

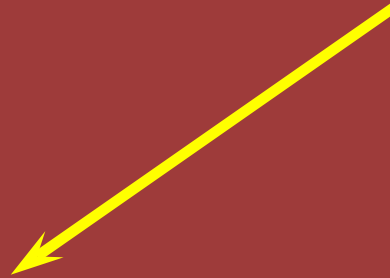


## Diagnostiche Ottiche in Arte

RAFFAELLA FONTANA

*LIGHT ON OPTICS AND OPTOMETRY*  
*Venerdì 01 aprile 2022 ore 15.00*

# Il miracolo della visione



# Cambiando la sorgente ...



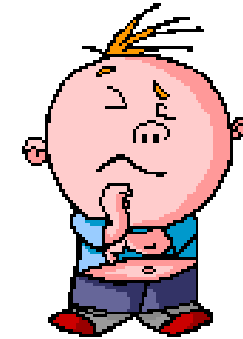
Botticelli, Sant'Agostino nello studio (affresco, 1480,  
chiesa di Ognissanti, Firenze)



# Cosa succede ...



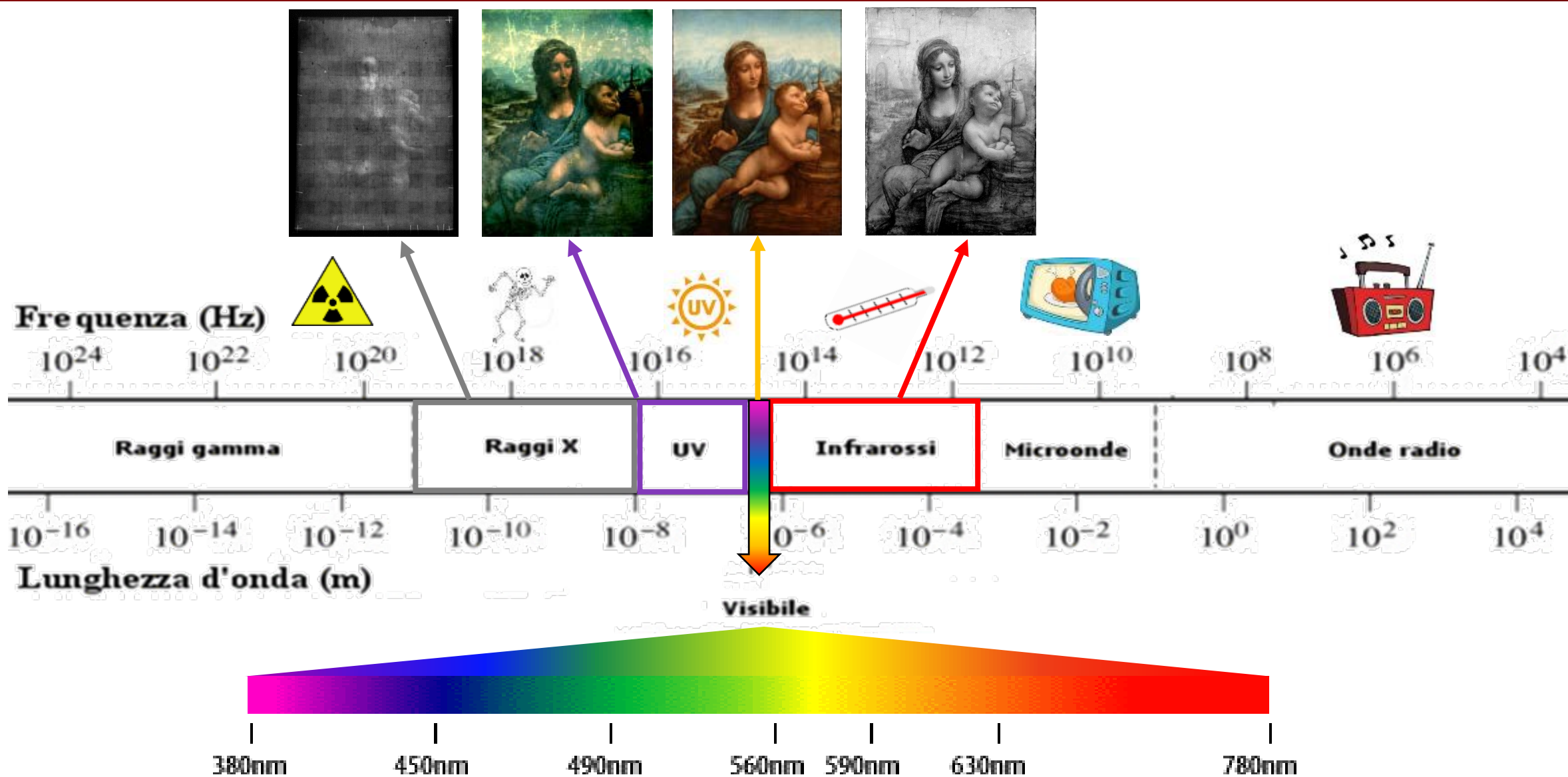
... se si cambia anche il rivelatore?



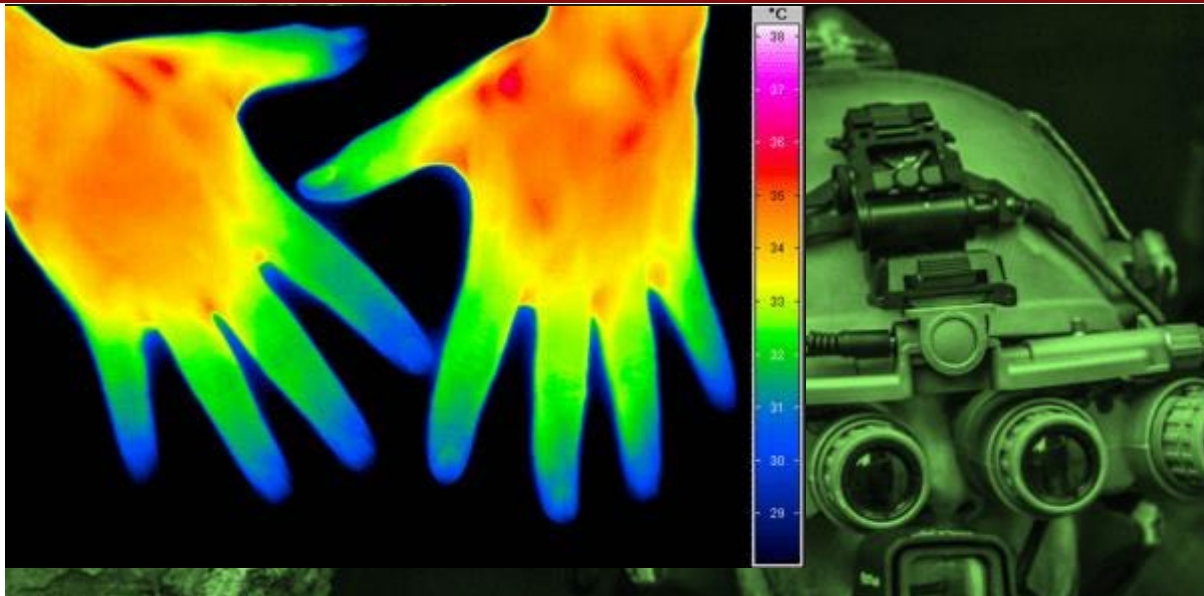
# Oltre il visibile: cambiando sorgente e rivelatore



# Lo spettro elettromagnetico

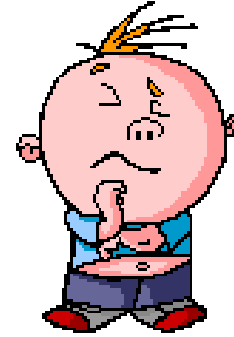


# Radiazione infrarossa





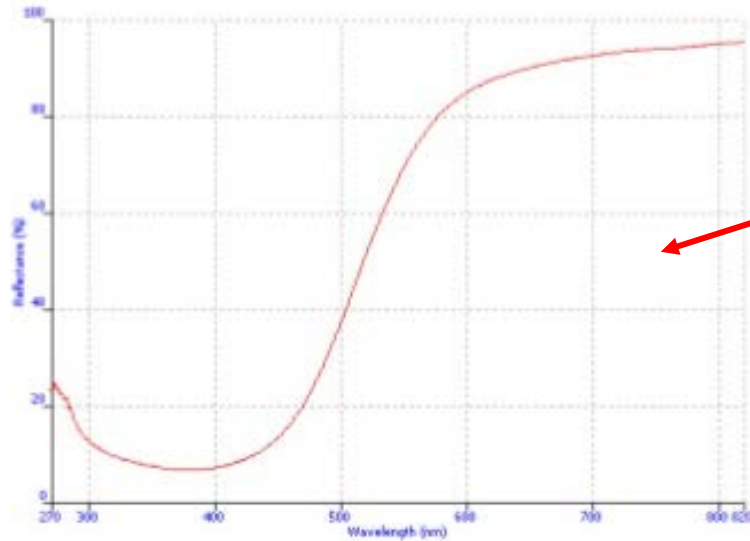
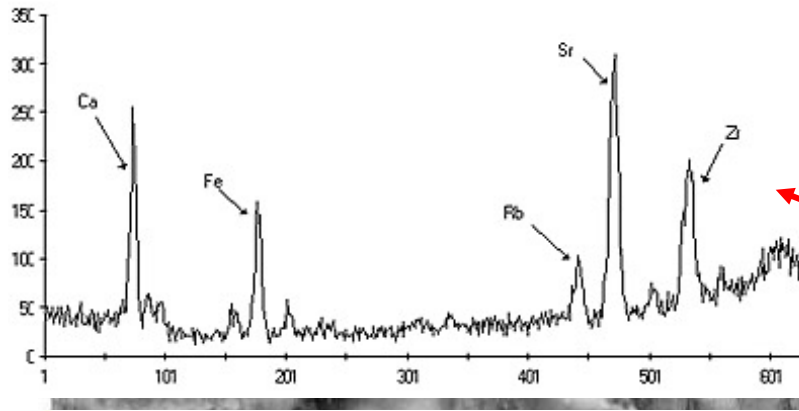
## ... la riflettografia IR?



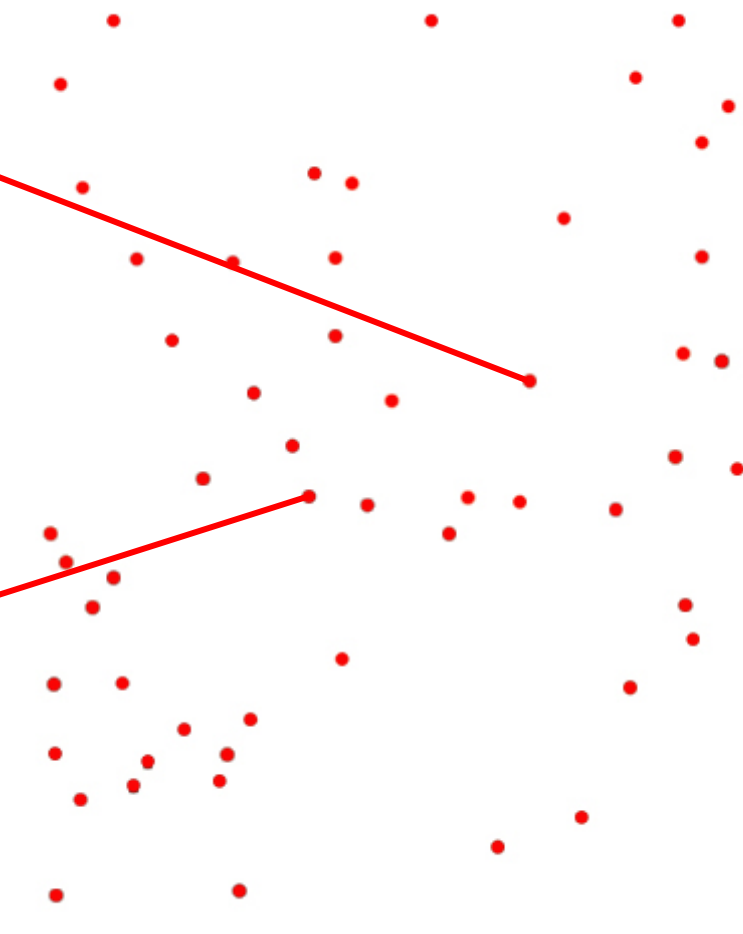
- È una tecnica di analisi ad *immagine* che impiega radiazione nella banda spettrale del vicino infrarosso (NIR, Near InfraRed).
- Se applicata all'analisi di dipinti, può rivelare particolari nascosti dallo strato pittorico, come ad esempio il disegno preparatorio.



# Analisi puntuale vs analisi ad immagine



Ad immagine



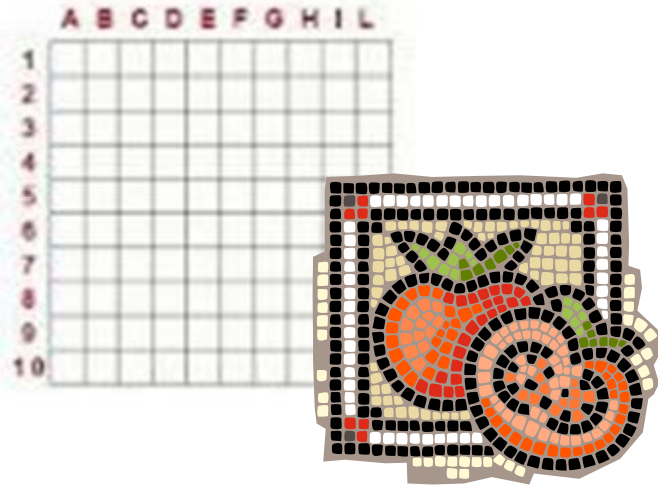
Puntuale

# La qualità di un'immagine ...

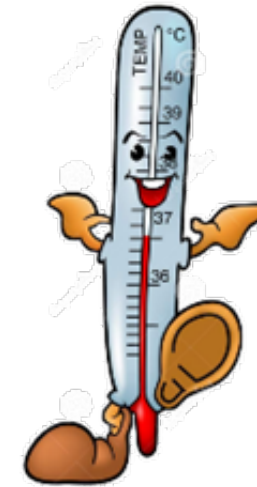
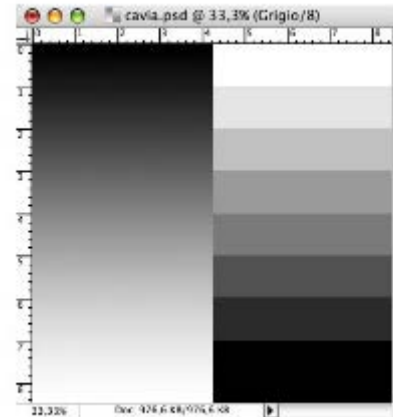


... è definita dalla **risoluzione**.

*Risoluzione spaziale:  
pixel/unità di lunghezza*



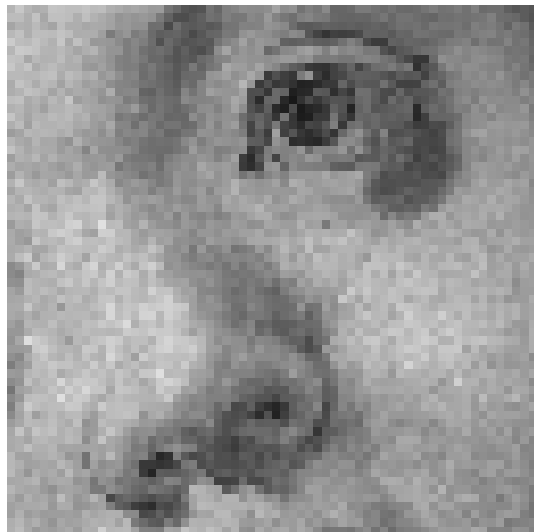
*Risoluzione d'intensità (cromatica):  
livelli di grigio*



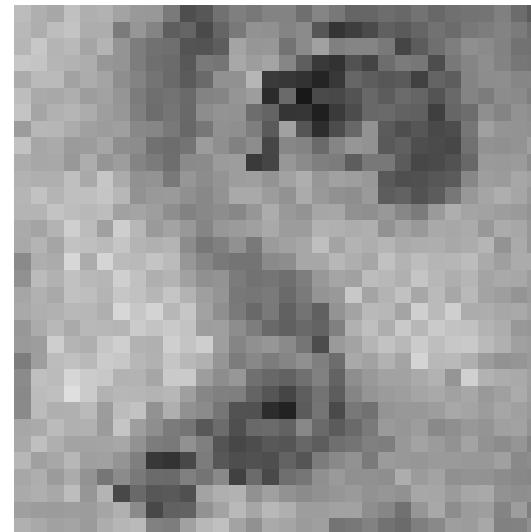
# Risoluzione spaziale



256 x 256



64 x 64



32 x 32



La stessa immagine campionata con diverse risoluzioni spaziali.



# Risoluzione d'intensità ...

... determina quanti livelli di grigio deve avere l'immagine, attraverso un valore chiamato *bit*. Il numero di livelli corrisponde a 2 elevato alla bit:

1 bit ( $2^1 = 2$  livelli, bianco e nero)

8 bit ( $2^8 = 256$  livelli, immagini a toni, 0-255)

12 bit ( $2^{12} = 4096$  livelli, immagini per usi speciali, 0-4095)

...



256 livelli



16 livelli



2 livelli

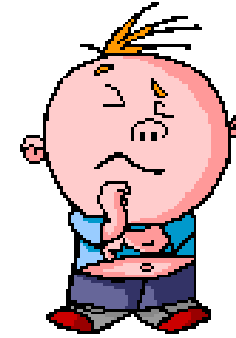
La stessa immagine digitalizzata con diverse risoluzioni d'intensità.



# Come interagisce la radiazione IR ...

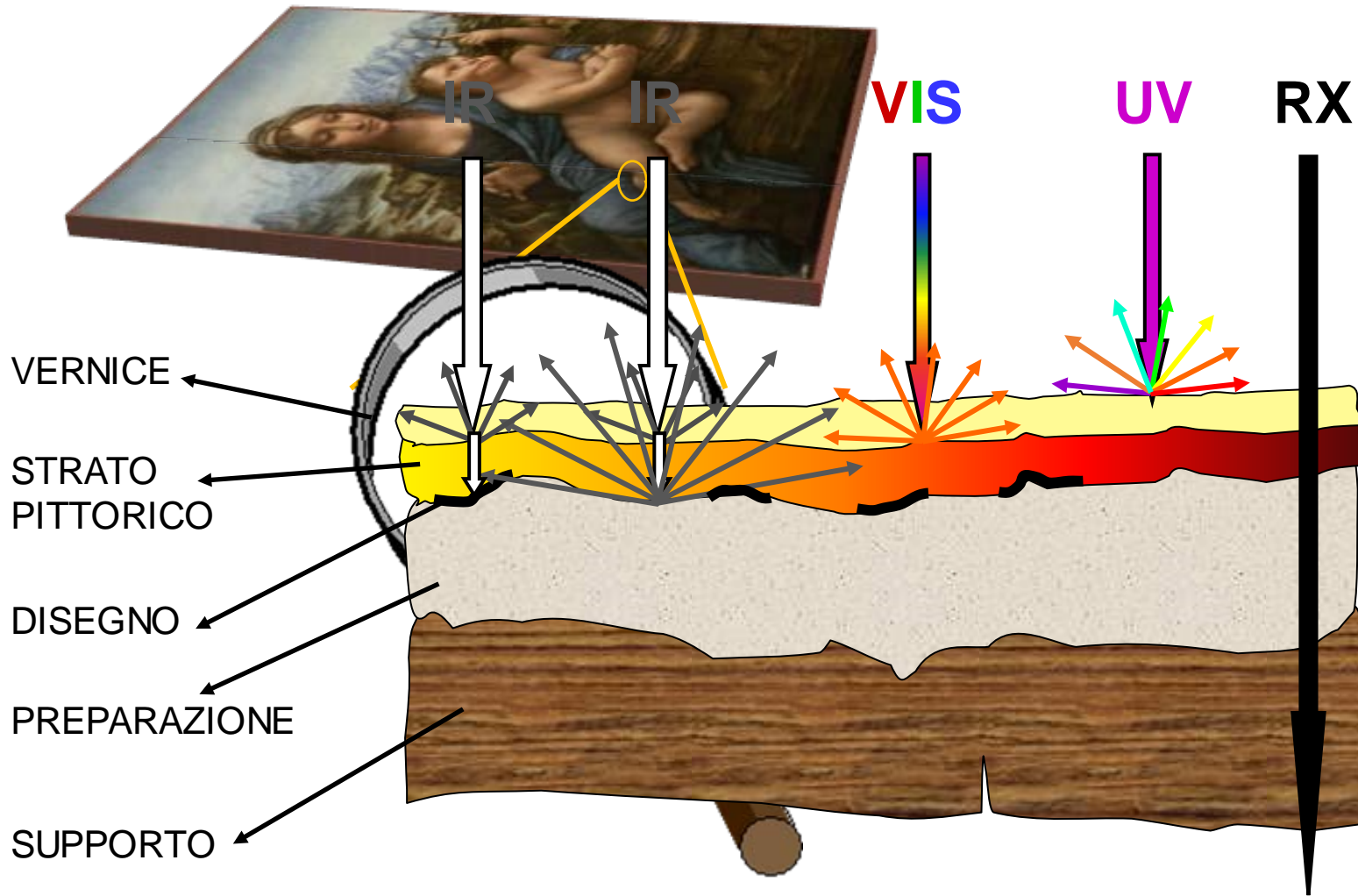


... con un dipinto?



- Un dipinto può essere schematizzato come un sistema multistrato.
- L'interazione della radiazione IR con il dipinto varia al variare delle caratteristiche degli strati (oltre che dalla lunghezza d'onda della radiazione utilizzata).

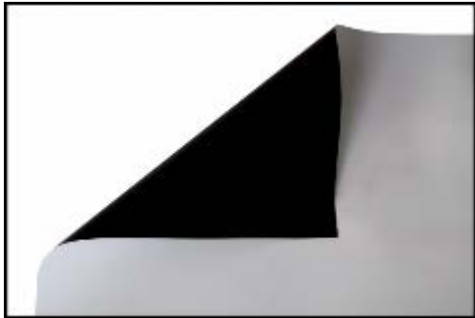
# Interazione dipinto - radiazione elettromagnetica



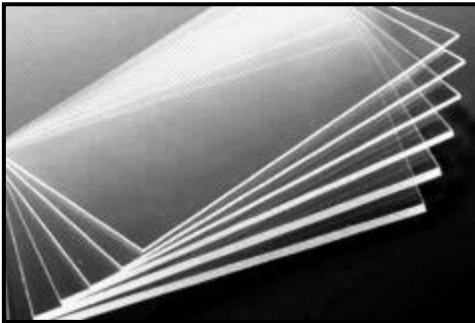
# Visibilità del disegno



La visibilità del disegno sottostante è funzione di due parametri:



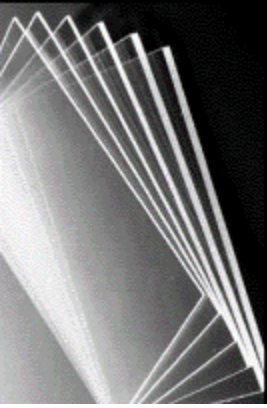
- il **contrasto** del disegno (dipende dal materiale usato per tracciare il disegno e dalla riflettività dello strato preparatorio);



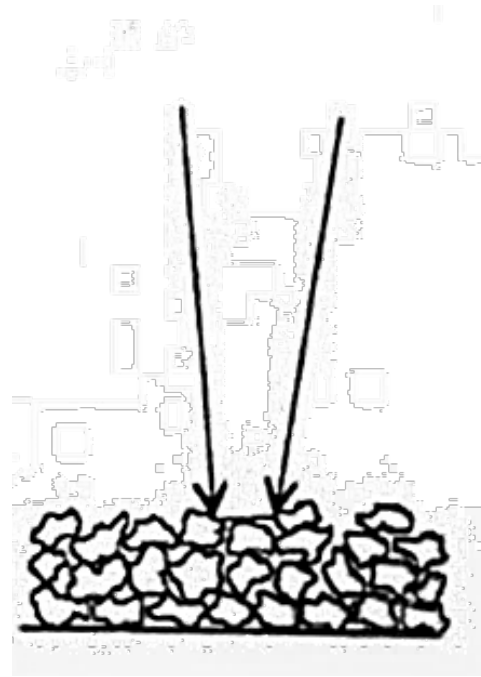
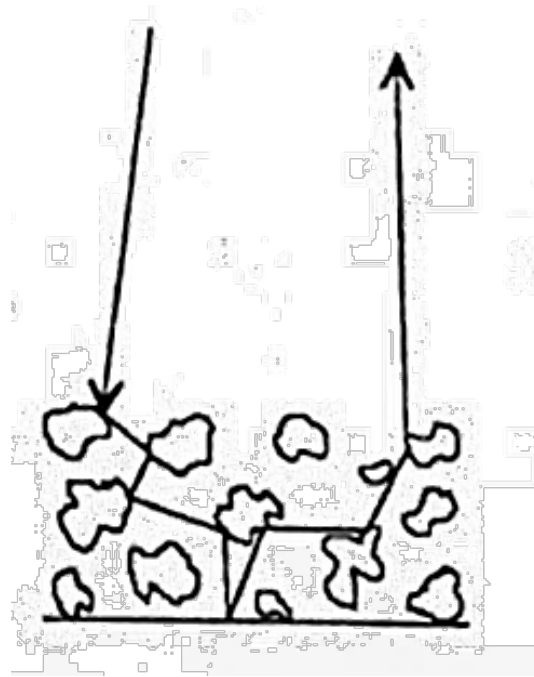
- la **trasparenza** degli strati di pittura (dipende dalla loro composizione, dal loro spessore e dal tipo di radiazione usata per la misura).

*Solitamente, questi due parametri non sono prevedibili, a causa della composizione dei materiali usati dall'artista.*

# Underdrawing visibility – *transparency*



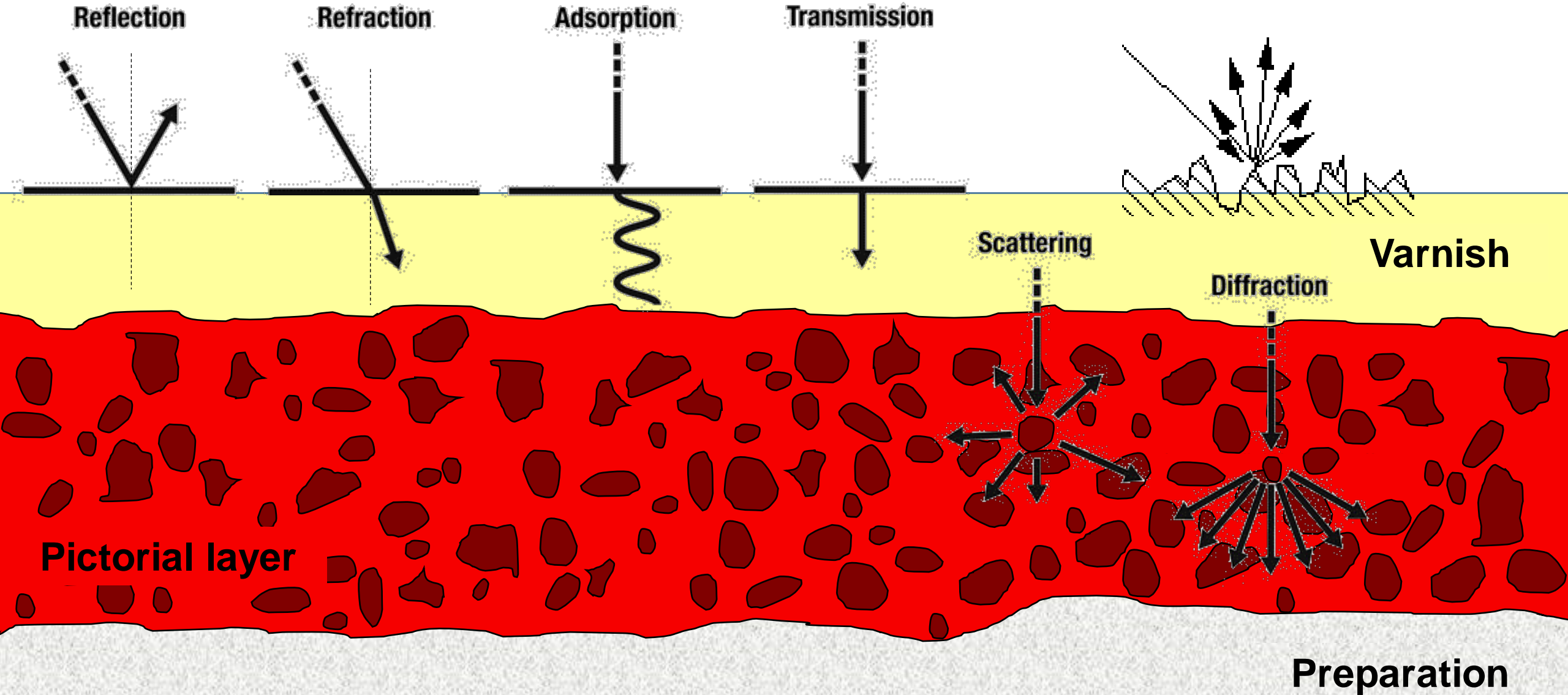
La trasparenza degli strati di pittura alla radiazione IR dipende dalla composizione, dallo spessore nonché dalla lunghezza d'onda della radiazione utilizzata per la misura.



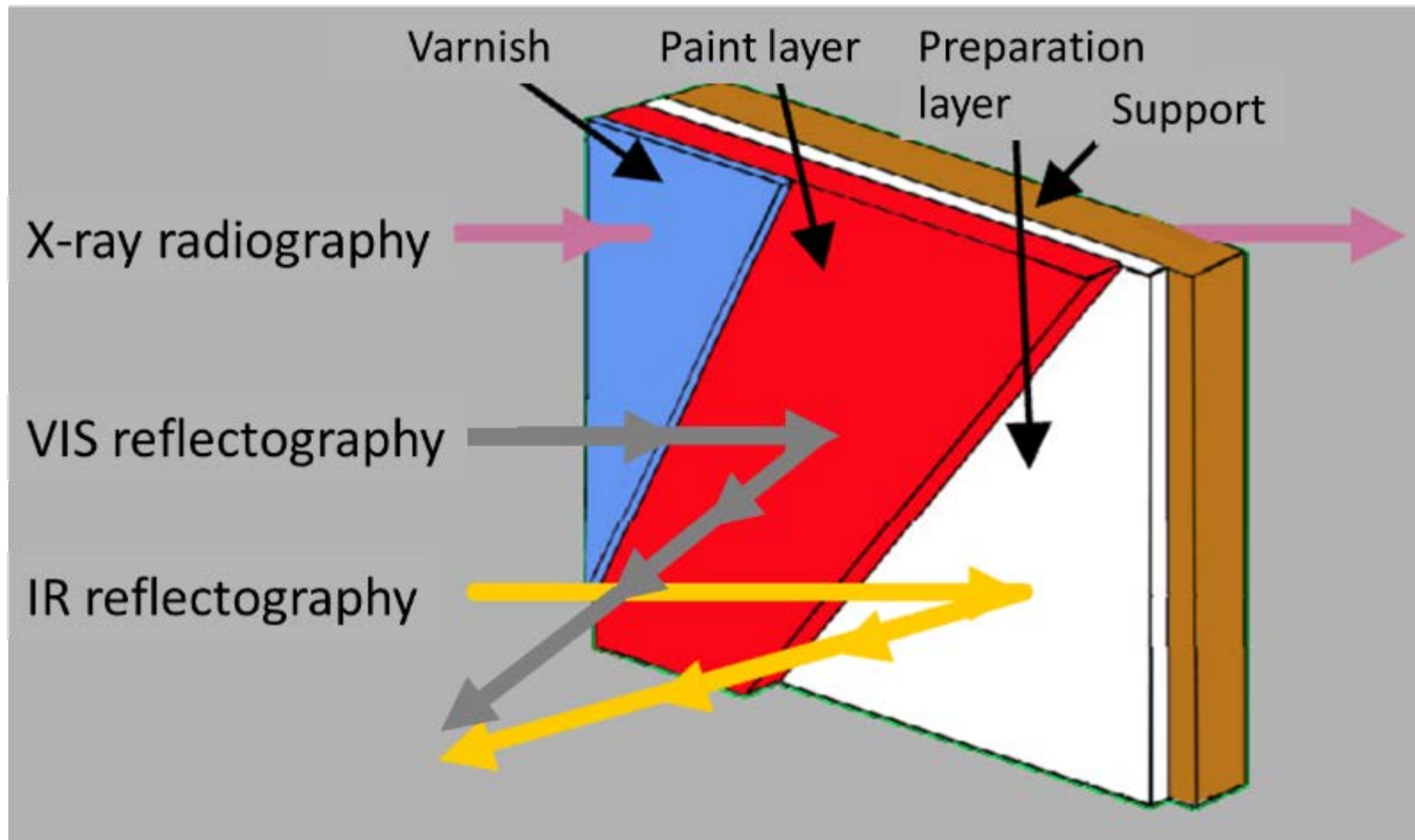
- Nella maggior parte dei casi, più è macinato il pigmento, maggiore è l'opacità.
- La trasparenza dipende anche dalle caratteristiche ottiche del legante e del pigmento.



# Schematic of interaction



# Misure in trasmissione o riflessione





# A little history



Anni **30**: fotografia IR applicata per la prima volta all'analisi di dipinti alla National Gallery of London e al Fogg Art Museum.



Dagli anni **50** la fotografia IR diventa una tecnica di routine (per lo studio di dipinti fiamminghi del XV secolo). In Italia l'uso della fotografia IR è limitato al settore del restauro per evidenziare ridipinture e regioni restaurate.

# A little history



Il primo riflettogramma realizzato con una telecamera a Vidicon PbS fu introdotto negli anni **60s** dal fisico olandese Van Asperen de Boer, che pose le basi teoriche e sperimentali di questa tecnica.



E' circa nel **1980** che si consolida l'uso dei dispositivi a stato solido (CCD).

# A little history



Videocamere particolari e costose, basate su array di sensori InGaAs o PtSi, fanno la loro comparsa sul mercato negli anni 90: esse migliorano notevolmente la visibilità del disegno preparatorio essendo sensibili rispettivamente fino a  $1.7\mu\text{m}$  or  $5\mu\text{m}$ .



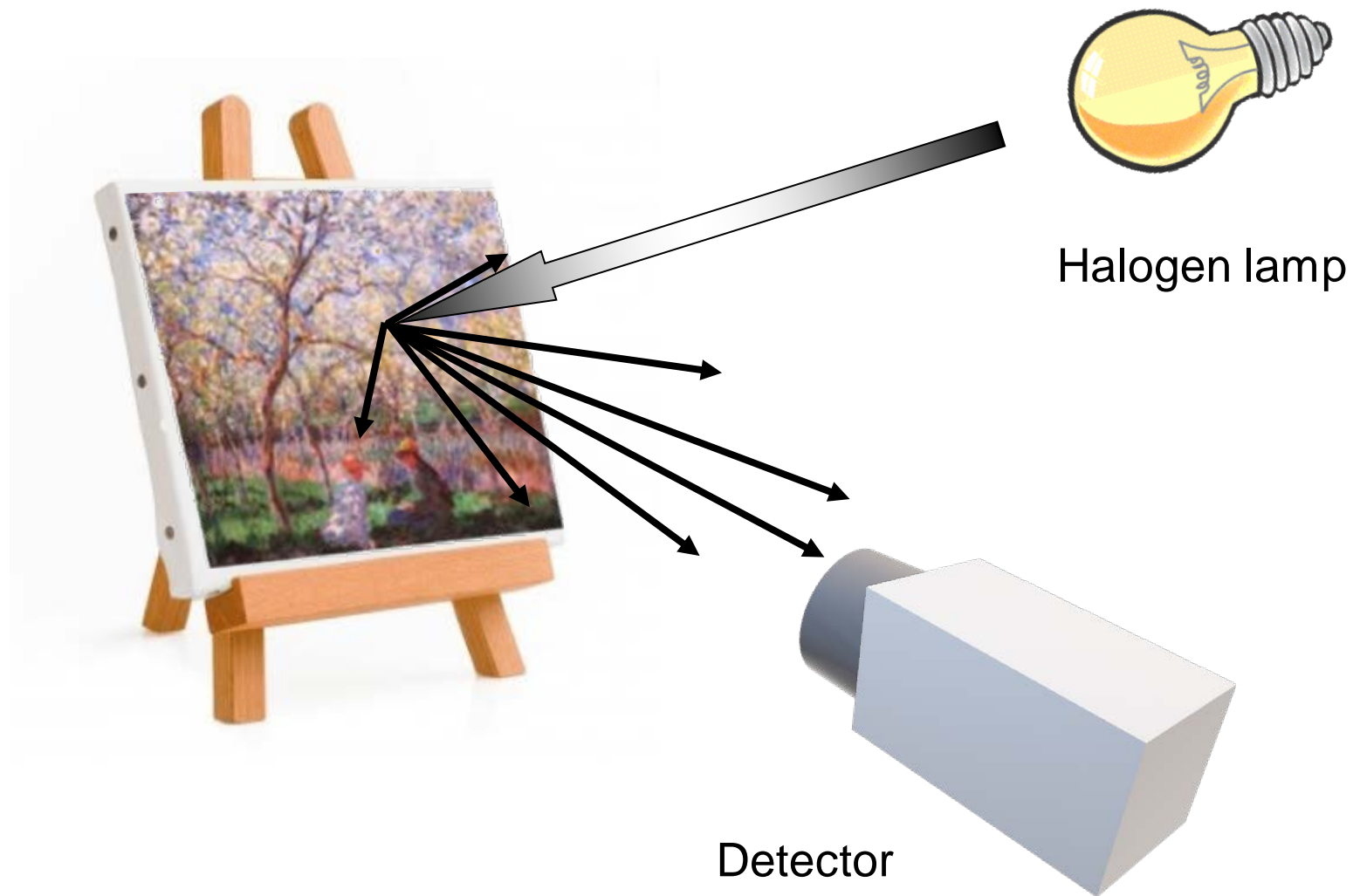
Sempre negli anni 90 viene sviluppato all'INO il primo dispositivo a scansione basato su singolo sensore.

# Setup di misura



3 elementi:

- sorgente
- oggetto (opera d'arte)
- rivelatore



# Dispositivi per riflettografia IR: rivelatori







- I sensori più utilizzati sono:
  - Tubi vidicon (PbS)    ⇨    telecamera
  - CCD al silicio        ⇨    telecamera
- Altri sensori (poco usati) sono:
  - pellicola IR            ⇨    macchina fotografica
  - CCD PtSi, InGaAs    ⇨    telecamera
  - visori IR (!)

# Instruments for «traditional» reflectography








## Si CCD

-  Spectral sensitivity: up to 1  $\mu\text{m}$
-  Spatial resolution: very good
-  Intensity resolution: very good
-  Geometric distortion, uniform illumination, chromatic aberration



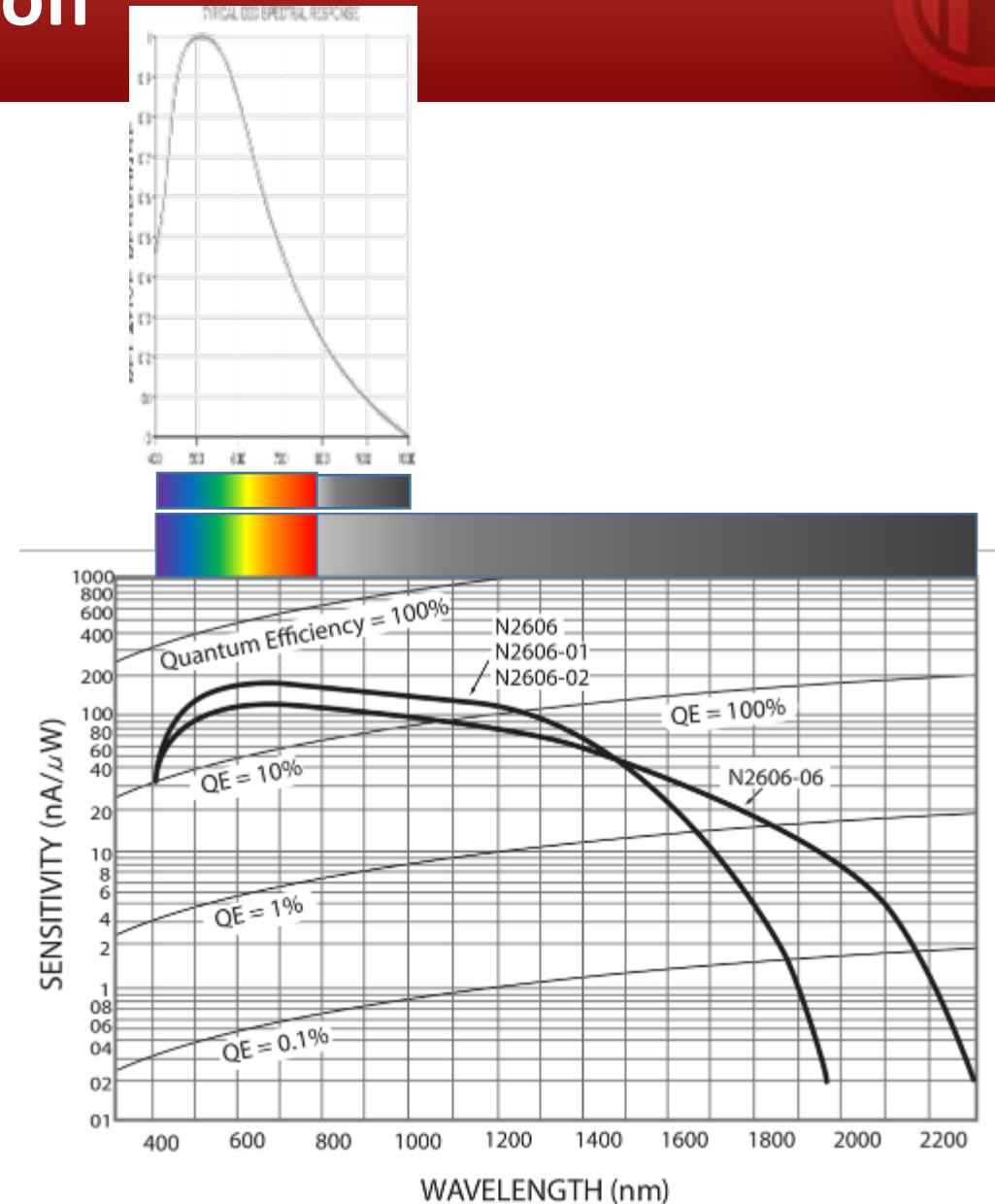
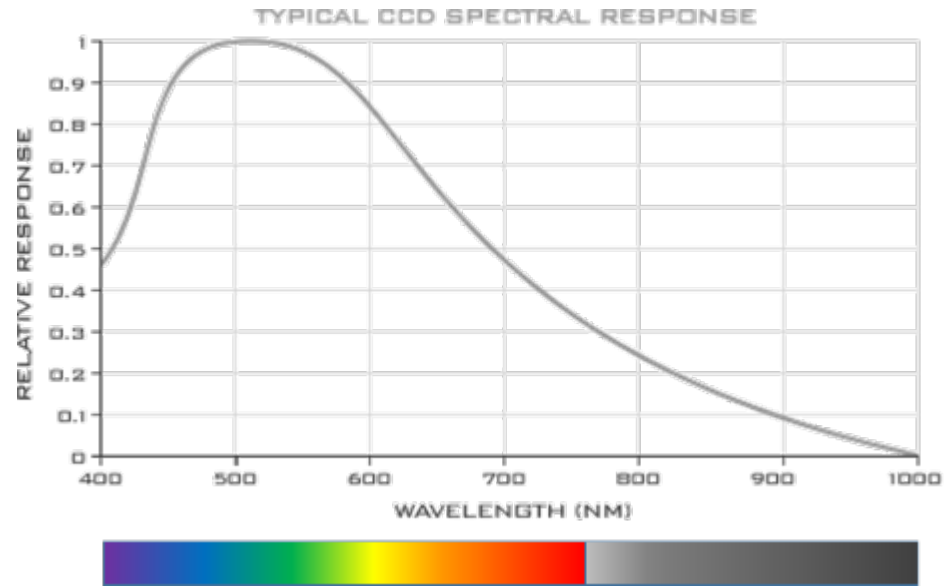
## PbS VIDICON

-  Spectral sensitivity: up to 2  $\mu\text{m}$
-  Spatial resolution: poor
-  Intensity resolution: poor
-  Non-uniform detector response
-  Geometric distortion, uniform illumination, chromatic aberration





# Spectral response of a Si CCD & a vidicon



SPECTRAL RESPONSE for 70 Series Lead Sulfide Camera

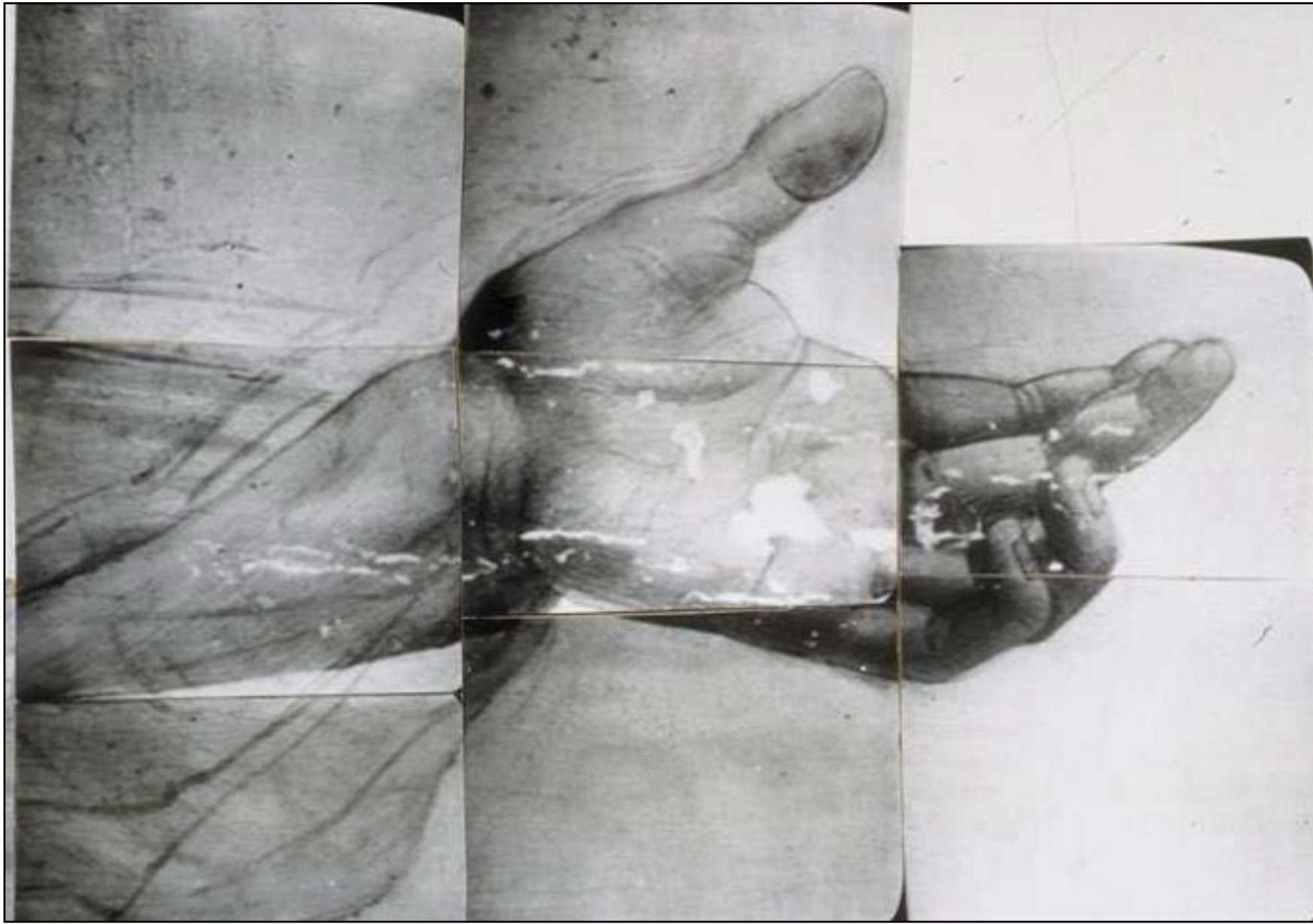
# Misura IRR col vidicon



# Riflettografia a vidicon - Esempio



# Riflettografia a vidicon - Esempio



# Riflettografia a vidicon - Esempio



A causa della scarsa qualità delle immagini a vidicon, un mosaico ha un caratteristico aspetto "piastrellato".



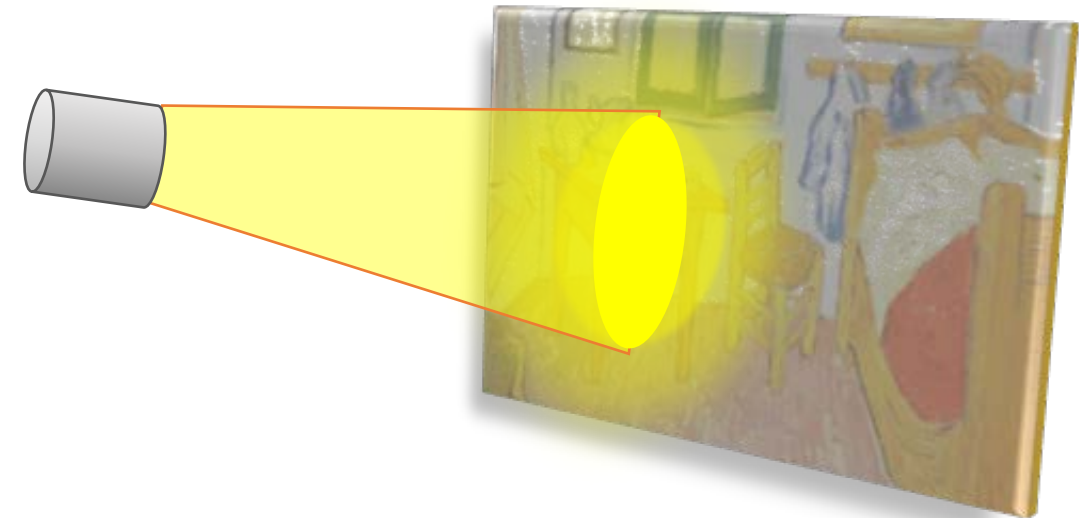
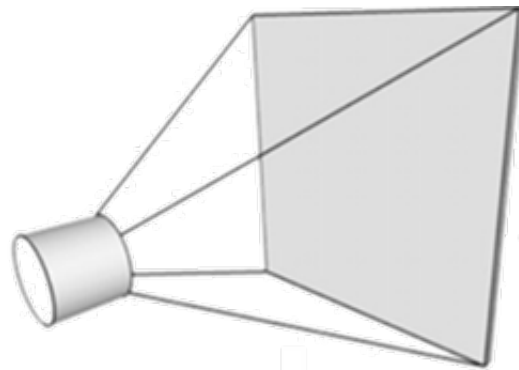
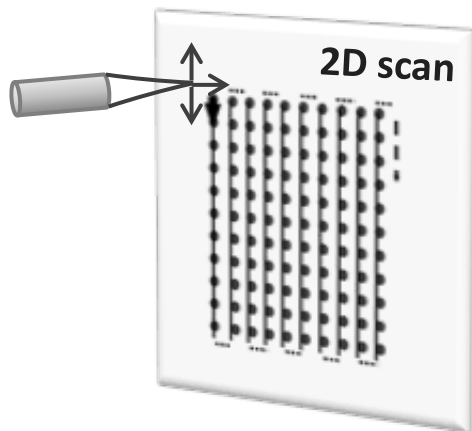
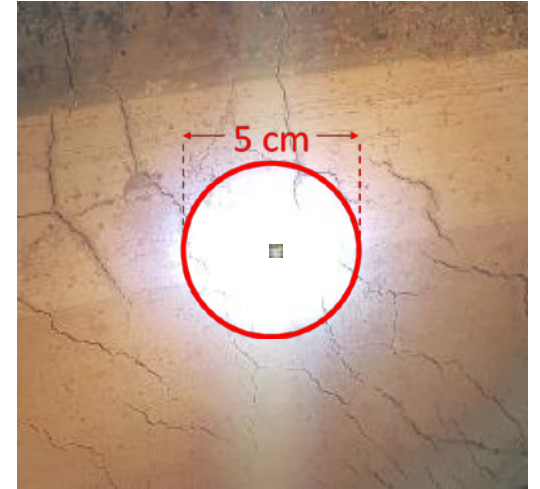
Oggi le immagini possono essere corrette al computer, ed il mosaico ha un aspetto migliore. Il tempo dell'operazione è lungo.

Immagini da: <http://www.artmuseums.harvard.edu/renaissance/>

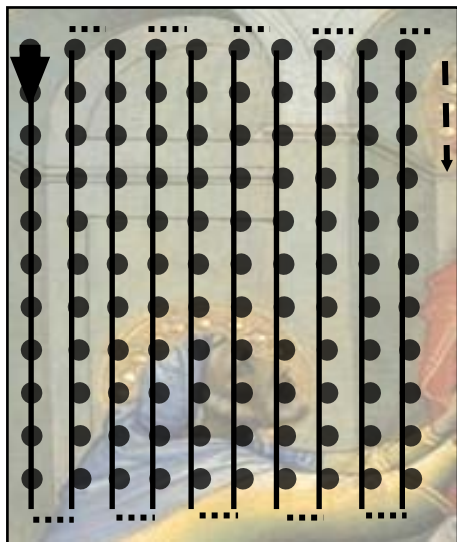
# “Filosofia” del prototipo a scansione



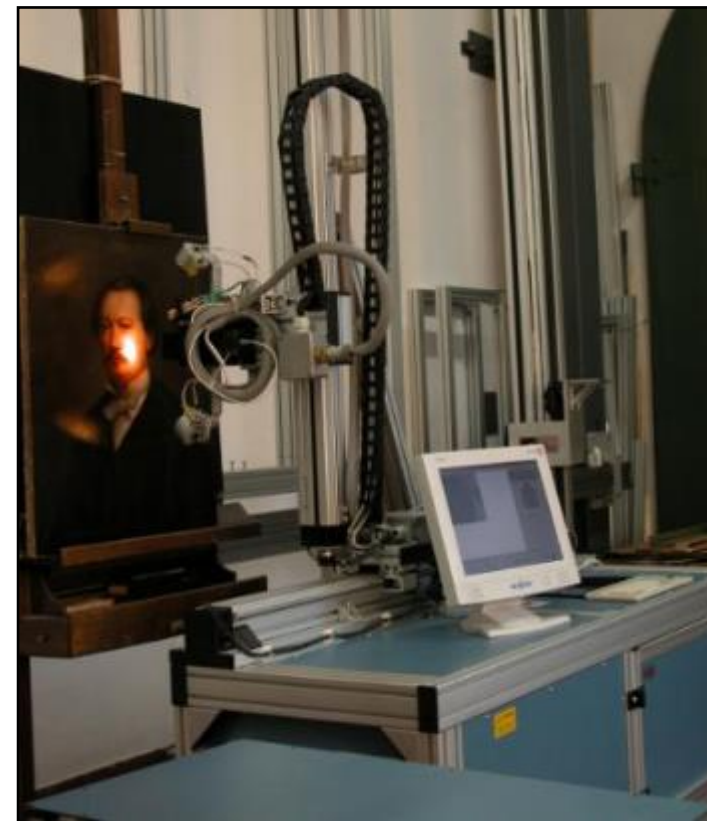
- Sensore puntuale
- Sistema di scansione
- Illuminazione che si muove con ottica rivelazione
- Ottica a specchi



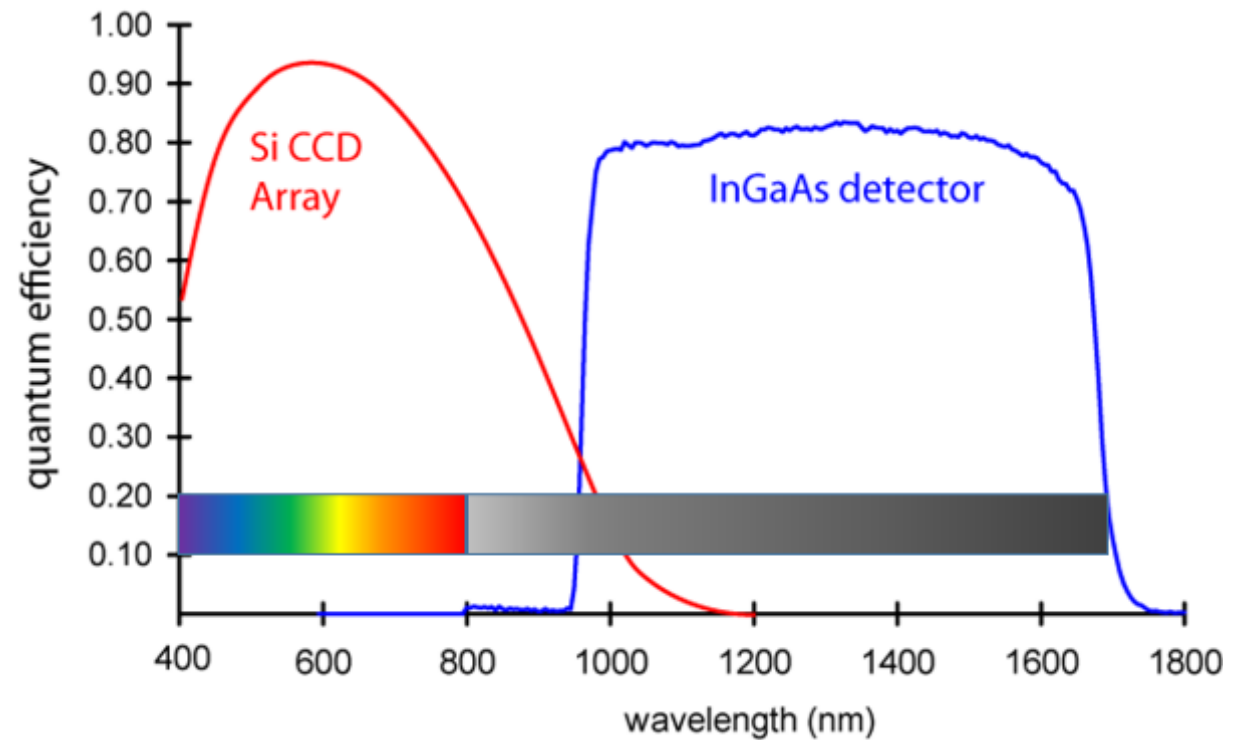
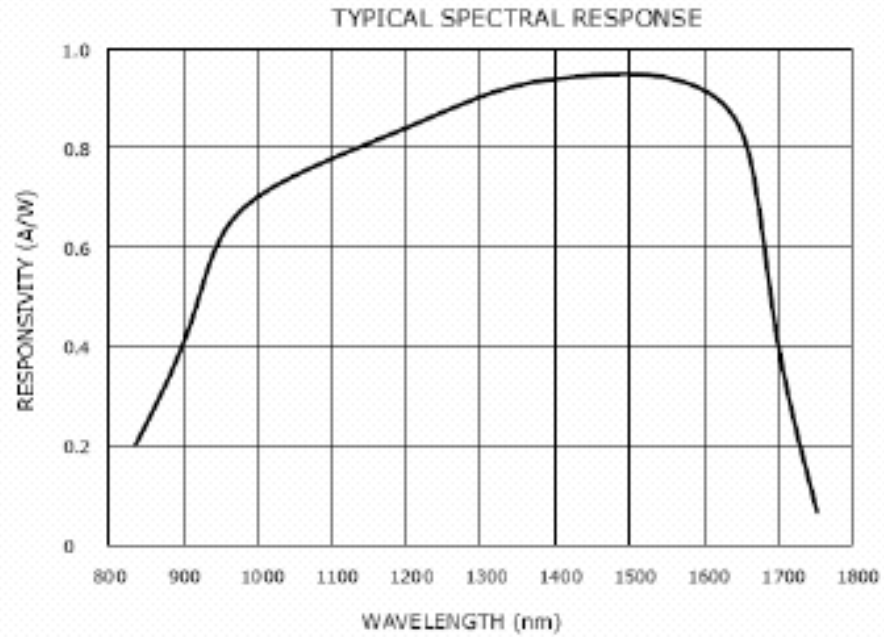
# Riflettografia a scansione



→ | ← 0.25 mm  
(101.6 dpi, 4 dpm)



# CCD camera vs InGaAs detector





# PERFORMANCE COMPARISON: vidicon vs INO scanner



Maddalena (*pittore fiammingo, XIV sec.*)

# PERFORMANCE COMPARISON: CCD vs INO scanner



CCD



wide band INO scanner



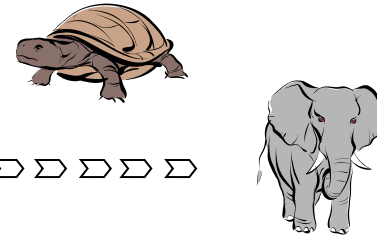
*Pontormo, Madonna con Bambino e S. Giovannino*

# Scanner vs imaging device: PROS & CONS



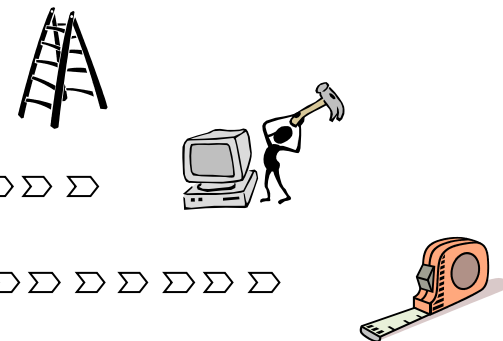
## Scanner drawbacks

- Long acquisition time >>>>>>>>>>
- Instrument size and weight >>>>>>>>>>



## Scanner benefits

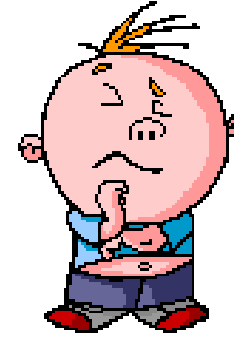
- Huge dynamics >>>>>>>>>>
- No post-processing >>>>>>>>>>
- Metrically correct data >>>>>>>>>>



# A cosa serve ...



... la riflettografia IR?

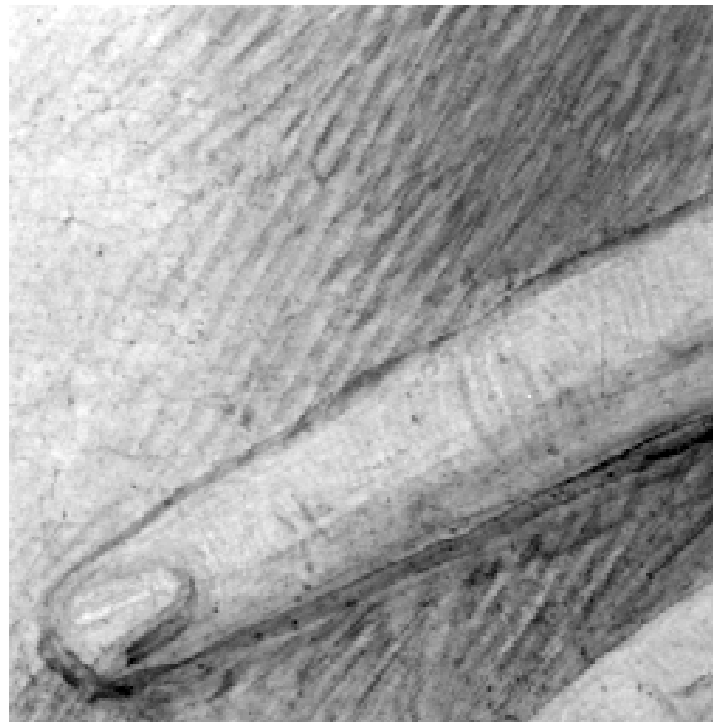


La riflettografia viene utilizzata da conservatori, restauratori e storici dell'arte per analizzare la tecnica esecutiva dell'artista, per studiare le fasi realizzative di un'opera e per valutarne lo stato di conservazione.

# Studio del disegno



*Savoldo*  
si notano le gocce  
alla fine del tratto



*Bellini*  
effetto tratteggio

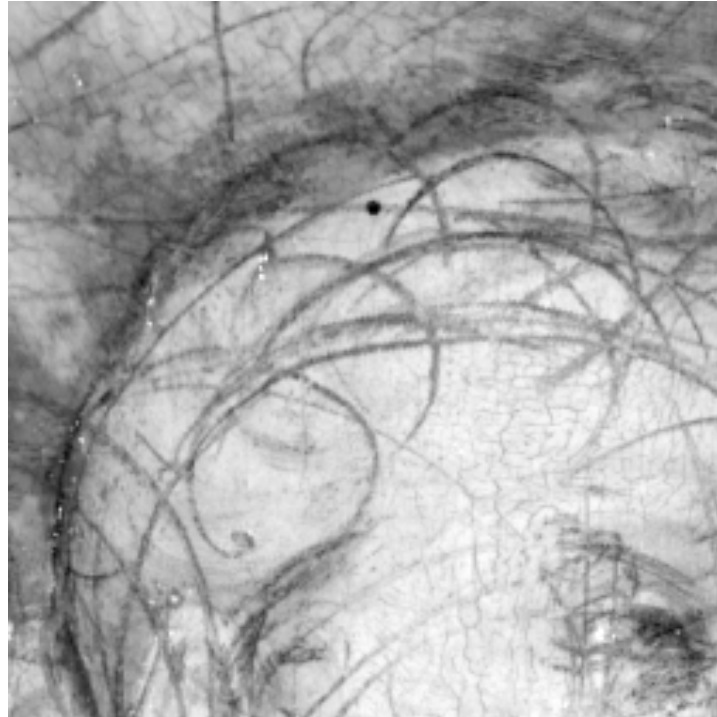


*Giotto*  
Chiaroscuro ad acquerello  
come descritto dal Cennini

# Studio del disegno



*Matteo di Giovanni*  
disegno a matita



*Fra' Bartolomeo*  
disegno a matita



*Pier Francesco Fiorentino*  
disegno a punta metallica

# Studio del disegno



*Bellini*  
carboncino



*Raffaello*  
spolvero



*Savoldo*  
spolvero

# Studio di pentimenti



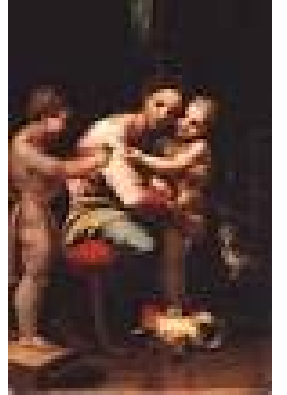
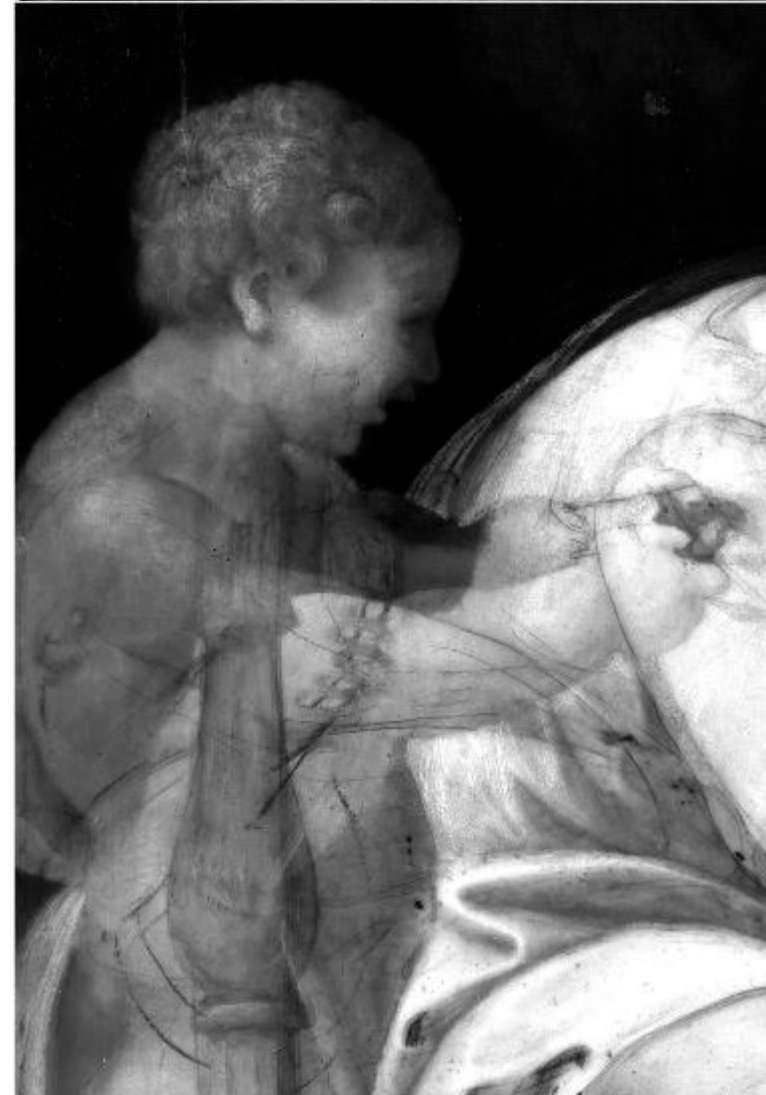
La trasfigurazione, Savoldo



# Studio dei pentimenti



Giulio Romano, *Madonna con Bambino*  
*Galleria Borghese, Roma*



# Studio dei pentimenti



La tempesta, Giorgione



# Studio del disegno preparatorio



# Attribuzione

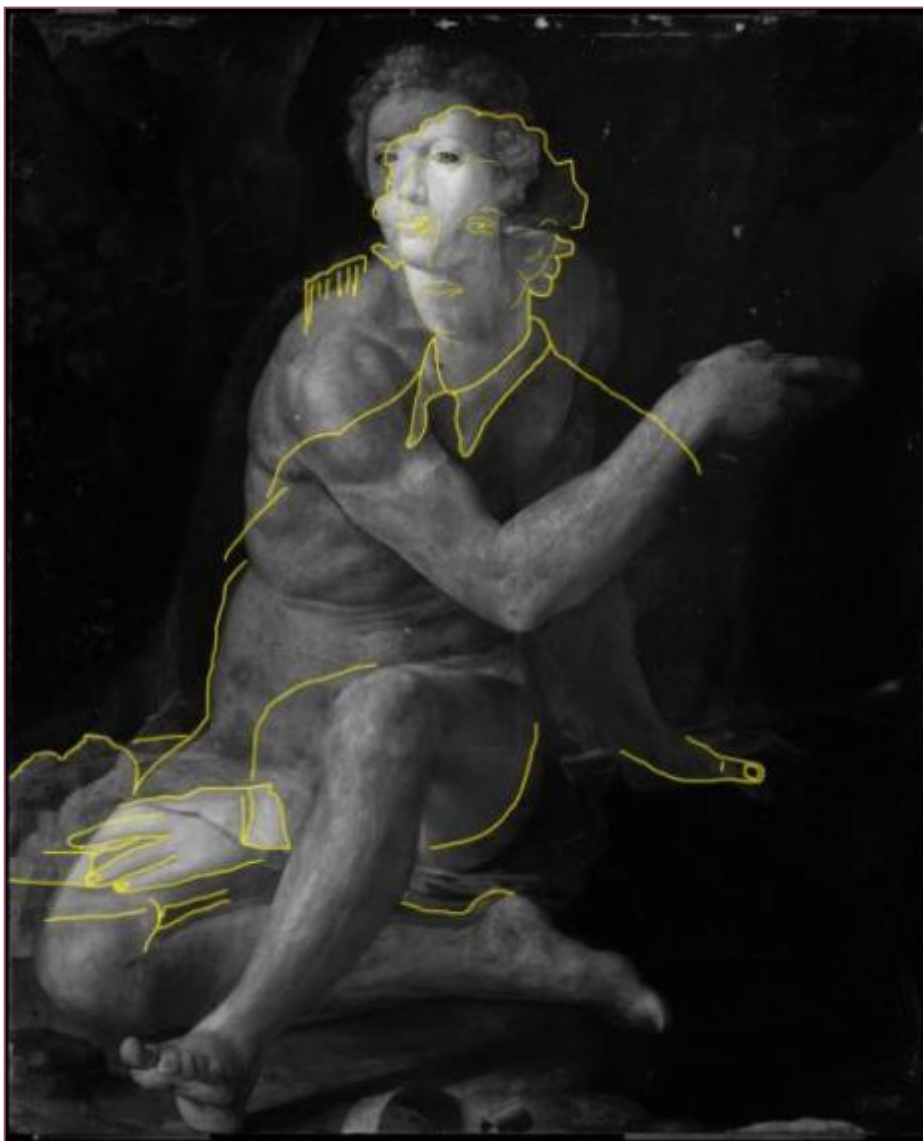


“Angioletto musicante”, Rosso Fiorentino

Galleria degli Uffizi  
Firenze



# Riutilizzo di un supporto



S. Giovanni Battista, Bronzino  
Galleria Borghese, Roma

# Riutilizzo di un supporto



Madonna con Bambino, Tiziano

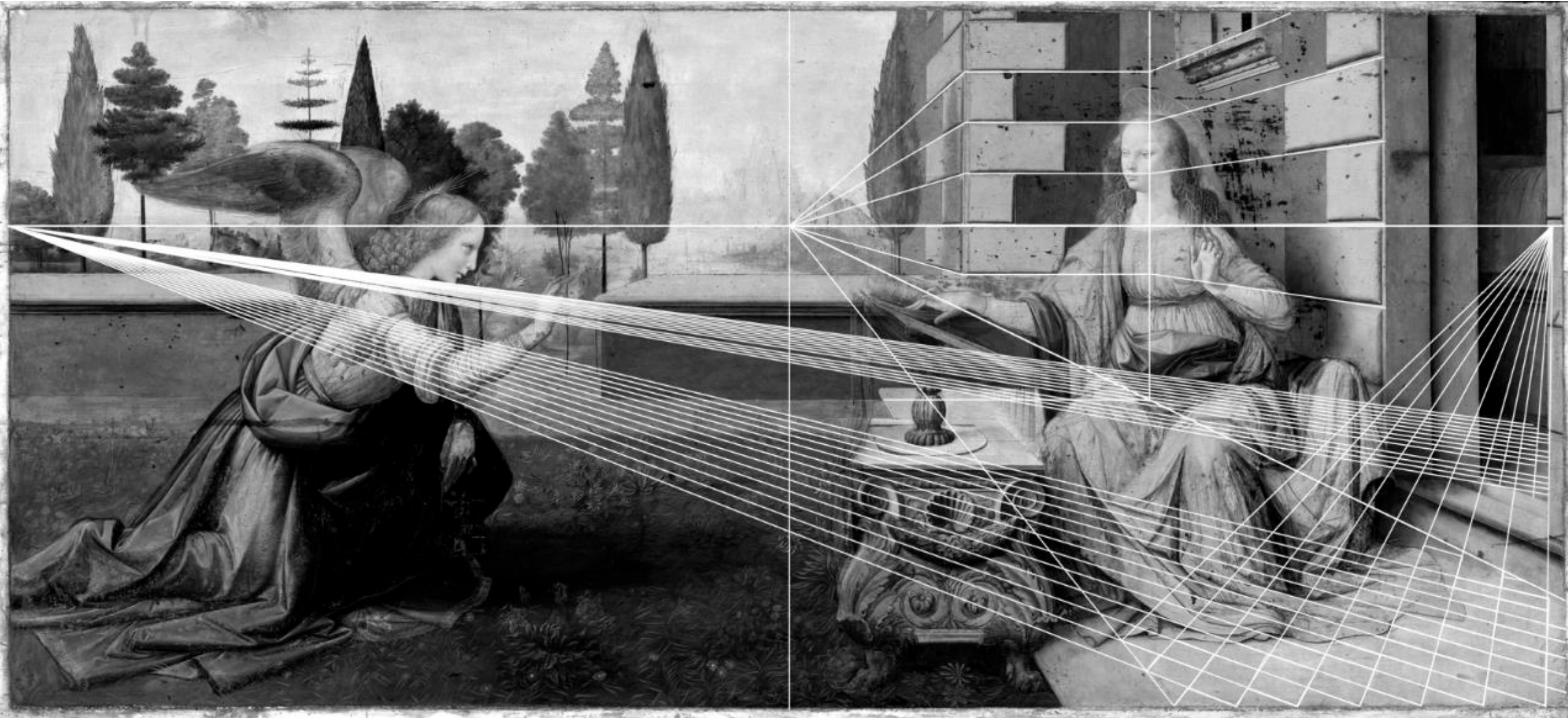
**The importance of having  
metrically correct images**

# Annunciazione di Leonardo

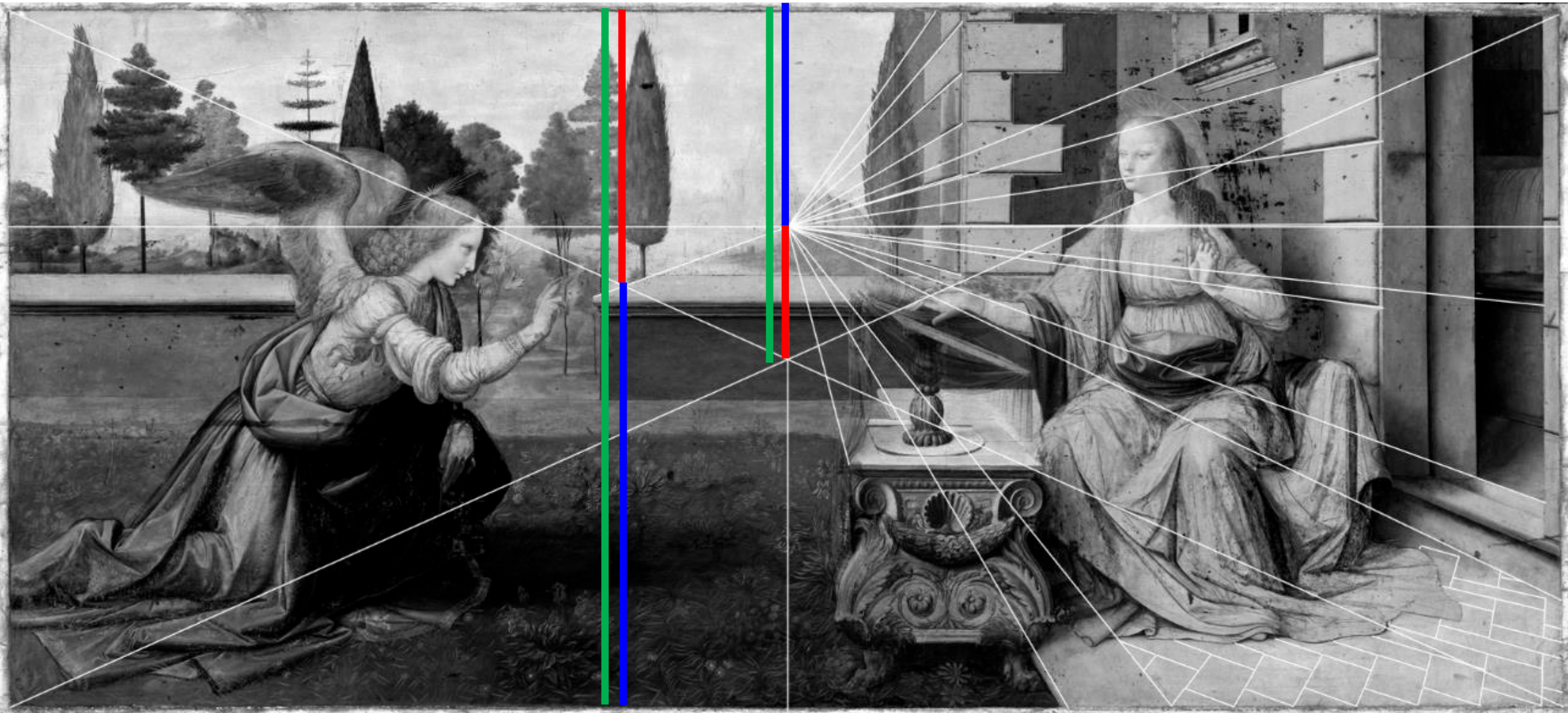




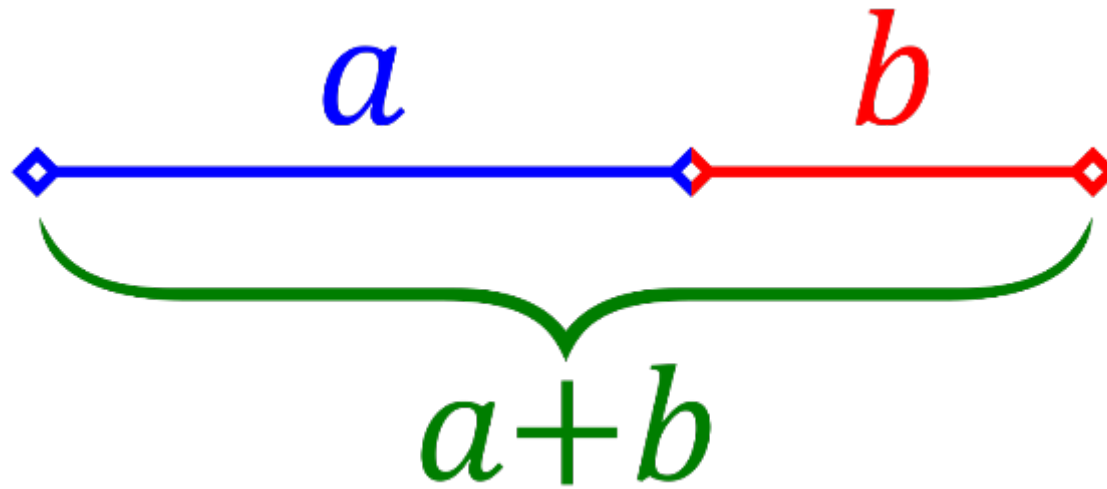
# Studio della prospettiva (courtesy of Roberto Bellucci)



# Sezione aurea



# Sezione aurea



$$\frac{a+b}{a} = \frac{a}{b} = \varphi = \frac{1+\sqrt{5}}{2} = 1.6180339887$$





Anamorfismo?

# Riutilizzo dei cartoni



Madonna della Consolazione



Pala Tezi

Perugino

# Riutilizzo dei cartoni (courtesy of Roberto Bellucci)



# Sovrapposizione Pala Tezi Madonna della Consolazione



Pala Tezi (rosso) ingrandita del 12%

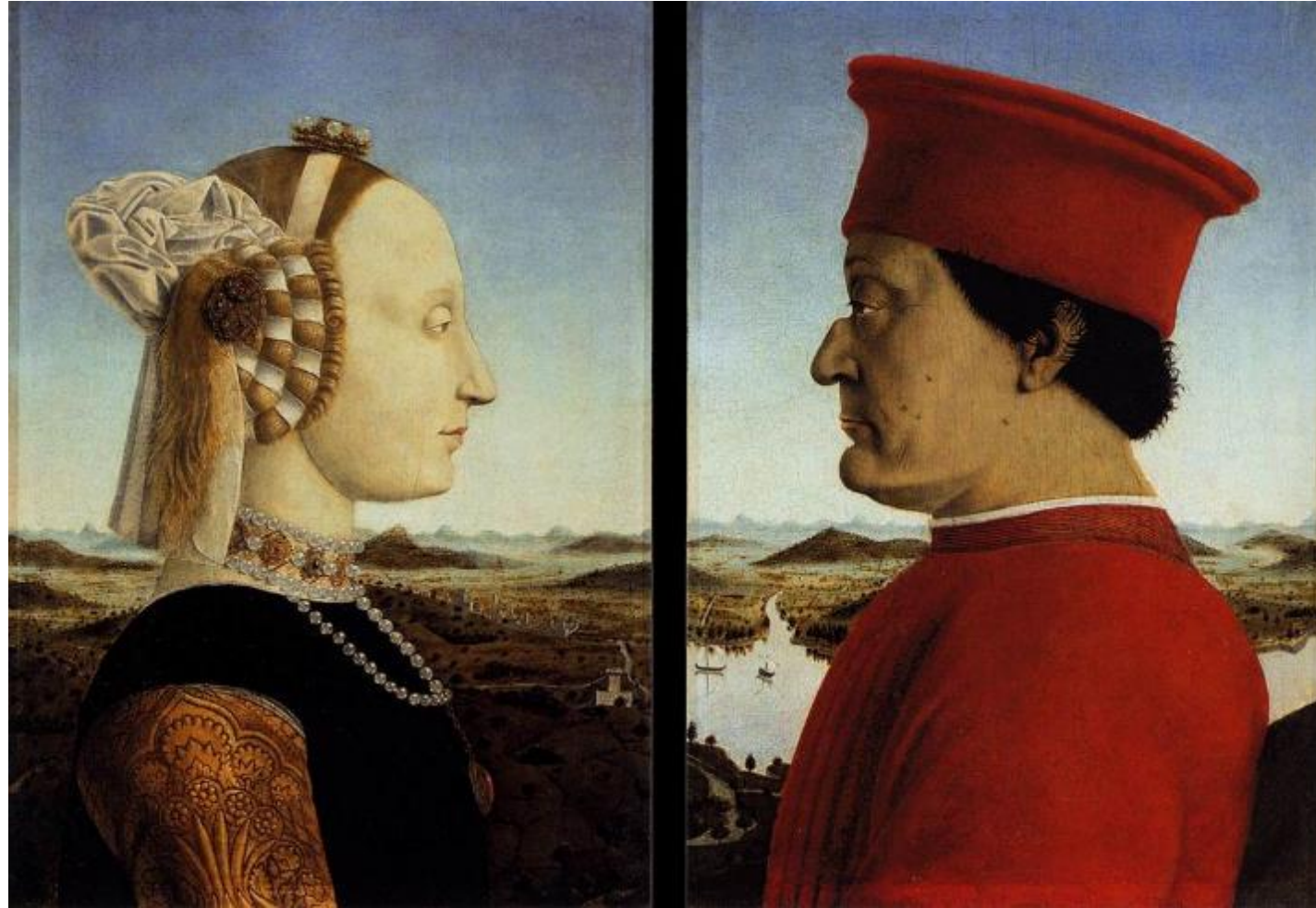


# Riutilizzo dei cartoni



Piero della Francesca, Pala di Brera (Pala Montefeltro), *Pinacoteca di Brera, Milano*

# Riutilizzo dei cartoni



Piero della Francesca, *Doppio ritratto dei duchi di Urbino*, Galleria degli Uffizi, Firenze

# Riutilizzo dei cartoni



Dittico degli Uffizi



Pala di Brera

Piero della Francesca: Federico da Montefeltro

# Riutilizzo dei cartoni (courtesy of Roberto Bellucci)



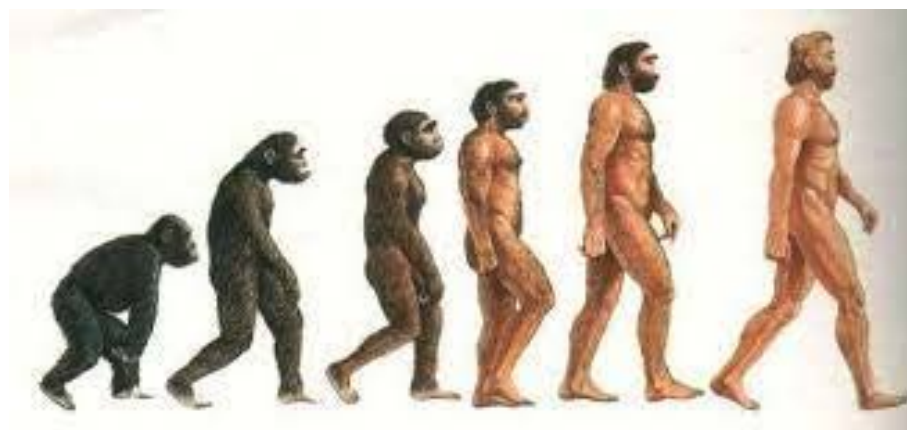
*Courtesy of R. Bellucci e C. Frosinini - OPD*



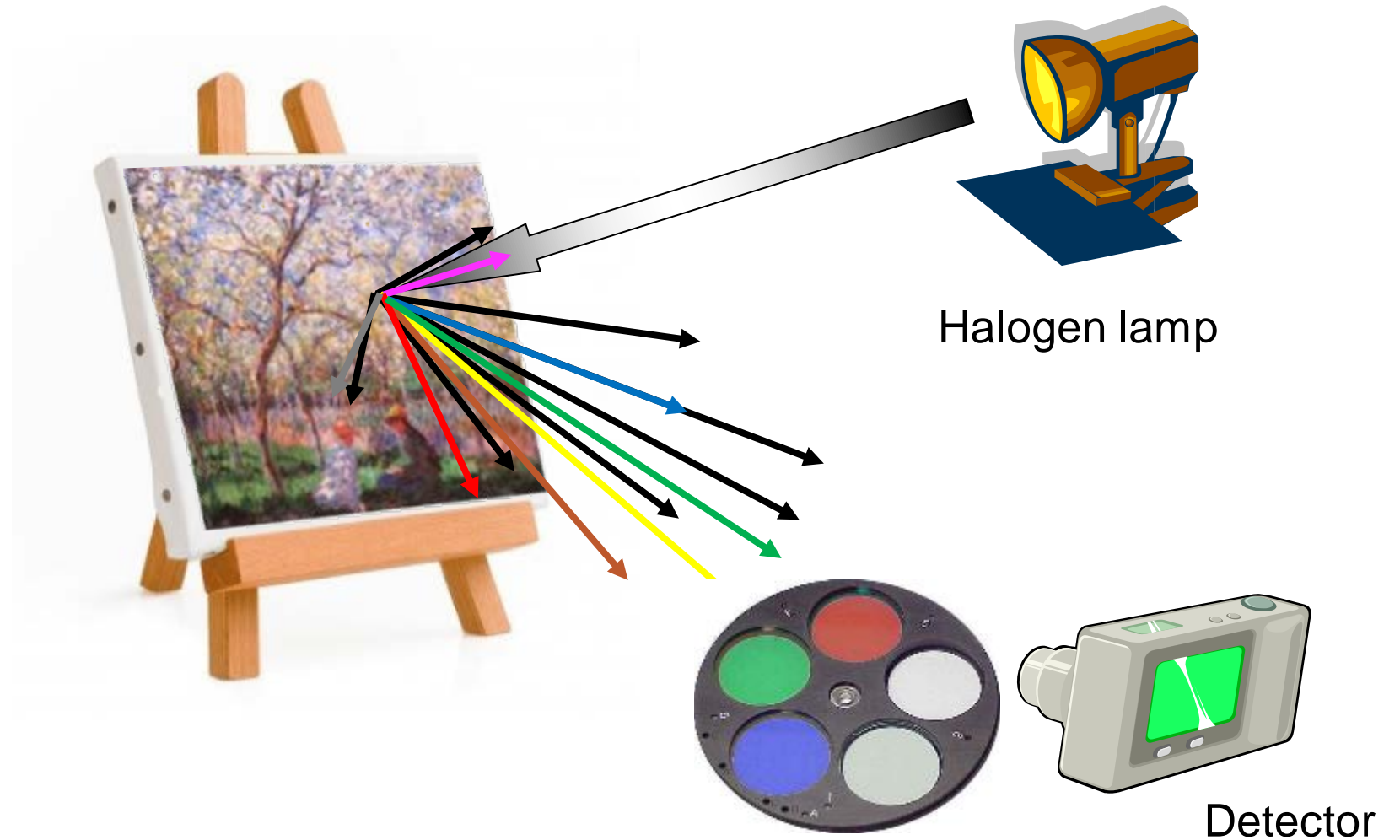
scalatura del 14%



# Multi-band device: IR-RGB scanner



# Acquisizione della riflettografica + immagine a colori



# Riflettografia IR e immagine a colori



B

G

R

IR



# Riflettografia IR e immagine a colori

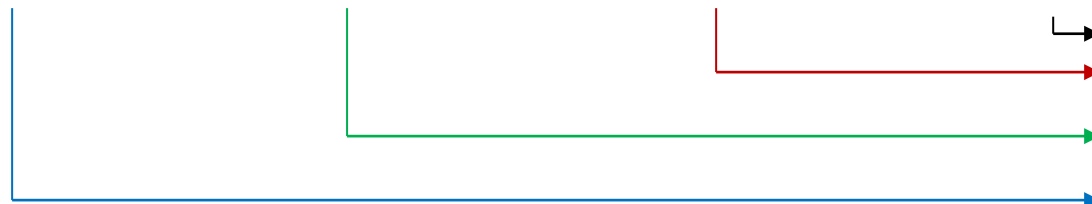


B

G

R

IR







*Pittore olandese sconosciuto, Maddalena (dettaglio)*

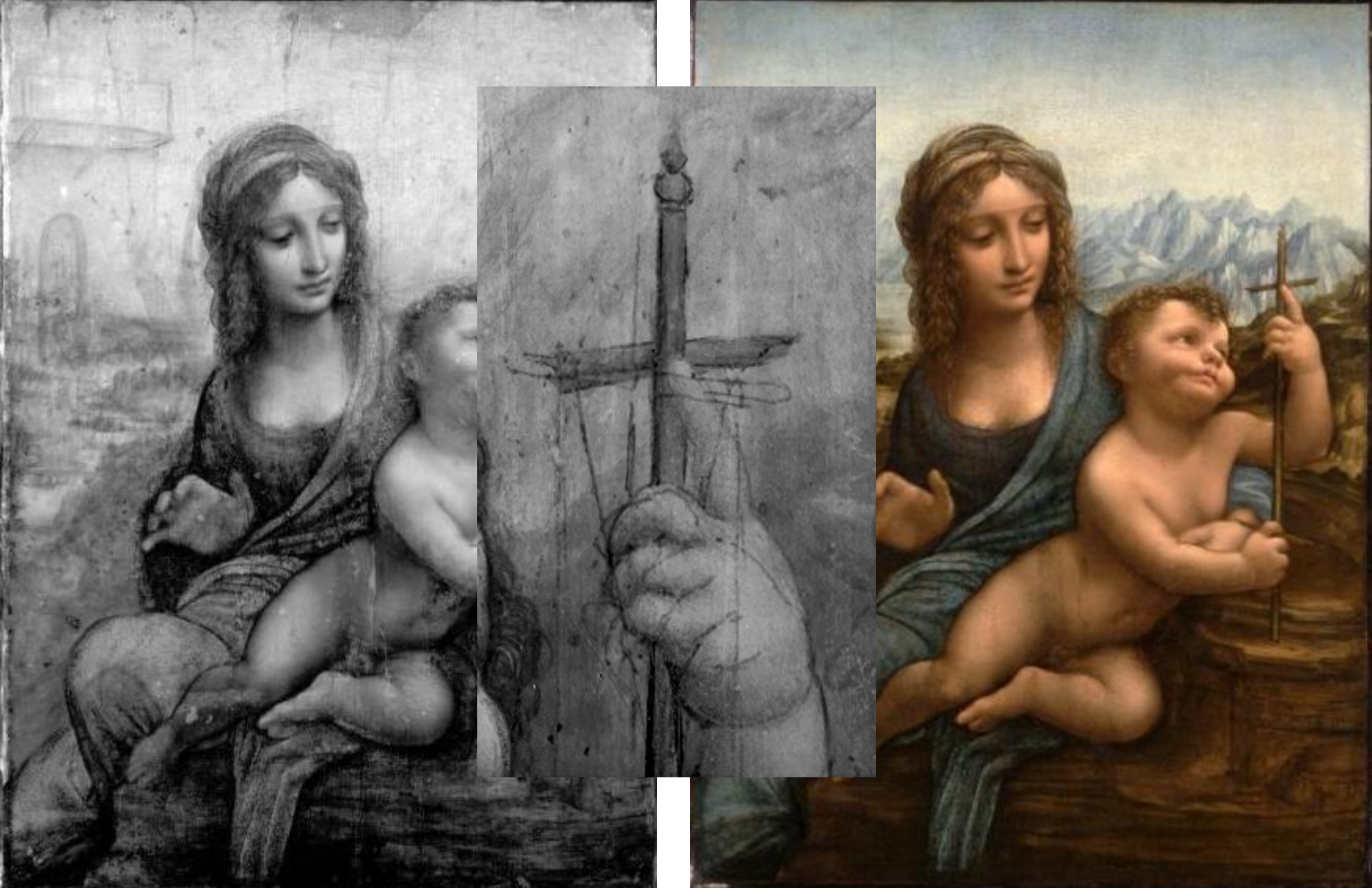
# Matteo di Giovanni: Madonna con Bambino e Santi



# Madonna dei fusi, Leonardo



# Madonna dei fusi, Leonardo



# Venere e amore, Bronzino



# Immagine in falso colore



B



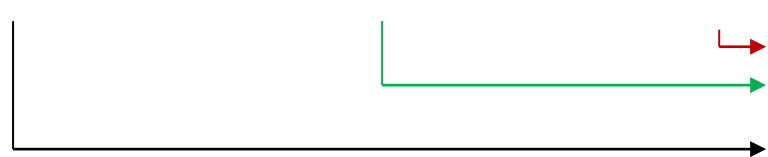
G



R



IR



# Croce di Rosano XII secolo



VIS



false colour

# Madonna del cardellino, Raffaello





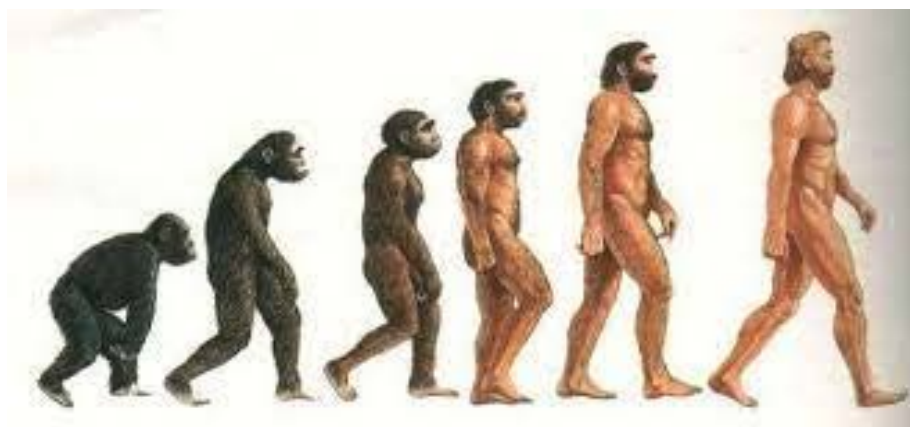
# La Muta, Raffaello





# NIR multi-spectral scanner

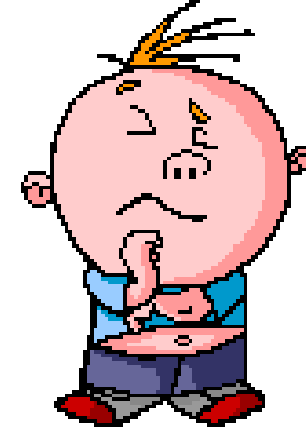
## VIS-NIR multi-spectral scanner



# Cosa succede ...

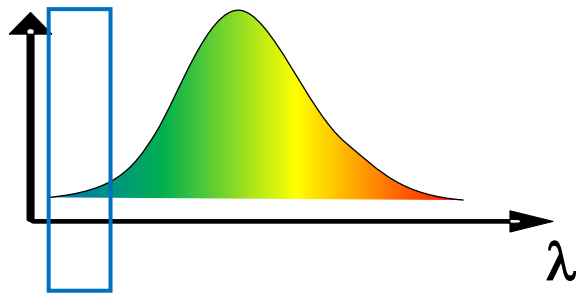


... se si "spezzetta" la banda IR?

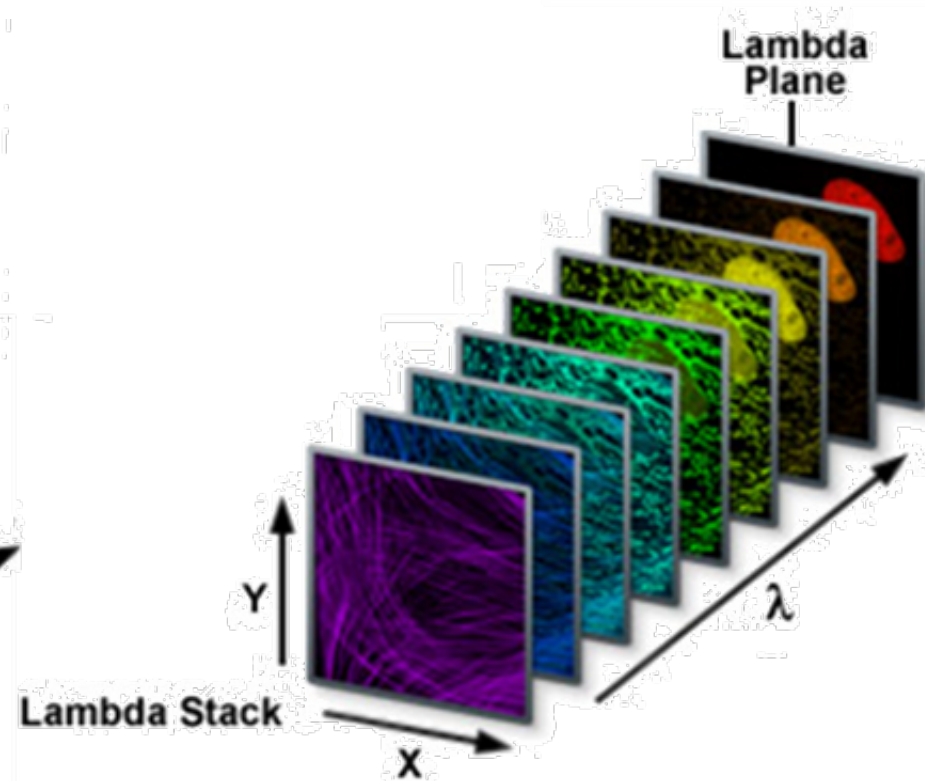
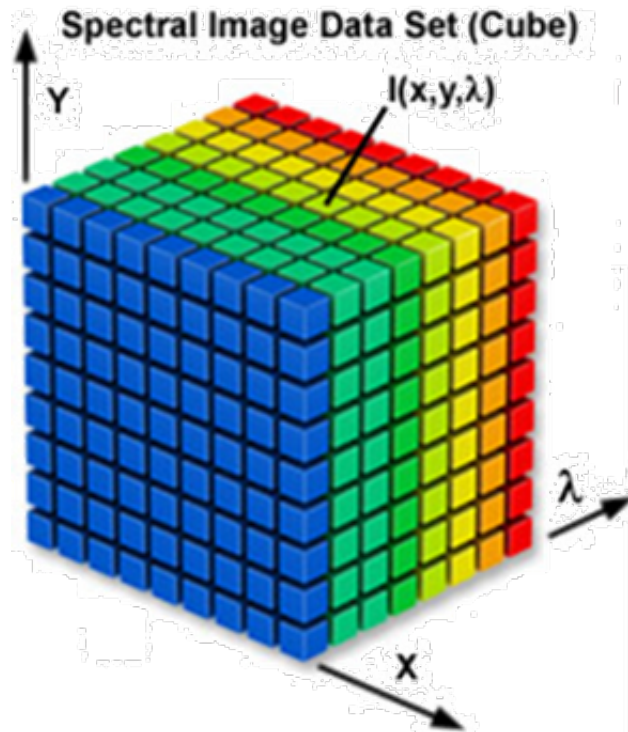


- Si acquisisce la radiazione diffusa dal dipinto in tante bande strette invece che in un'unica banda IR (0.9 - 1.7 micron).
- Anziché un'unica immagine si ottengono tante immagini quante sono la bande alle diverse lunghezze d'onda  $\lambda$ .
- Si ottiene così una RIFLETTOGRAFIA IR MULTISPETTRALE.

# Analisi ad immagine multispettrale



# Analisi ad immagine multispettrale: output



# Spezzettare la banda ...



... per enfatizzare dettagli differenti.



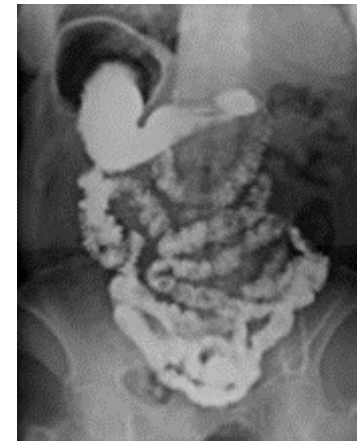
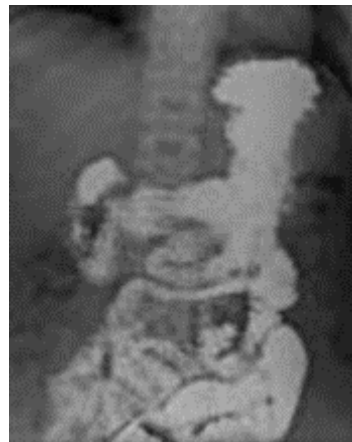
luce visibile



luce visibile

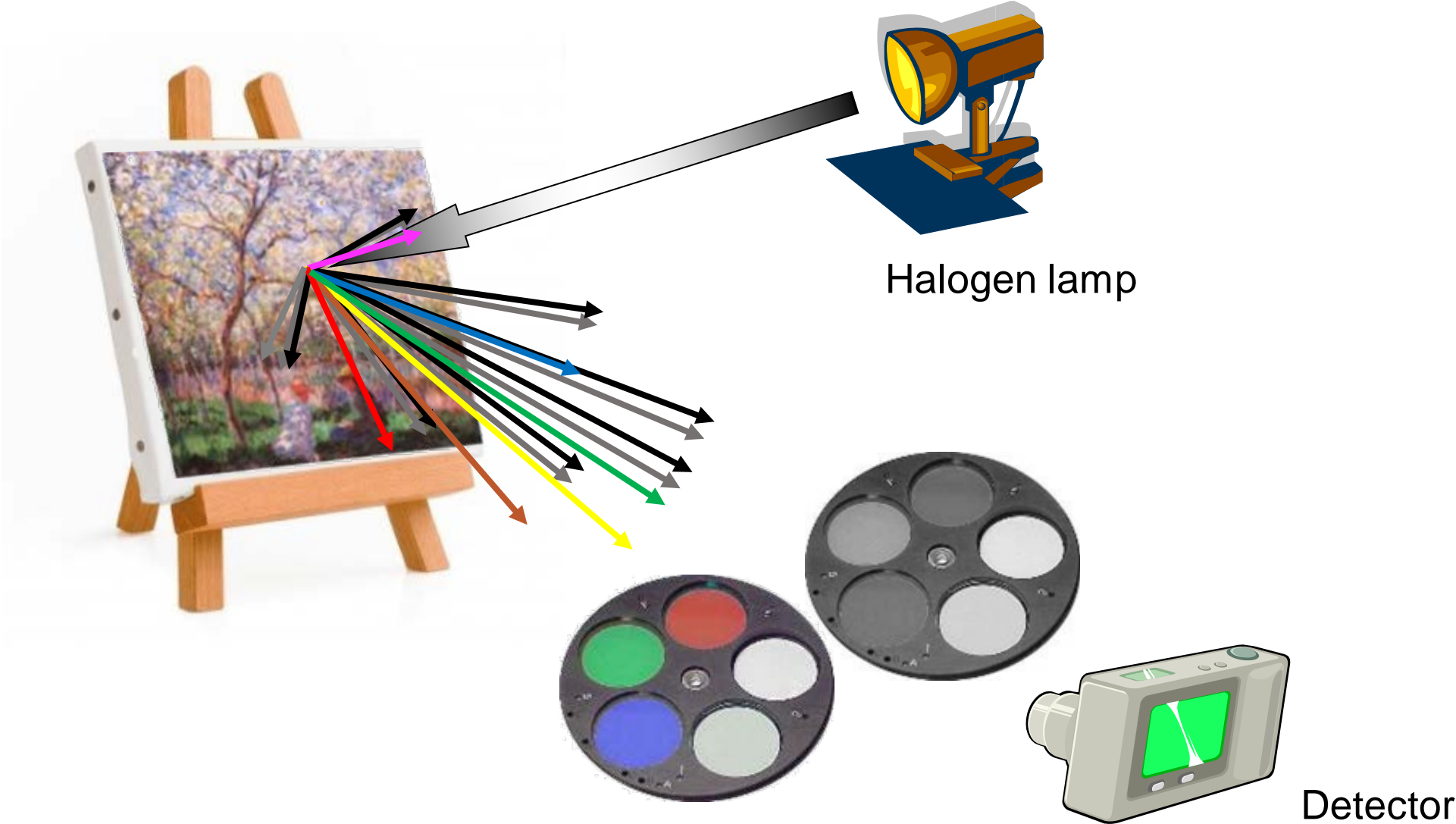


raggi X

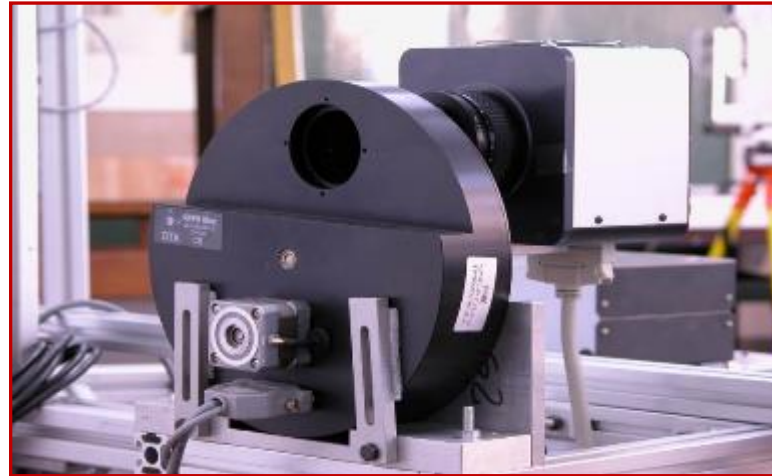
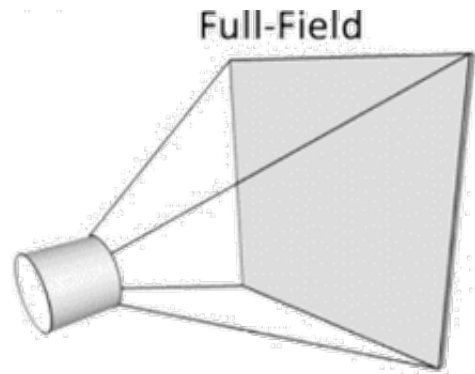


raggi X

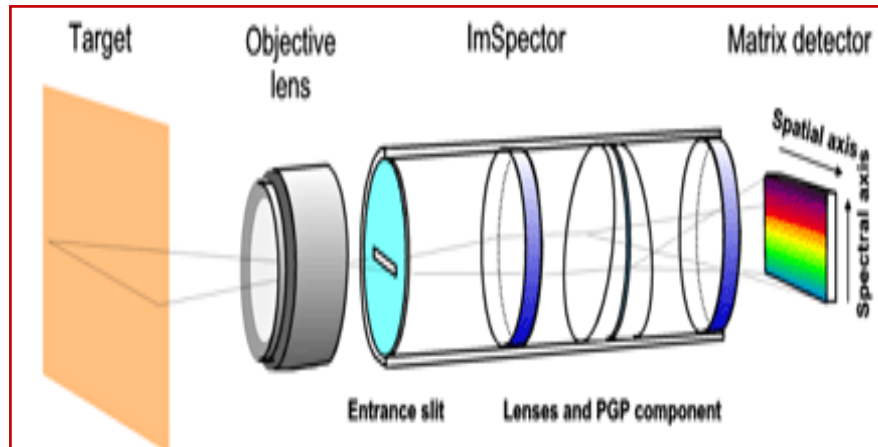
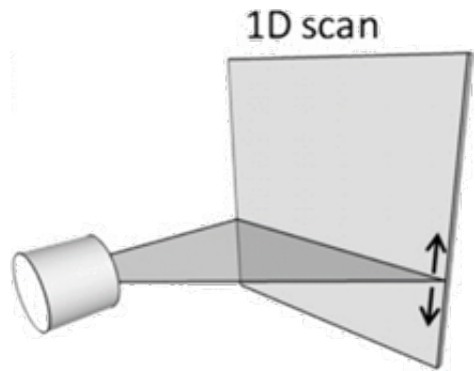
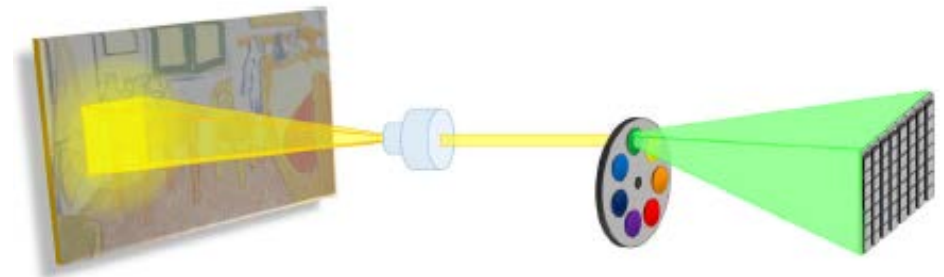
# Riflettografia multispettrale



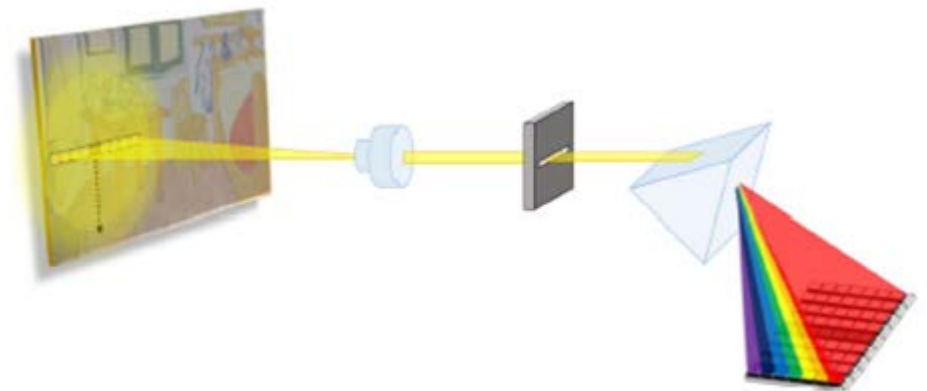
# CURRENTLY USED TECHNIQUES



filtri



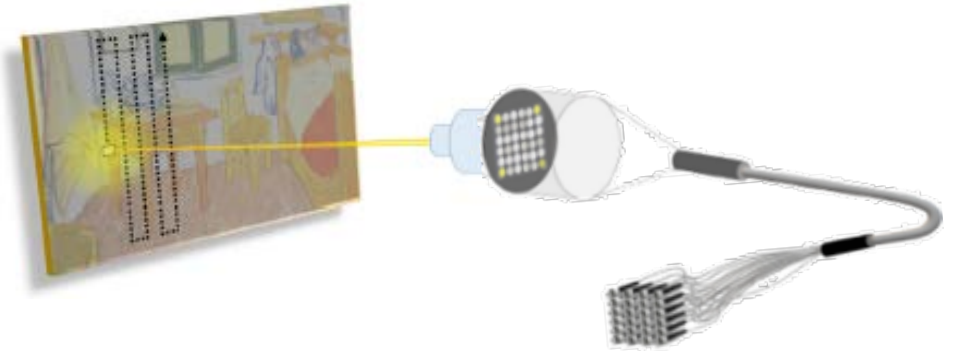
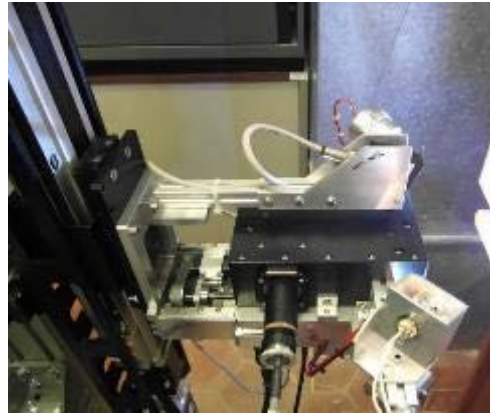
spettrografo



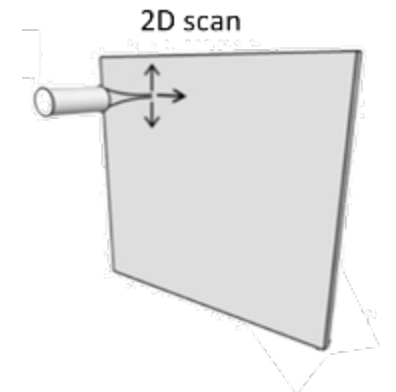
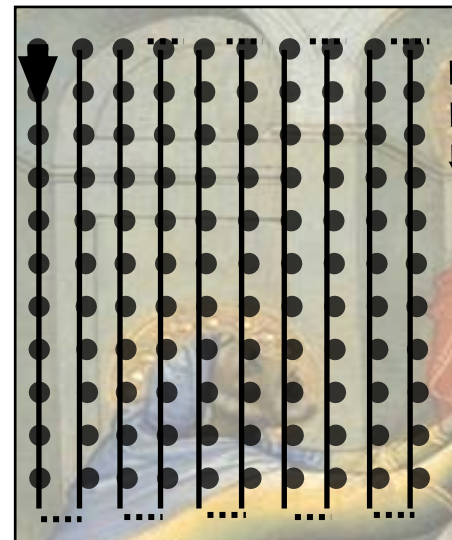
Pushbroom scanning mode



# Scanner multispettrale



Filters + whiskbroom scanning mode



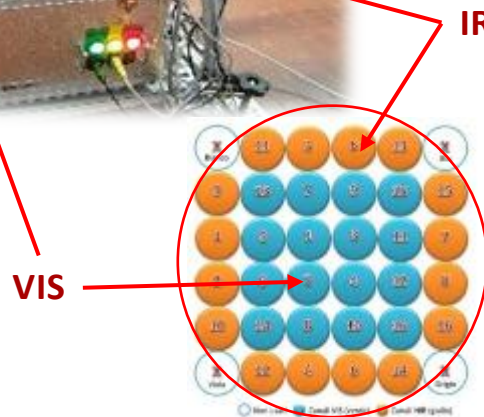
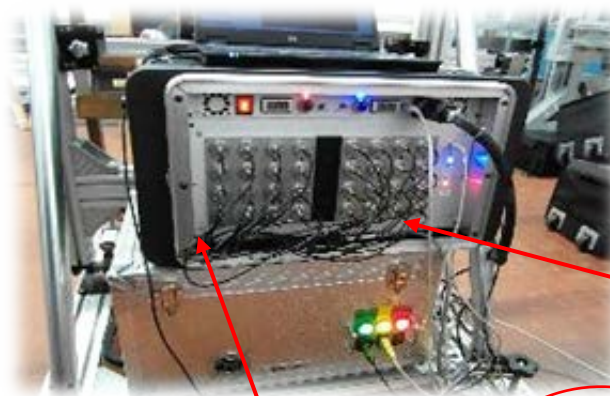
# Multispectral scanners @INO-CNR



- 32 channels (16 Visible + 16 IR)
- each channel equipped with interferential filter with corresponding detector (Si or InGaAs)
- max stroke 1 m
- spatial sampling: 4 pix/mm
- acquisition rate: 3 h/m<sup>2</sup>

## Fibre bundle

- fibers core 200  $\mu\text{m}$
- fiber pitch 250  $\mu\text{m}$



## VIS module

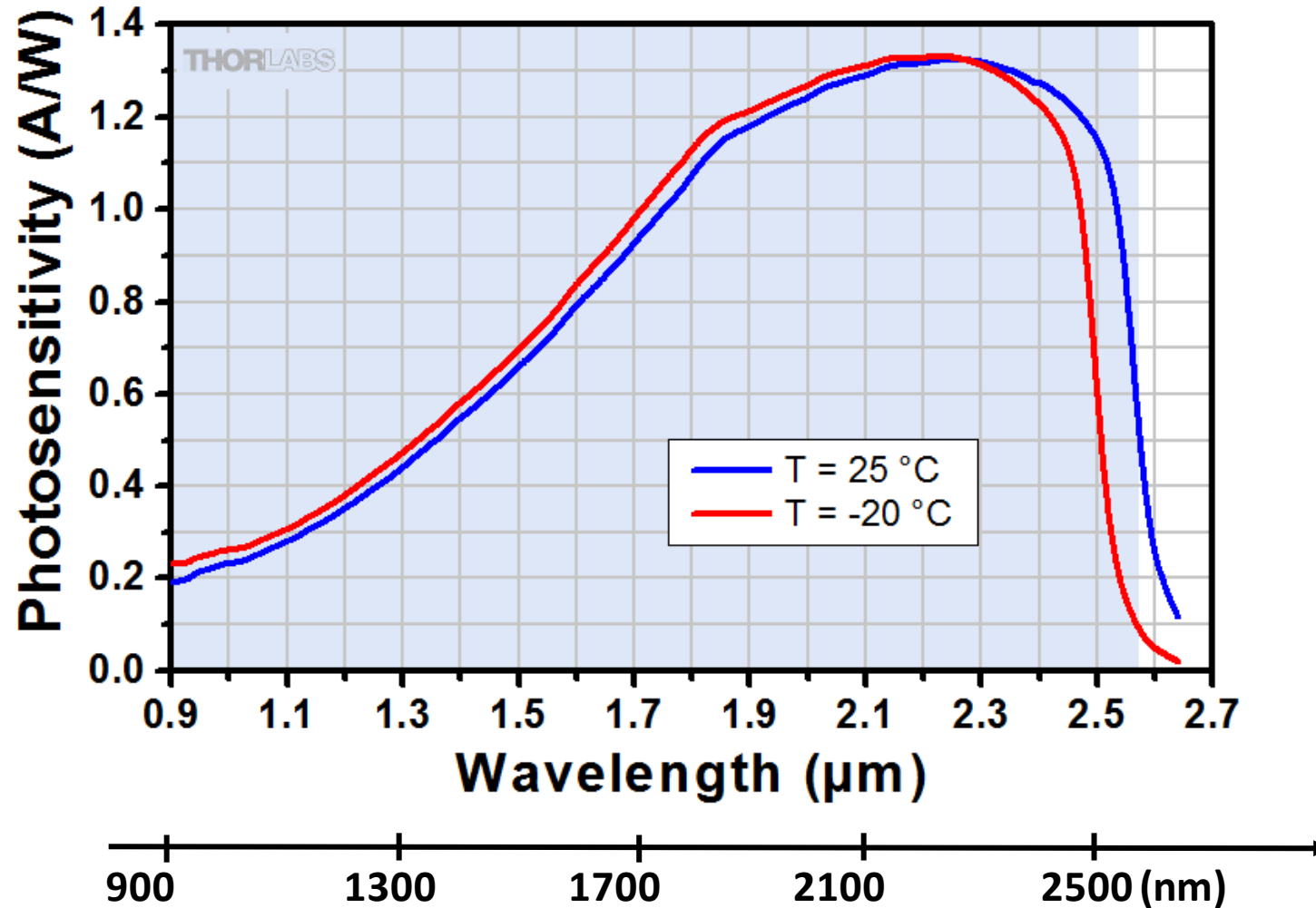
Ch.	$\lambda$ nm	$\Delta\lambda$ nm
1	395	30
2	415	30
3	455	30
4	485	30
5	510	20
6	530	20
7	550	20
8	570	20
9	590	20
10	610	20
11	630	20
12	650	20
13	675	30
14	705	30
15	735	30
16	765	30

## NIR module

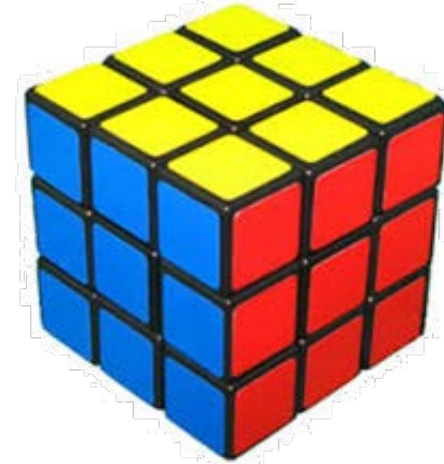
Ch.	$\lambda$ nm	$\Delta\lambda$ nm
17	750	100
18	850	100
19	950	100
20	1050	100
21	1200	66
22	1292	80
23	1400	100
24	1500	100
25	1600	90
26	1705	97
27	1830	110
28	1940	118
29	2100	85
30	2200	120
31	2345	100
32	1200-2550	1350

■ Si    ■ InGaAs

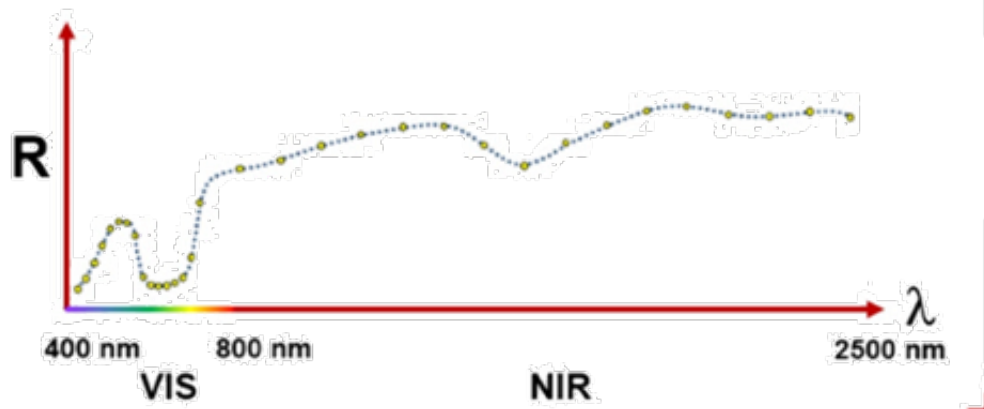
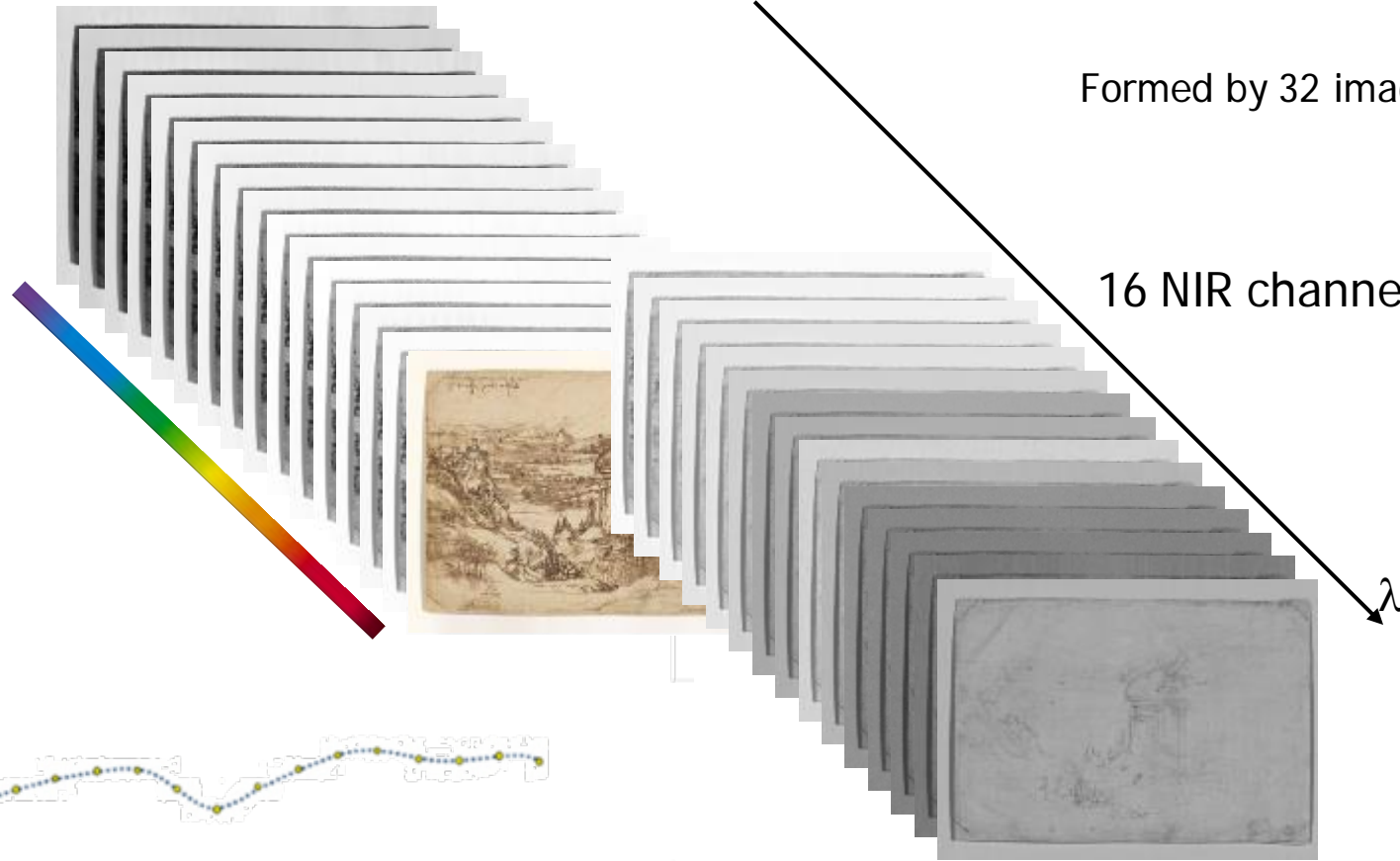
# Spectral response of an InGaAs photodiode



# Il cubo multispettrale



16 VIS channels





# PLAYING WITH IMAGES

## What can we do with a set of images?

- Interband comparison: aids in localizing areas of different materials with particular NIR reflectance.
- Maths operations: joint processing of single images such as simple subtraction & ratio methods.
- Color composite technique: is a powerful visualization method for multispectral reflectography.  
False color images in suitable scheme of bands allow to emphasize features of interest, analyze inter-relations between multiple images, bring up features varying with the wavelength, examine features simultaneously
- Stats analysis: Principal Component Analysis (PCA) allows for concentrating information in few images.

*Automatic identification of features is impractical for real paintings and visual supervision is crucial.*

# Confronto tra lunghezze d'onda



color



850 nm



1700 nm



wide 900-1700 nm



1300 nm



2265 nm

# Differenze e rapporti

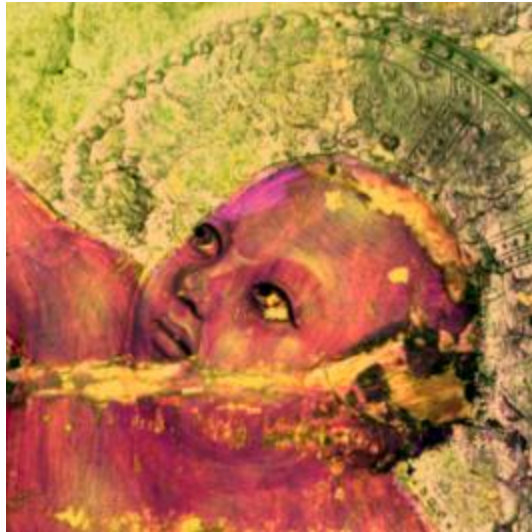


CH@2265 nm – CH@850 nm

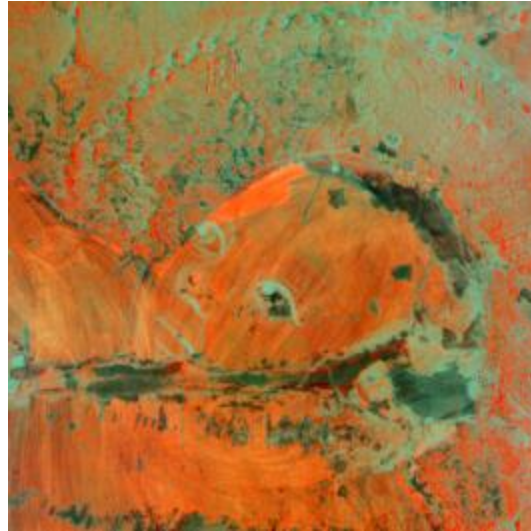


CH@2265 nm / CH@850 nm

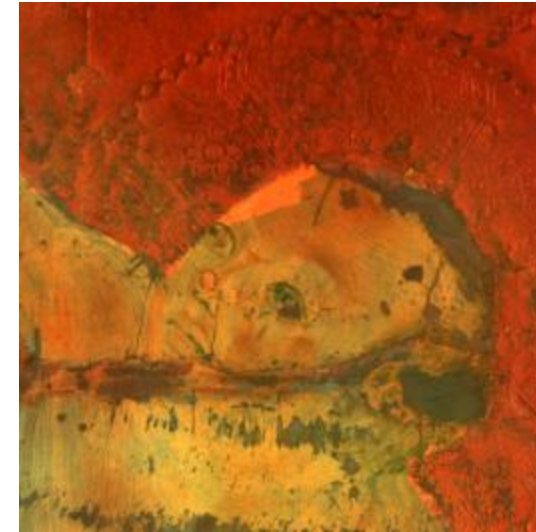
# Falso colore



1400 nm,  
850 nm,  
2265 nm

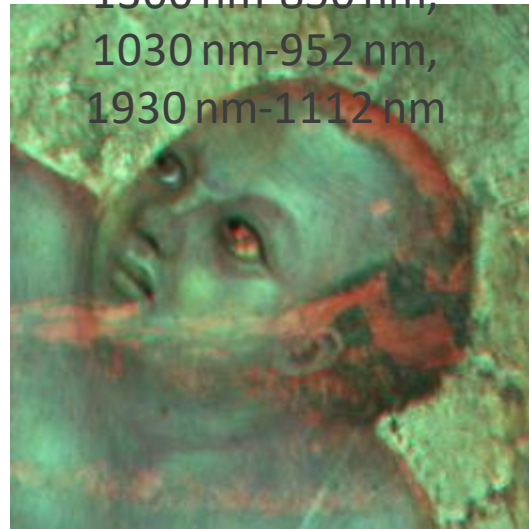


1300 nm-850 nm,  
1030 nm-952 nm,  
1930 nm-1112 nm



1030 nm/952 nm,  
1300 nm/850 nm,  
1930 nm/1112 nm

Standard false color image  
(wide, R, G)



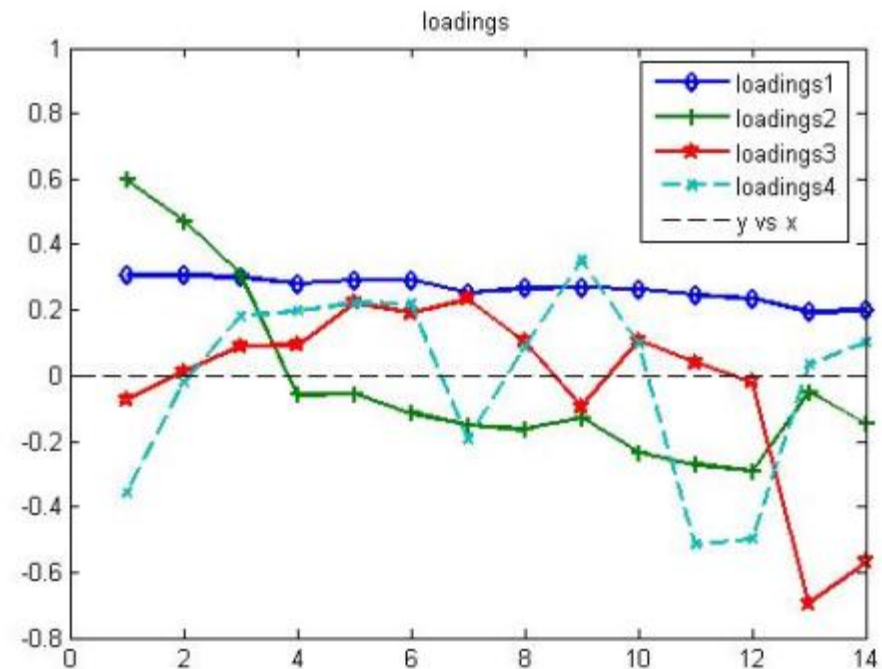


# STAT ANALYSIS

PCA is a method that describes original sets of data by means of a smaller number of uncorrelated components of progressively decreasing variance, concentrating, significant features into a few representative images, thus facilitating their interpretation.



Cosmè Tura  
Madonna with Child



Loadings P:  
orthonormal axes system



## SCORES IMAGES



T1 (91.9%)



T2 (5.5%)



T3 (1.9%)



T4 (0.3%)

Scores Images are the projection of original data along the new axes (loadings).



# T1 VS WIDEBAND REFLECTOGRAM



wide



T1



## Wideband IR vs score images



Wide



Color comp image  
T2, T3, T4



1112 nm/2265 nm  
False color image

# Riflettografia multispettrale: esempio



*Bronzino,  
Ritratto di giovane uomo con liuto*

*Uffizi, Firenze*

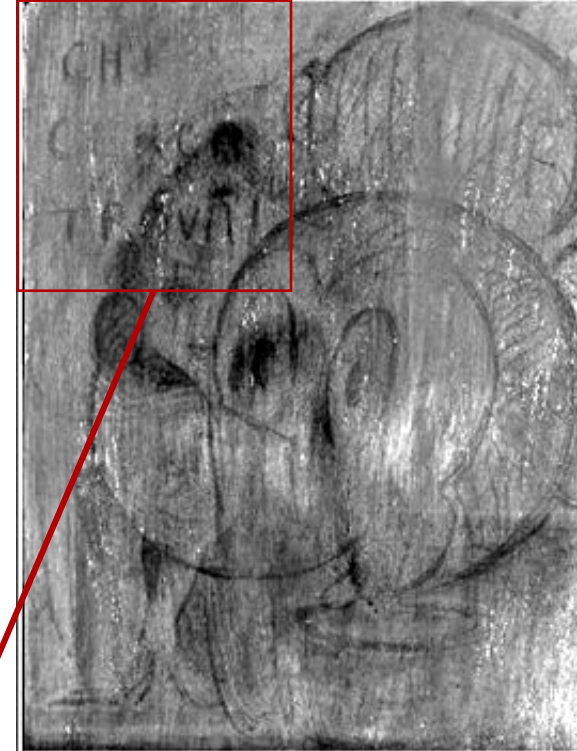
# Riflettografia multispettrale: esempio



1.1 micron



1.6 micron



Differenza 2.3 – 1.6 micron

CHI CERCA TROVA!

## Questo Bronzino è un falso

Il «Ritratto di giovane con liuto», celebre dipinto esposto a Firenze, è una copia dipinta dopo la morte del maestro. Un incredibile inganno durato secoli. E rivelato dall'indagine condotta da un gruppo di ricercatori dell'Istituto Nazionale di Ottica del CNR.

di Tommaso Cerno



musica occidentale si scriveva a Firenze, dove Giovanni e il figlio omonimo, anch'egli musicista, vissero e lavorarono: nella città gigliata si riuniva la Camerata de' Bardi, che con l'elaborazione del recitar cantando segnò la nascita del teatro in musica, ovvero dell'opera. Se a Firenze dobbiamo la nascita di questo straordinario genere musicale, è grazie a Venezia che si diffuse nel mondo.

E' nella città lagunare, infatti, che l'editore Ottaviano Petrucci inventò l'intavolatura, forma scritta della musica per strumenti a corde pizzicate, utilizzata da allora e fino ai giorni nostri per le edizioni di opere di compositori come lo stesso Giovanni Battista Strozzi: un vero e proprio atto di nascita dell'editoria di opere musicali.

[ilmiolibro](#)
[ebook](#)


TOP LIBRI  
**L'Universo McCartney**  
 di Luca Perasi e Vincenzo Oliva

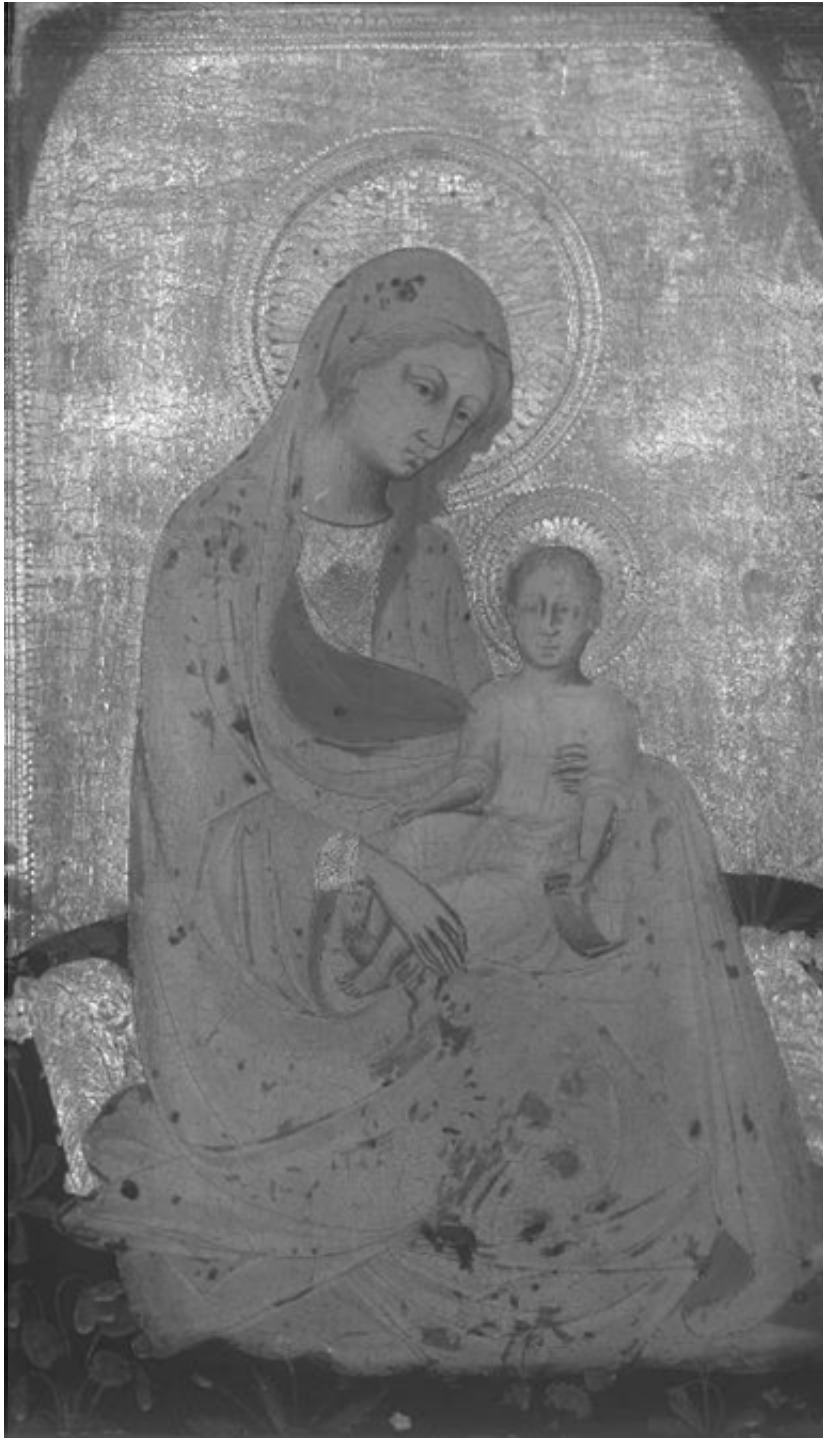


LIBRI EBOOK  
**Dà bhà**  
 di Carlo-118082



**SCHERZI  
A PARTE**





When entering IR discloses more...

*IR, 952 nm*

*IR, 1300 nm*

*IR, 1700 nm*

*Giovanni di Paolo, Madonna con Bambino  
Harvard Center for Renaissance Studies – Villa I Tatti*

... and when entering IR discloses less.



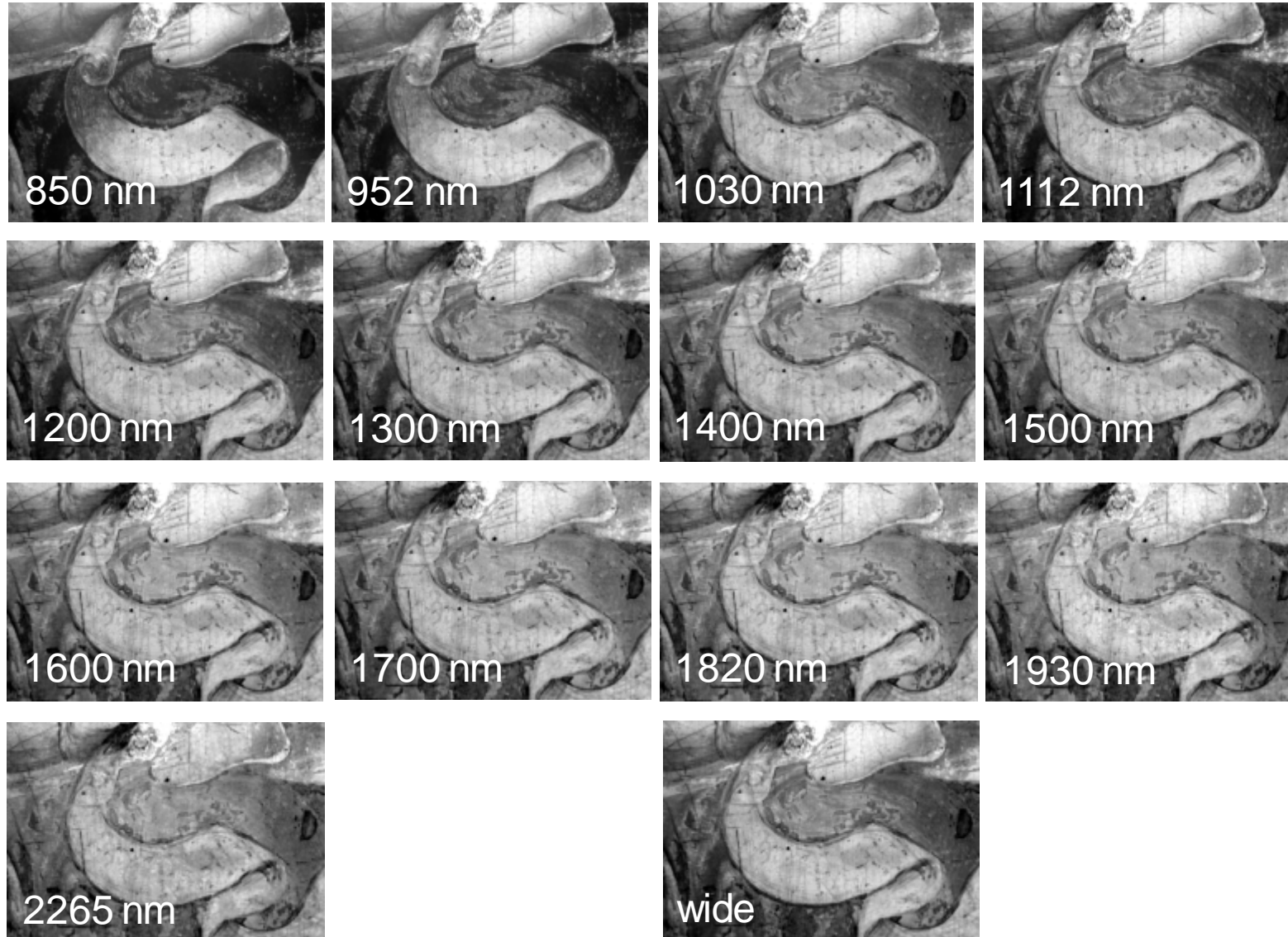
*Beato Angelico, Adorazione dei pastori, Tabernacolo dei Linaioli, Museo di San Marco, Firenze*

# SMIRR applications



Madonna con Bambino,  
XVI secolo

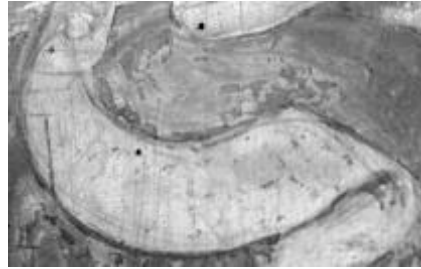
# Riflettografia multispettrale: dati grezzi



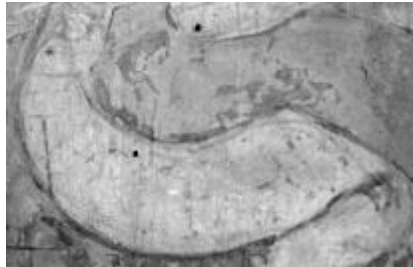
# SMIRR applications



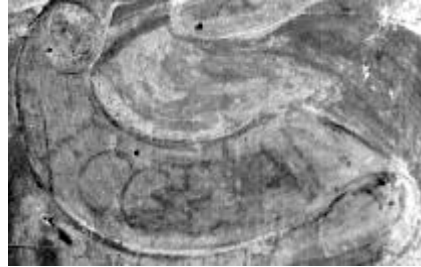
Visible image



IR wide 900-1700 nm



CH13 @1930nm



CH13 - CH14



CH14 @2265 nm



False color CMYK image, CH3 @900 nm, CH7 @1300 nm,  
CH9 @1500, CH14 @2265 nm



Madonna with Child,  
XVI century

# Dopo l'elaborazione



immagine differenza 2265 nm-1930 nm



immagine falso colore CMYK  
952 nm, 1300 nm, 1500 nm, 2265 nm

# SMIRR applications



Madonna with Child



Visible image



IR wide



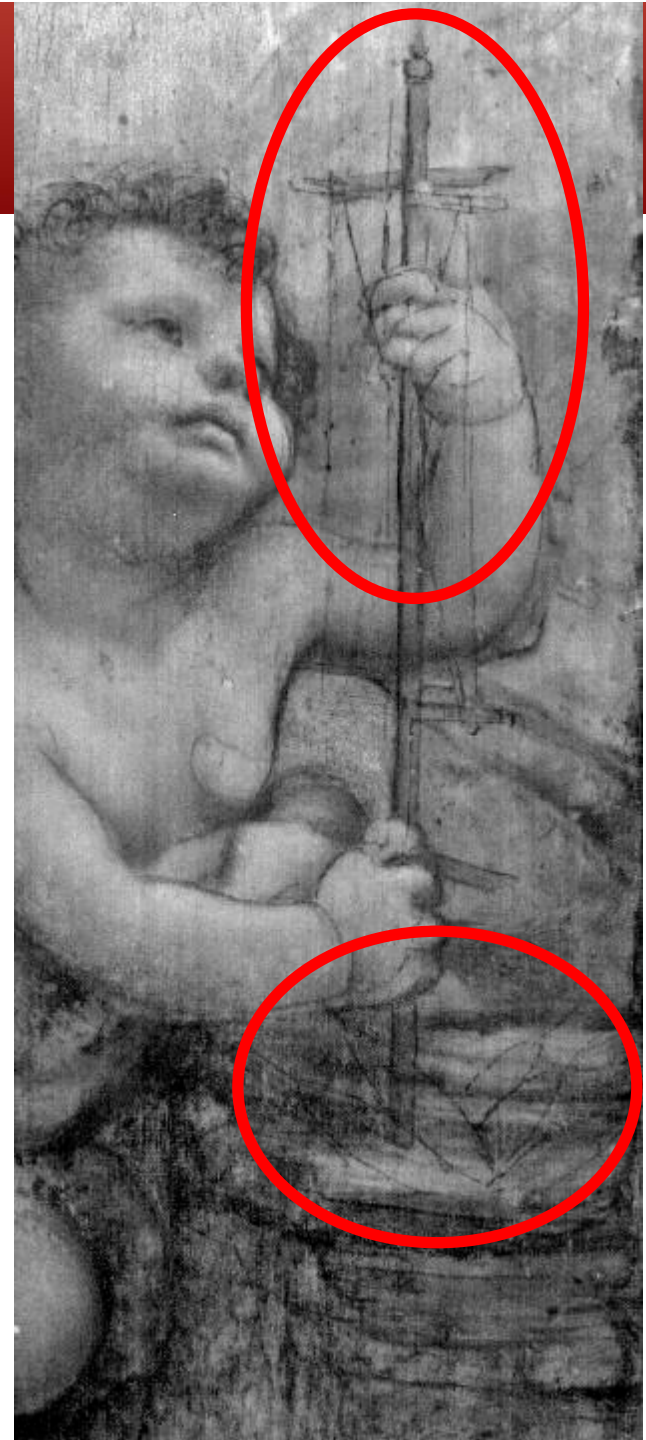
False color CMYK image, CH3 @ 900 nm, CH7 @ 1300 nm, CH9 @ 1500, CH14 @ 2265 nm

# Madonna dei fusi





# Fusi e arcolaio



Paesaggio 8P



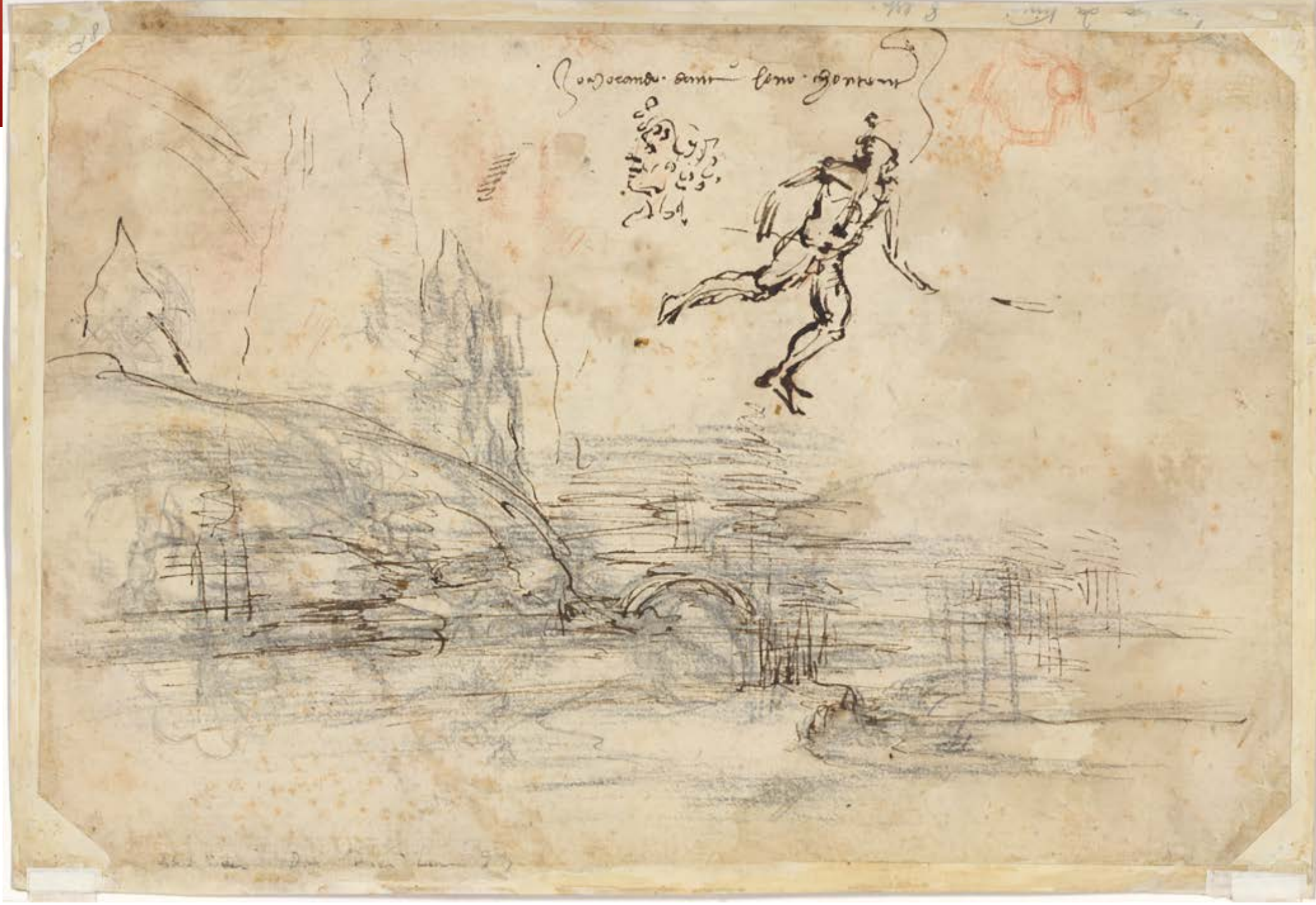
VIS image – recto (davanti)

# Recto (davanti)

850 nm  
950 nm  
1050 nm  
1230 nm  
1292 nm  
1400 nm  
1500 nm  
1600 nm  
1705 nm  
1830 nm  
1940 nm  
2100 nm  
2200 nm



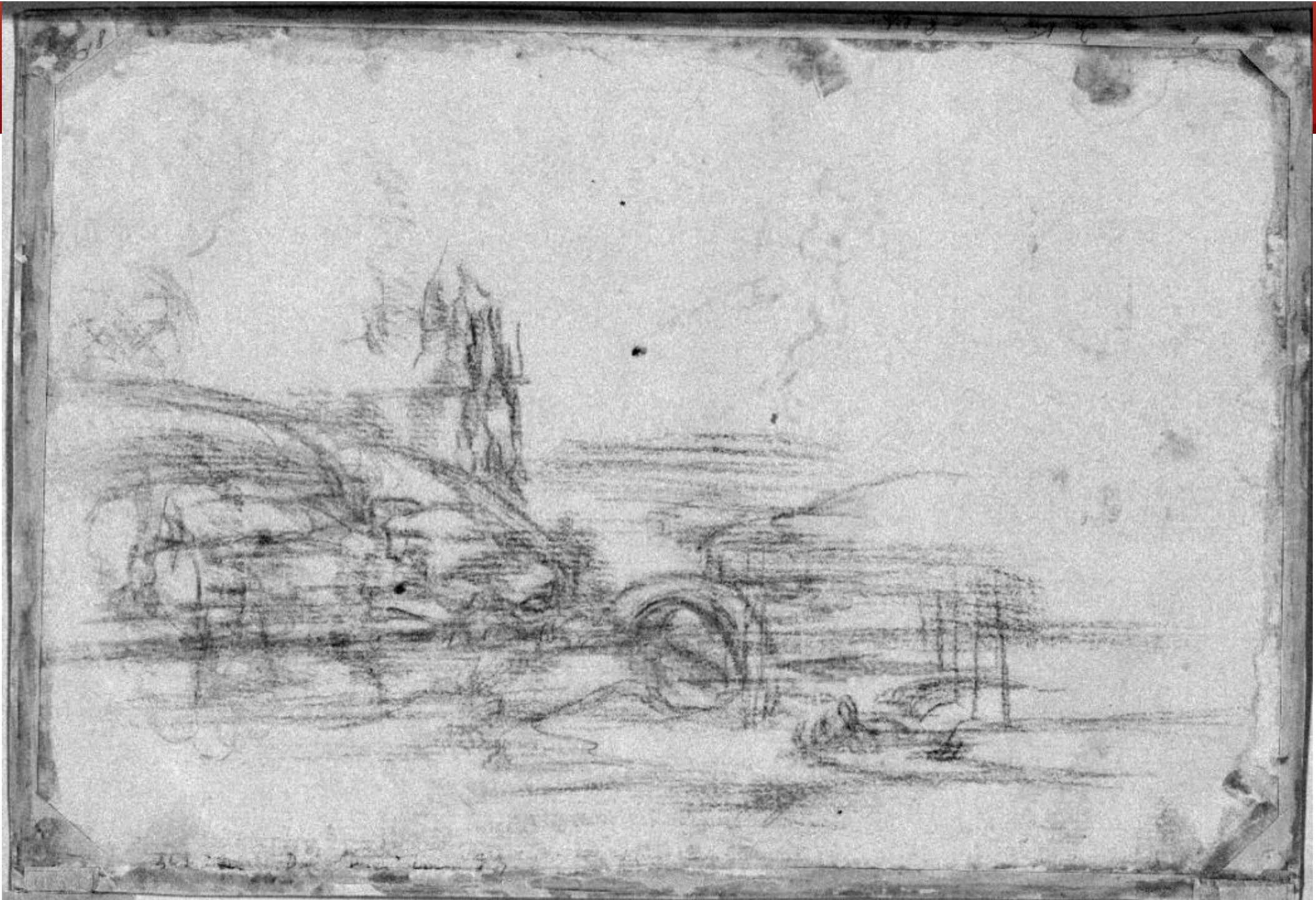
Paesaggio 8P



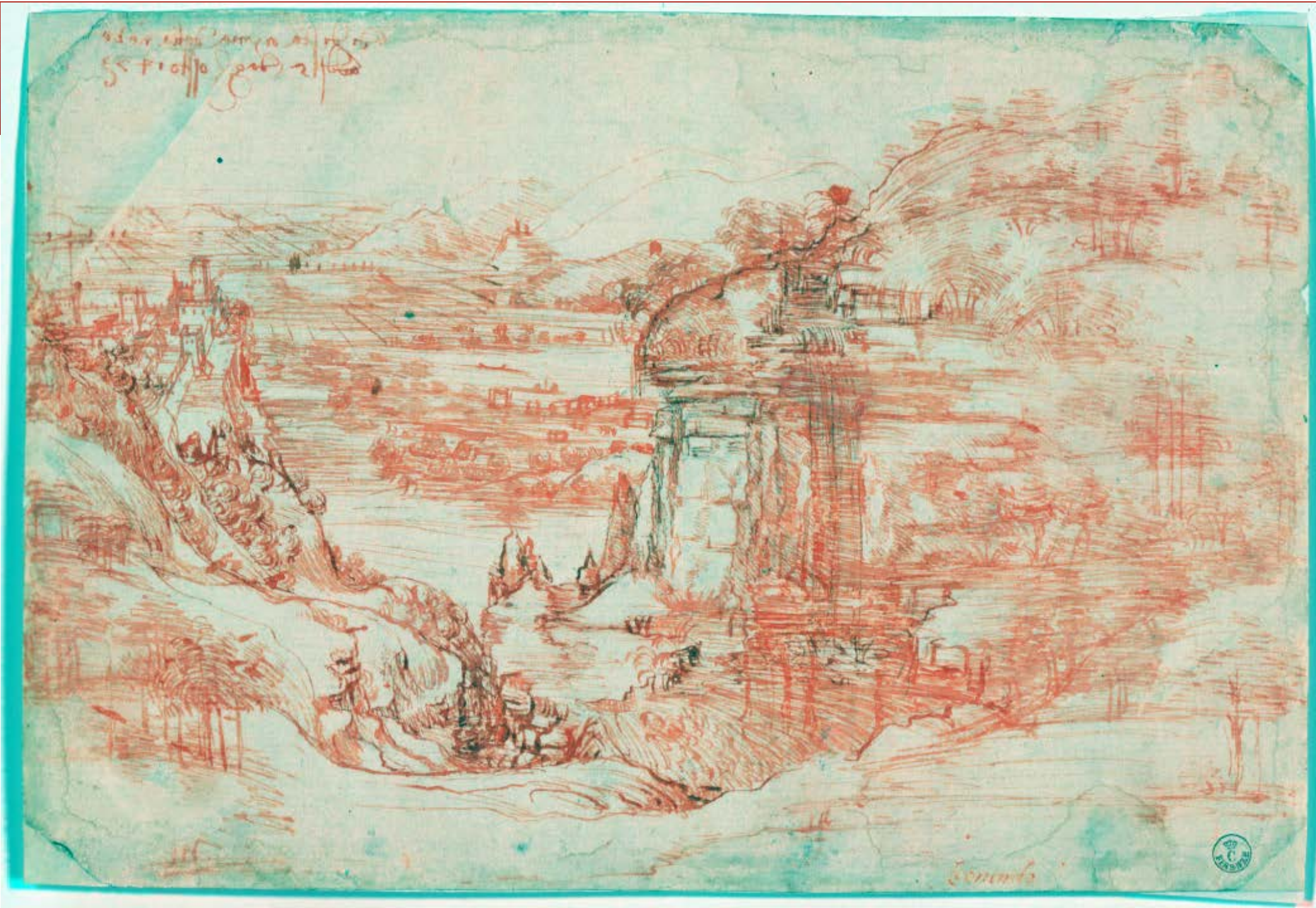
VIS image – verso (dietro)

# Verso (dietro)

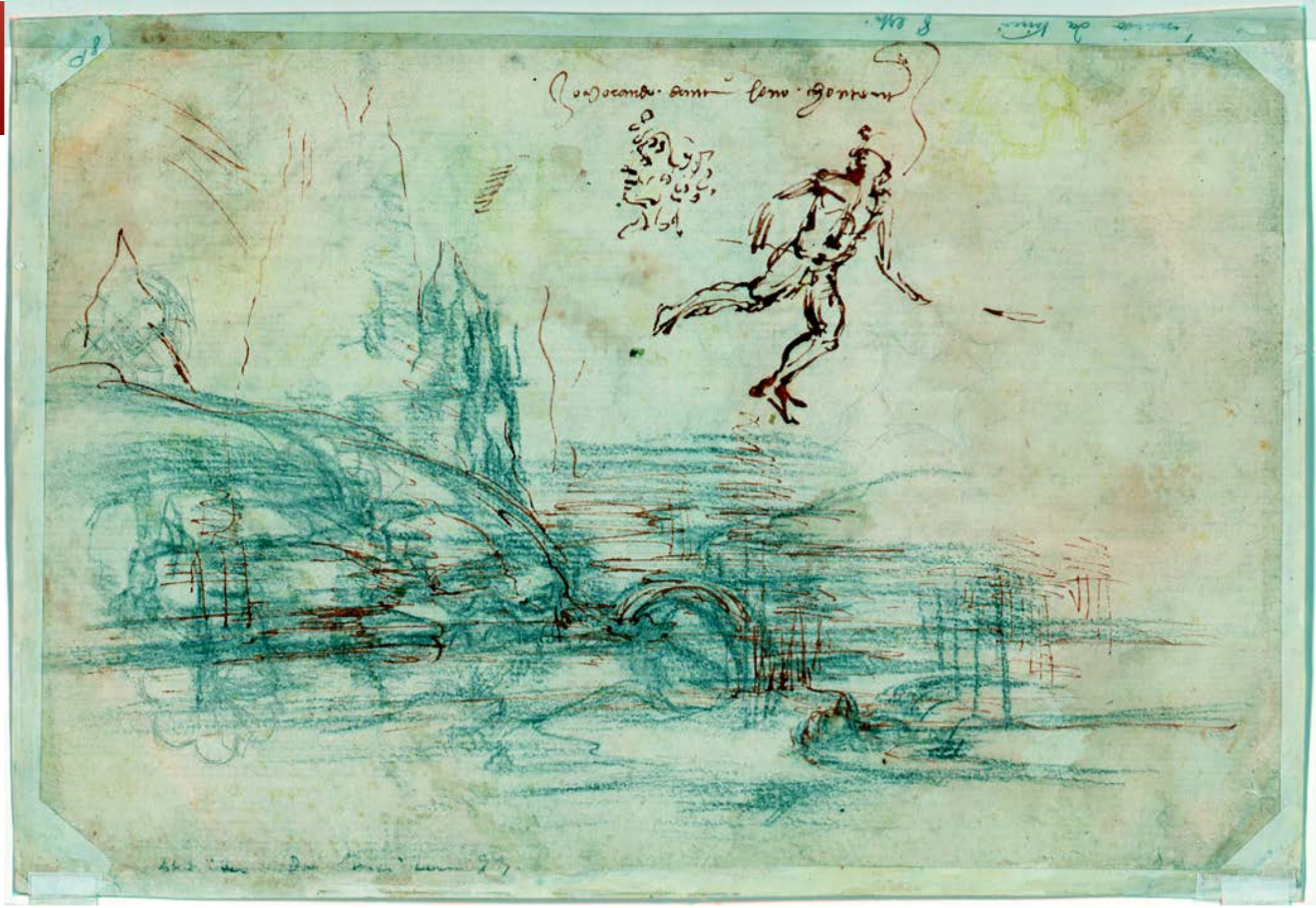
850 nm  
950 nm  
1050 nm  
1230 nm  
1292 nm  
1400 nm  
1500 nm  
1600 nm  
1705 nm  
1830 nm  
1940 nm  
2100 nm  
2200 nm



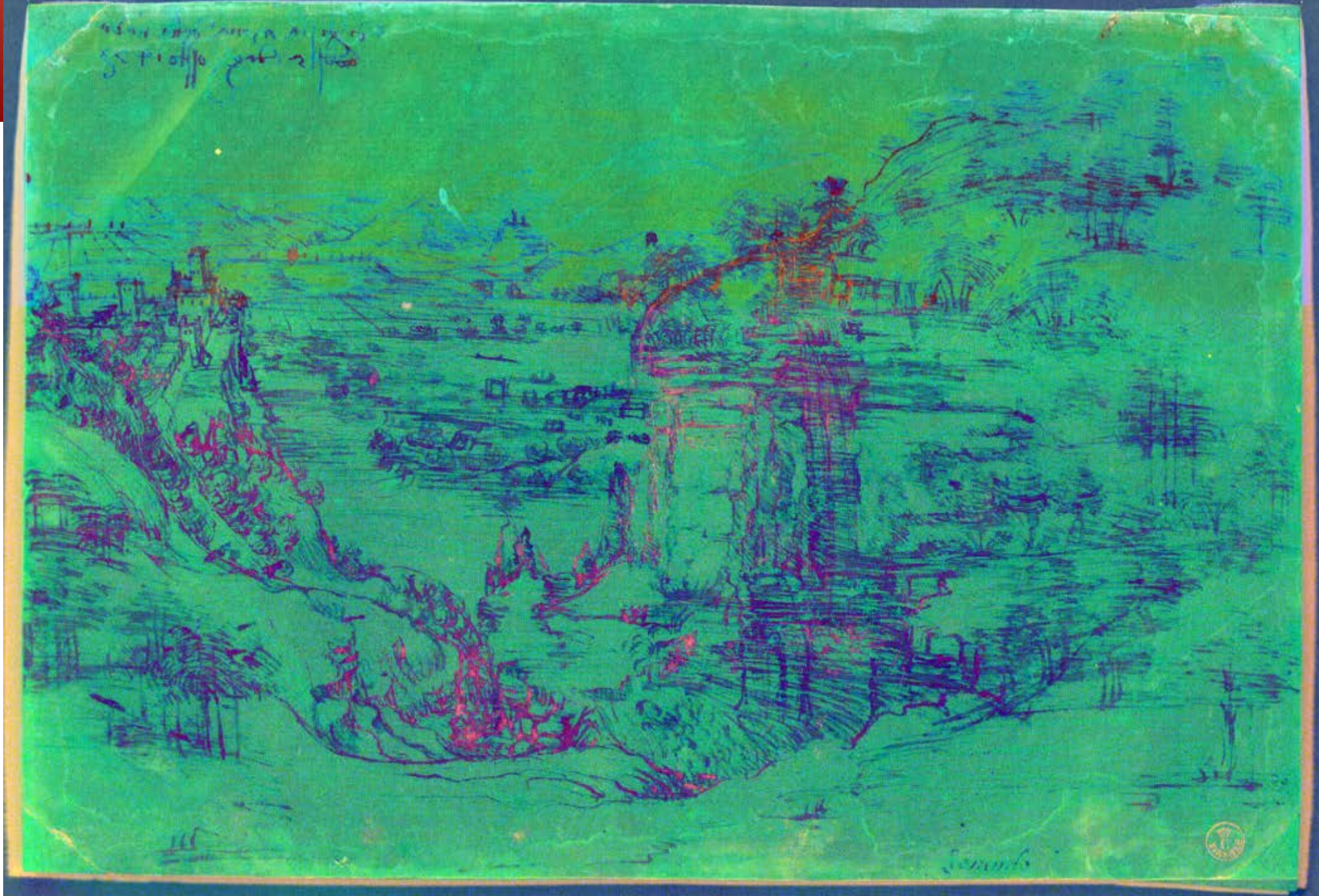
FC@1292 nm



FC@950 nm



PC2, PC3, PC4





Grazie dell'attenzione!

