Le Terre d'ombra



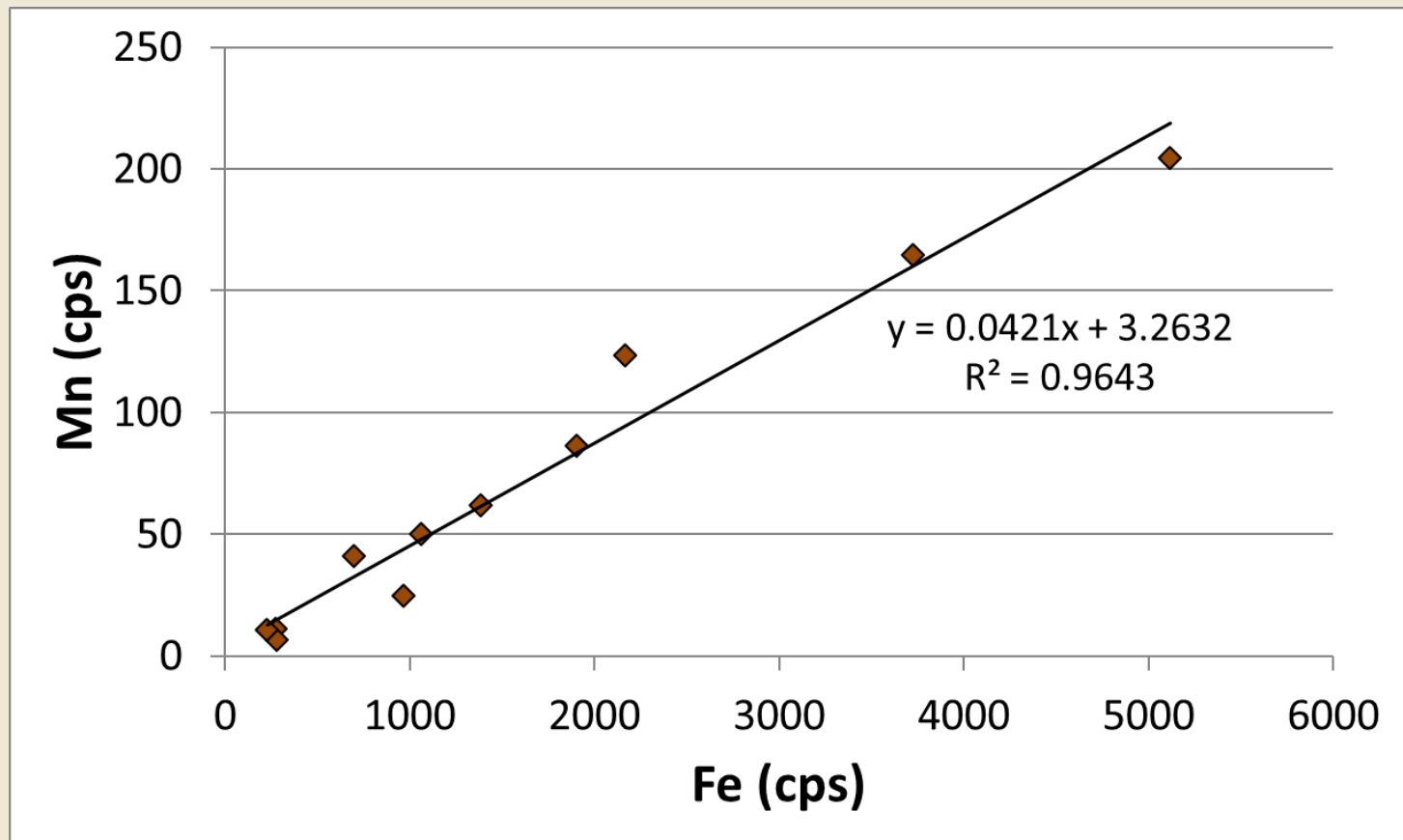
20 - dark brown lute

44 - brown angel's hair

Le Terre d'ombra

Il manganese si ritrova spesso nella composizione delle Terre, che sono composte da vari minerali ricchi in ferro.

La sua correlazione con il ferro, però, è verificata solo quando i due elementi si trovano nella stessa terra: la Terra d'ombra.



La tavolozza dell'artista

Colore	Pigmento	Formula
Preparazione	gesso biacca	CaSO_4 $(\text{PbCO}_3)_2 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$
Bianchi	biacca pigm. blu/verde	$(\text{PbCO}_3)_2 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$ Pigmento a base di Cu
Rossi	cinabro + terra d'ombra	HgS $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}_2 + n\text{H}_2\text{O} + \text{Si} + \text{Al}_2\text{O}_3$
Incarnati	biacca terre	$(\text{PbCO}_3)_2 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$ minerali a base di ossidi e idrossidi di Fe e Si
Verdi e Blu	pigm. a base di Cu	non identificabile, data la grande varietà disponibile anche nel '600
Gialli	giallorino	Pb_2SnO_4
Bruni	terra d'ombra	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}_2 + n\text{H}_2\text{O} + \text{Si} + \text{Al}_2\text{O}_3$

In tabella sono riportati solo i pigmenti identificati con certezza.

Conclusioni

PALAZZO/
DEI/DIAMAN
ARTE/A/
FERRARA/

FERRARA
ARTE



CONSORZIO FUTURO IN P

CIC



ità)

Carlo Bononi



**Grazie per
l'attenzione**

Bibliografia

Poldi G., Villa G. C. F., *Dalla conservazione alla storia dell'arte. Riflettografia e analisi non invasive per lo studio dei dipinti*, Scuola Normale Superiore, Pisa, 2006

Gilardoni A., Ascani Orsini R., Taccani S., *X-rays in art*, GILARDONI S.p.A., Lecco, 1977

<https://www.archeomatica.it/>

<http://chnet.infn.it/>

<http://www.associazioneaiar.com/>