

Image Processing e Machine Learning

Basi e Possibili Applicazioni ai Beni Culturali

Christian Salvatore

Scuola Universitaria Superiore IUSS Pavia

Indagini scientifiche nell'opera d'arte

Cosa sono:

- misura del ^{14}C
- dendrologia

- microfotografia/microscopia digitale
- imaging di fluorescenza stimolata da UV
- spettroscopia nel VIS/IR
- imaging nel VIS/IR
- spettroscopia con fluorescenza X
- radiografia X

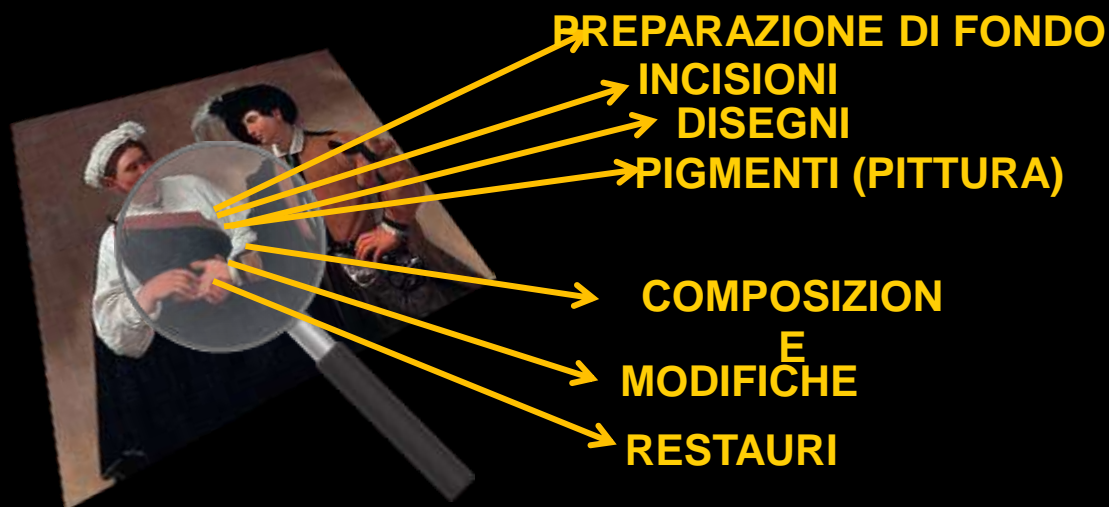
- analisi computerizzate
- analisi di microcampioni

A cosa servono:

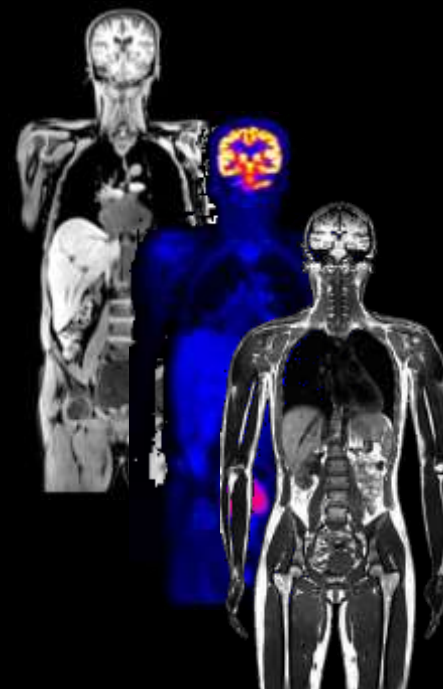
- datazione dell'opera
- caratterizzazione dei materiali, della tecnica e della firma dell'opera
- caratterizzazione dello stile dell'opera
- identificazione tracce esterne all'opera

IN COSA CONSISTE?

Metodi di analisi scientifica non distruttive ne invasive
per ottenere informazioni non desumibili a occhio nudo e in superficie

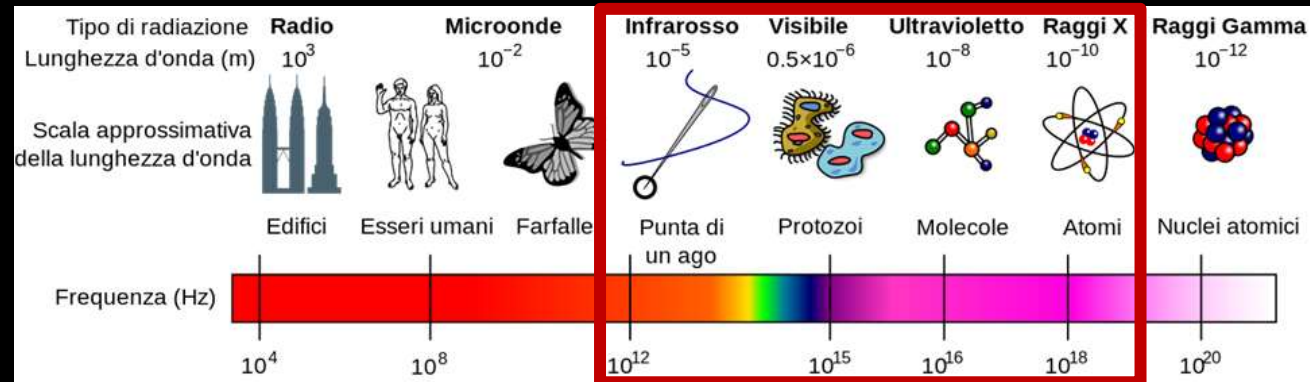


Le tecnologie nascono negli anni 50 come tecniche di diagnostica medica



Diagnostica per immagini | Beni culturali

Sfruttamento di gran parte dello spettro della luce



Per studiare le tecniche di produzione degli artisti

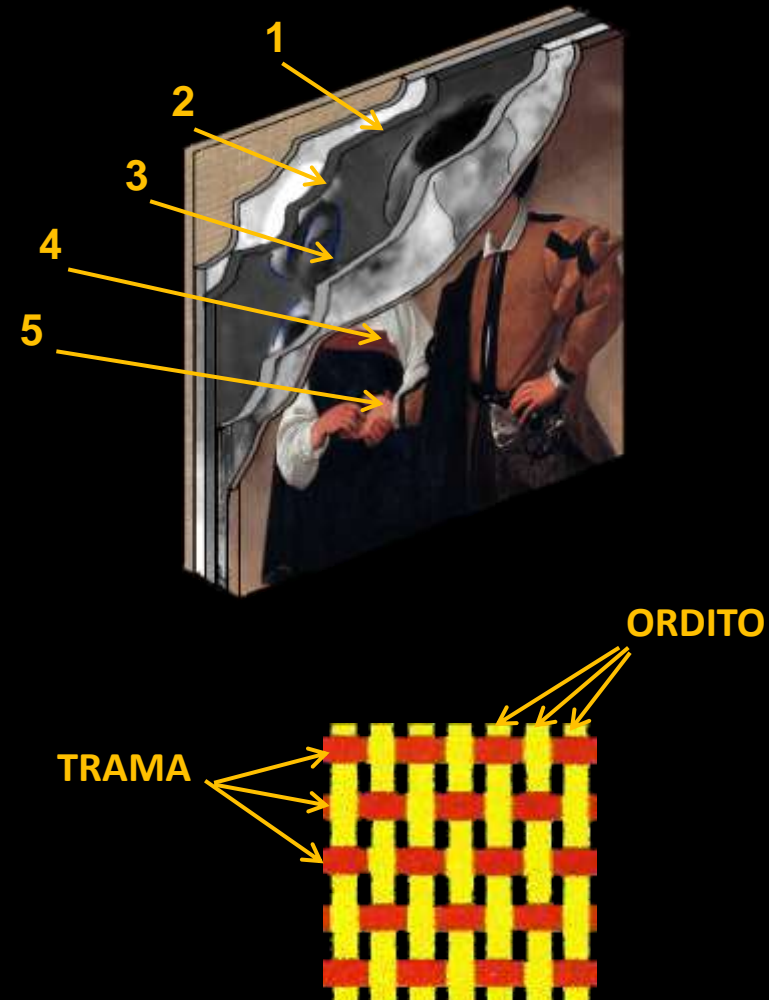


Madonna Huldchinsky (Carlo Crivelli - XV sec.)
tempera e oro su tavola - San Diego Museum of Art

LA STRUTTURA DI UN'OPERA D'ARTE

1. **SUPPORTO** – struttura portante in vari materiali (es. tela o legno)
2. **PREPARAZIONE** – strato di materiale per rendere il supporto idoneo alla pittura (materiali utilizzati: bianco di piombo, nero di carbone, terre etc.)
3. **ABBOZZI e INCISIONI** – tecniche applicate sulla preparazione fresca per segnare l'ingombro delle figure e i lineamenti principali
4. **DISEGNO/COMPOSIZIONE** – abbozzo di profili, panneggi e ombreggiature con carboncino, pennello o punte metalliche morbide
5. **STESURA PITTORICA e VERNICE** – strato di pigmenti in polvere miscelati con leganti (es. olio) coperto con una pellicola pittorica trasparente finalizzata a proteggere l'opera

Il supporto in tela è caratterizzato da un intreccio di due filamenti definiti “trama” e “ordito”

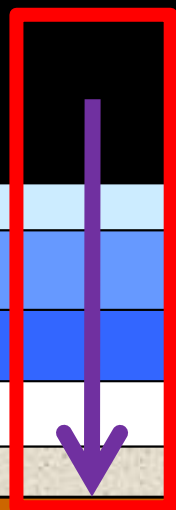


TECNICHE DI ACQUISIZIONE

Tecniche di acquisizione

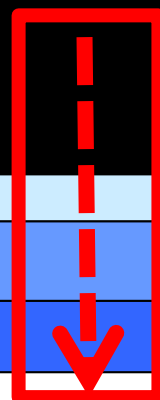
TECNICA INVASIVA

STRATIGRAFIA



TECNICHE NON-INVASIVE

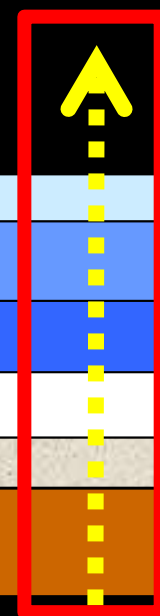
RIFLETTOGRAFIA (IR)



UVF/UVR

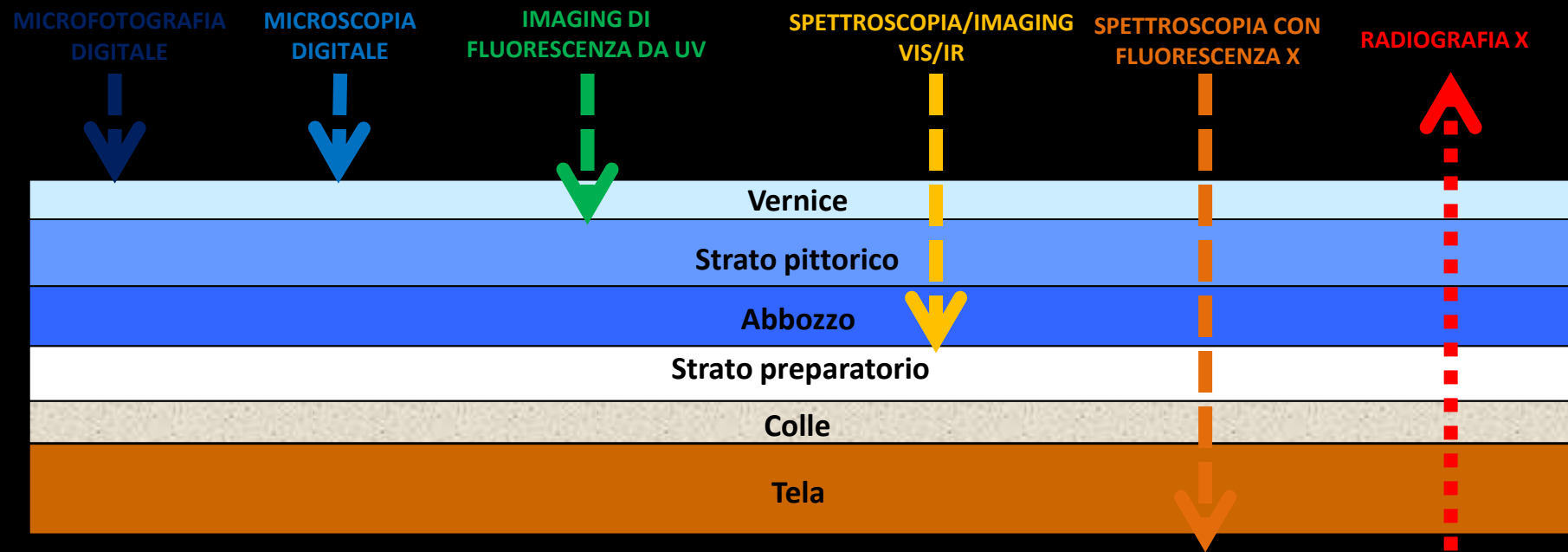


RADIOGRAFIA (X)



DISEGNO
PREPARATORIO

Tecniche di acquisizione



TECNICHE FISICO-CHIMICHE

Carbonio 14

Fenomeno:

Assorbimento dagli esseri viventi del ^{14}C generato dalla reazione di raggi cosmici con azoto gassoso

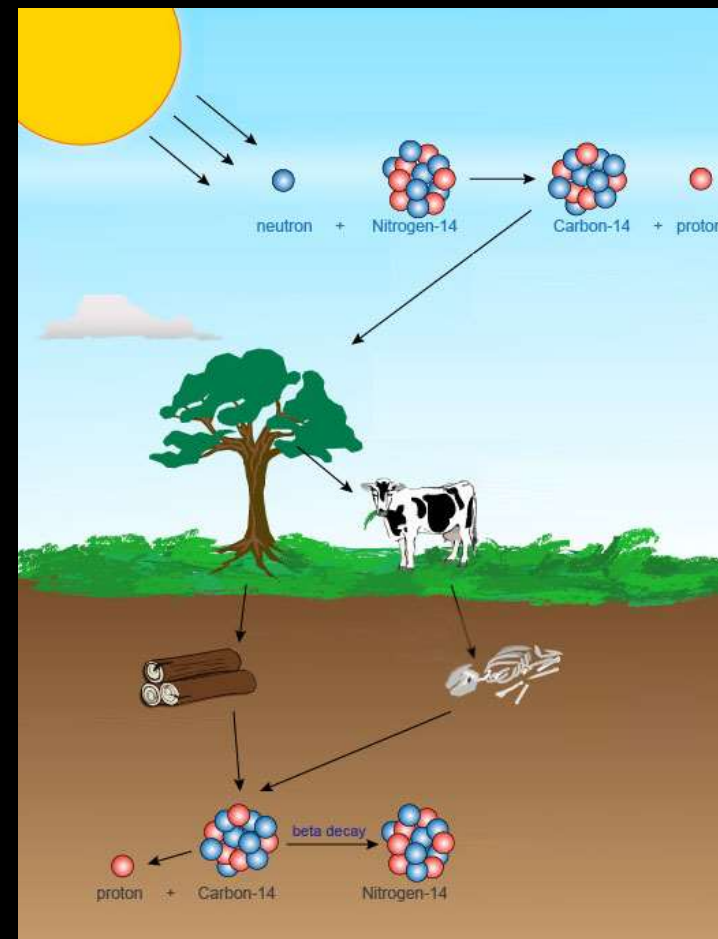
Lento decadimento ^{14}C nel tempo (emivita 5730 anni)

Tecnica:

Conteggio della quantità di ^{14}C alla morte dell'organismo

Applicazione:

Stima dell'età di componenti organiche utilizzate nell'opera d'arte





“Contrast of Forms”: olio su tela (Fernand Léger? 1881-1955, Francia)

Analisi ^{14}C di un frammento della tela privo di colore

La tela è stata creata almeno 4 anni dopo la morte dell'artista

Fenomeno:

L'invecchiamento del legno è proporzionale al numero e alle dimensioni degli anelli interni del fusto

Tecnica:

Studio del numero e delle caratteristiche (es. spessore) degli anelli

Utilizzo:

Datazione del legno impiegato nell'opera





Violino (Antonio Stradivari? 1644-1737, Italia)

Analisi dendrocronologica del legno della tavola armonica

La tavola armonica è stata realizzata in abete rosso nel 1659, compatibile con il periodo della produzione di violini Stradivari (1677-1722)

Analisi di microcampioni

Tecnica:

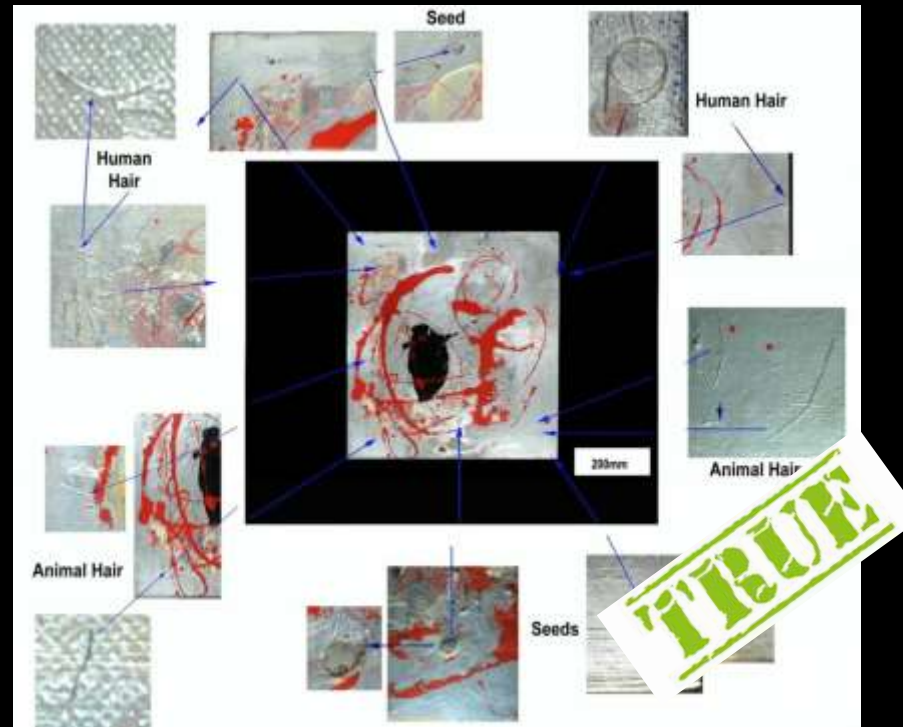
Analisi scientifiche di campioni estratti dalle opere o dai supporti

Utilizzo:

Recupero di informazioni utili all'identificazione dei materiali usati per la realizzazione delle opere o di tracce esterne collegate al luogo della realizzazione (eventuale “scena del crimine”)



Analisi di microcampioni



“Red black and silver”: olio su tela (Jackson Pollock? 1912-1956, Stati Uniti)

Analisi di peli d'animale presenti sullo strato pittorico

Trovati peli d'animale sullo strato pittorico compatibili con alcuni campioni di
tappeto d'orso polare ritrovato nell'atelier dell'artista

Estrazione di minuscolo frammento della pellicola pittorica



**Osservazione al microscopio per scoprire la composizione dei singoli strati
e le fasi di creazione dell'opera**

SPETTROSCOPIA

Spettroscopia VIS/IR

Fenomeno:

La luce nel visibile o nell'IR viene riflessa da materiali diversi in modo diverso

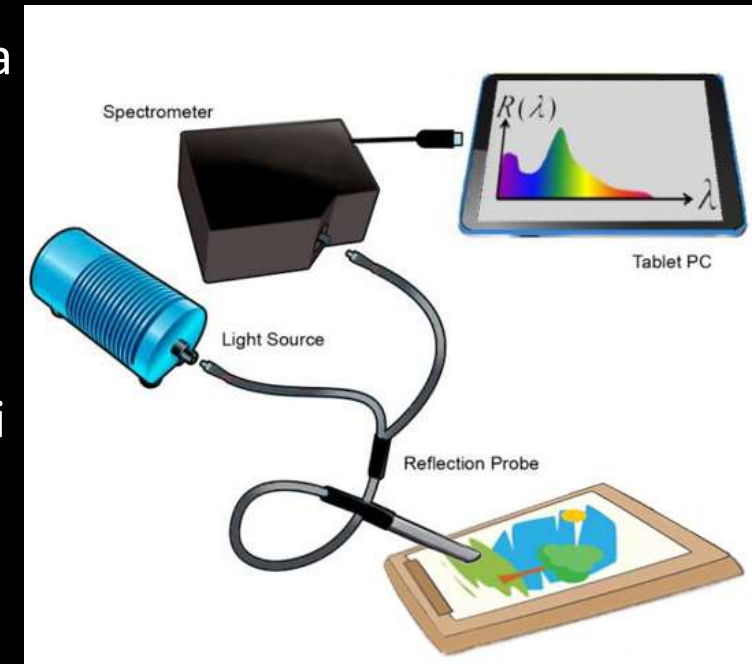
L'energia riflessa viene diffratta da sistemi di prismi ottici e raccolta in uno spettro di riflettanza caratteristico

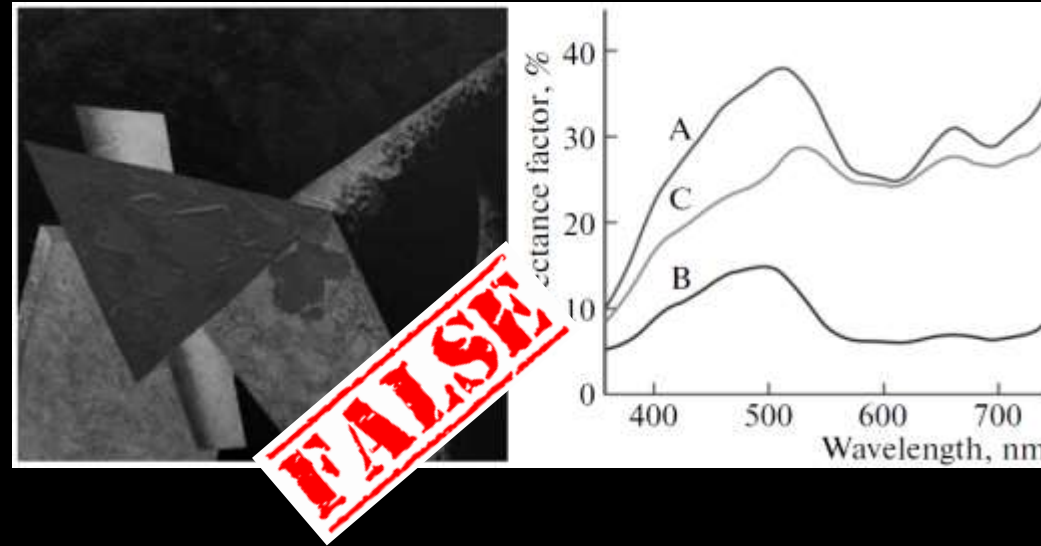
Tecnica:

Illuminazione del p.to con luce di lunghezza d'onda nota (fibra ottica) e raccolta del segnale di luce riflessa in spettro

Applicazione:

Caratterizzazione degli spettri di riflettanza dei materiali presenti sulla superficie o immediatamente sotto la superficie dell'opera

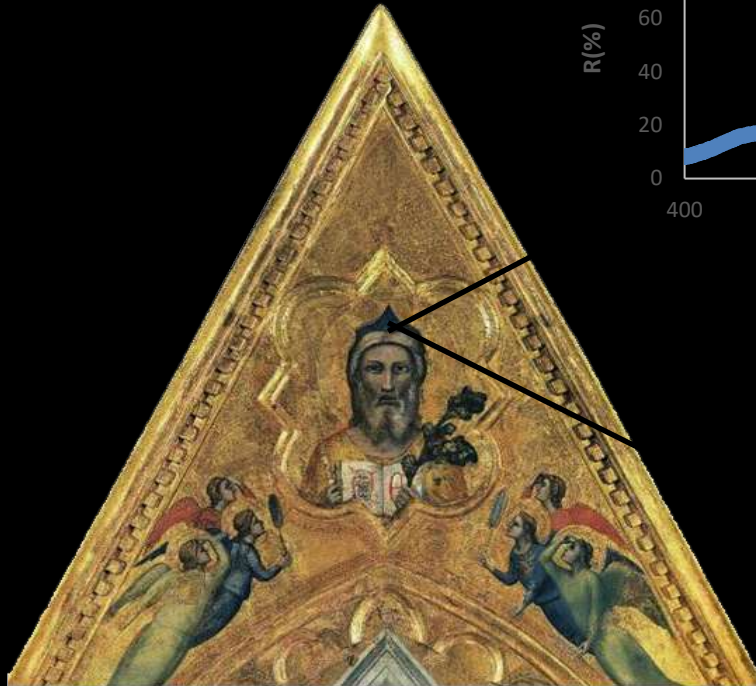




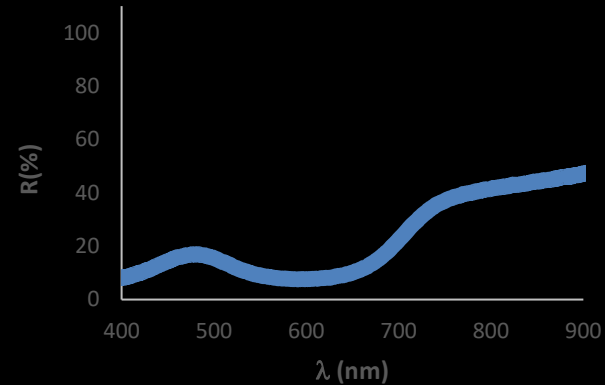
“EL 1920”: Olio su tela (El Lissitsky? 1890-1941, Russia)

Acquisizione di spettri di riflettanza in luce visibile

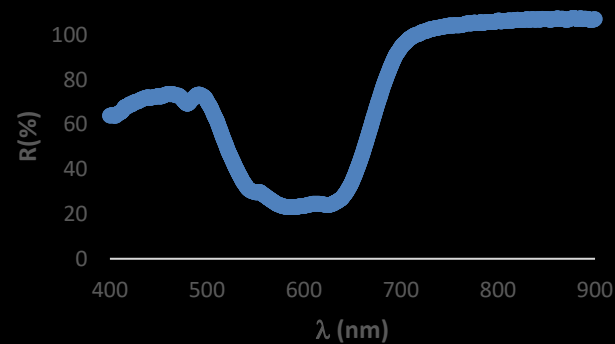
Sono presenti pigmenti realizzati almeno 15 anni dopo la presunta data dell'opera



Oltremare



Blu cobalto



Dio padre e angeli – Giotto (1328)

Le curve di riflettanza mostrano le differenze spettrali tra due blu apparentemente uguali, rivelando l'esecuzione di restauri sulla superficie pittorica

Spettroscopia con fluorescenza X

Fenomeno:

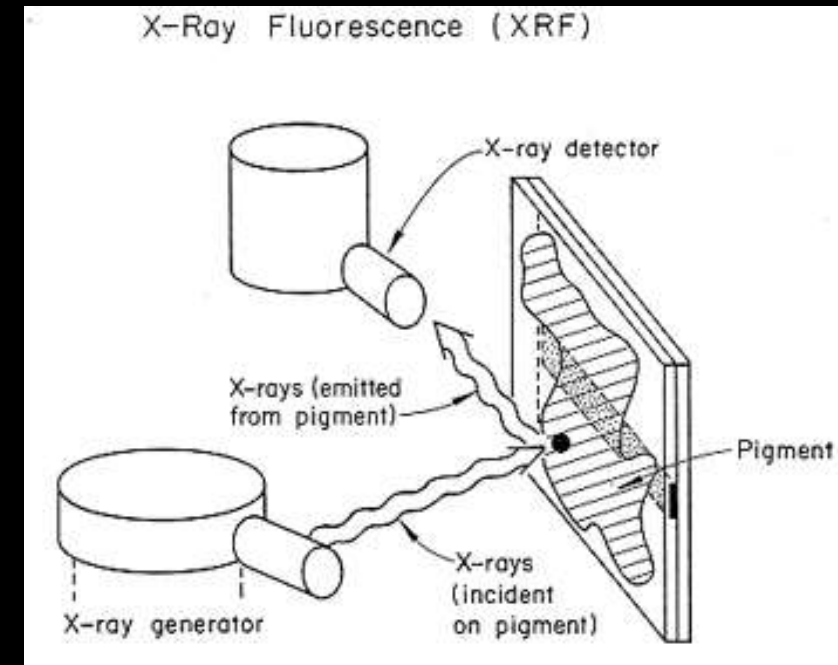
I raggi X possono eccitare gli atomi cedendogli energia
Gli atomi eccitati successivamente riemettono altri
raggi X attraverso fluorescenza con energia
caratteristica rispetto all'atomo che li emette

Tecnica:

Irraggiamento di un punto della superficie con raggi X e
raccolta dei raggi X riemessi in fluorescenza con
spettrometro

Applicazione:

Caratterizzazione degli spettri di fluorescenza X dei
materiali presenti in profondità dell'opera



Spettroscopia con fluorescenza X



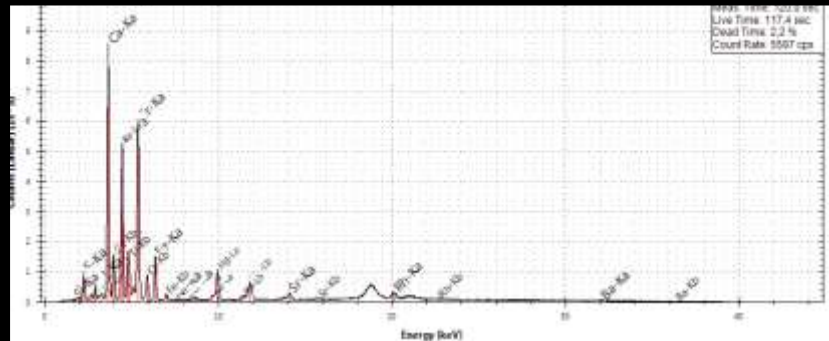
“Cristo con l’adultera”: Vermeer? (1632-1675, Olanda)

Acquisizione di spettri di fluorescenza X

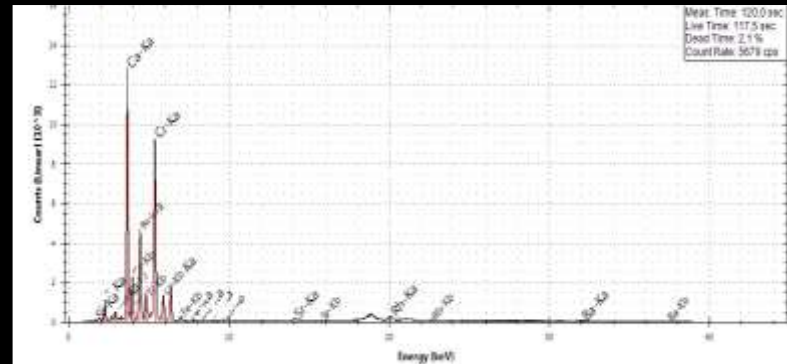
Gli spettri hanno rivelato l’uso di blu cobalto, pigmento scoperto nel 1802. Tale pigmento non può essere stato utilizzato da Vermeer, poiché morto nel 1675.

Spettroscopia con fluorescenza X

Cinabro

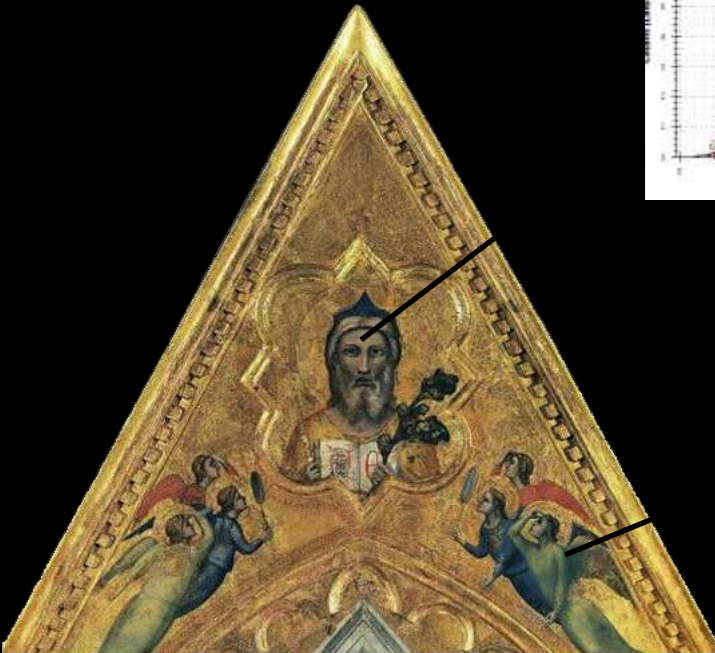


Ossido di Cromo



Dio padre e angeli – Giotto (1328)

Gli spettri di fluorescenza X mostrano la composizione atomica dei pigmenti



Spettroscopia Raman

Fenomeno:

La luce interagisce con le molecole, facendole ruotare e vibrare.

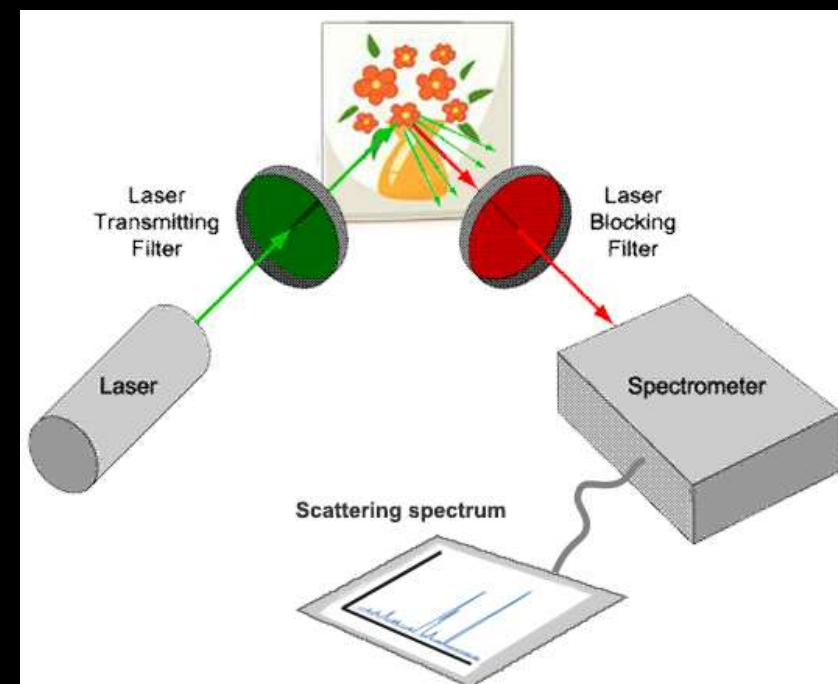
L'energia riemessa dalle molecole viene diffratta da sistemi ottici e raccolta in uno spettro di scattering non-elastico caratteristico

Tecnica:

Illuminazione del p.to con laser di lunghezza d'onda nota e raccolta del segnale di scattering in spettro, escludendo il segnale riflesso del laser

Applicazione:

Caratterizzazione degli spettri di scattering dei materiali presenti sulla superficie o immediatamente sotto la superficie dell'opera





Olio su tela (Kandinsky? 1932, Russia)

Acquisizione di spettri di scattering Raman su microcampioni
Sono presenti pigmenti messi in commercio almeno 30 anni dopo la presunta data
di realizzazione dell'opera

IMAGING

Termografia

Fenomeno:

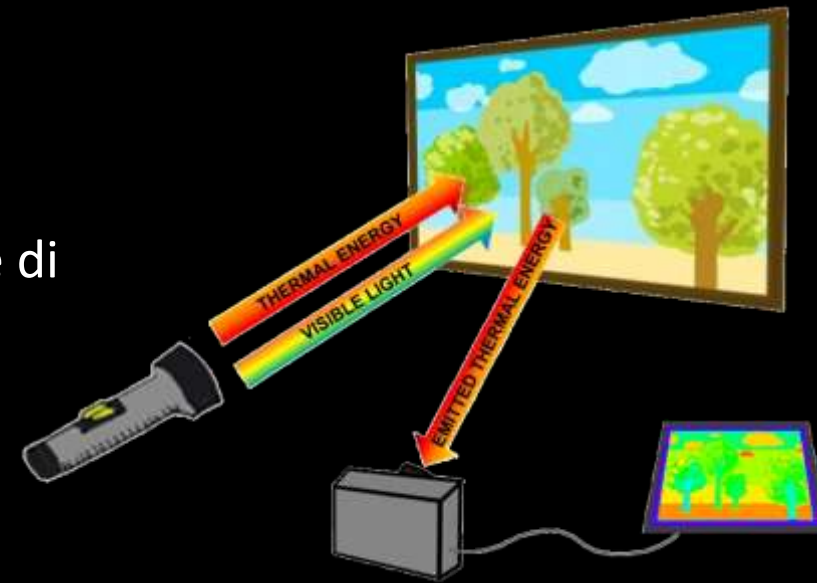
Materiali differenti o discontinui assorbono e rilasciano energia termica con tempistiche differenti.

Tecnica:

Irraggiamento di un materiale con una fonte di calore e raccolta in immagini di radiazioni termiche emesse dal materiale in esame durante/dopo l'irraggiamento

Applicazione:

Studio di discontinuità nei materiali ed eventuali distaccamenti di materiale pittorico



Tecnica:

Acquisizione di ingrandimenti (10x) della
superficie d'opera

Applicazione:

Studio dello stato di invecchiamento,
morfologia e granulometria dei materiali
costituenti la superficie d'opera





Olio su tela (Francisco Goya? 1746-1828, Spagna)

Acquisizione di immagini con microfotografia digitale

Il colore della imprimitura sottostante gli strati di pigmento della pittura è in contrasto con la tecnica dell'artista (imprimitura bianca invece che rossa)

Microscopia digitale

Tecnica:

Osservazione di dettagli ingranditi sulla superficie dell'opera (100x)

Applicazione:

Studio dello stato di invecchiamento, morfologia e granulometria dei materiali costituenti la superficie d'opera





olio su tela (Giorgio Morandi? 1890-1964, Italia)

Acquisizione di immagini in microscopia digitale

L'inchiostro nero della data è penetrato ancora fresco in crepe formatesi naturalmente nella pittura: la data è stata apposta decine di anni dopo la realizzazione del dipinto

Imaging di fluorescenza indotta da UV

Fenomeno:

La luce UV viene assorbita da materiali organici diversi in modo diverso

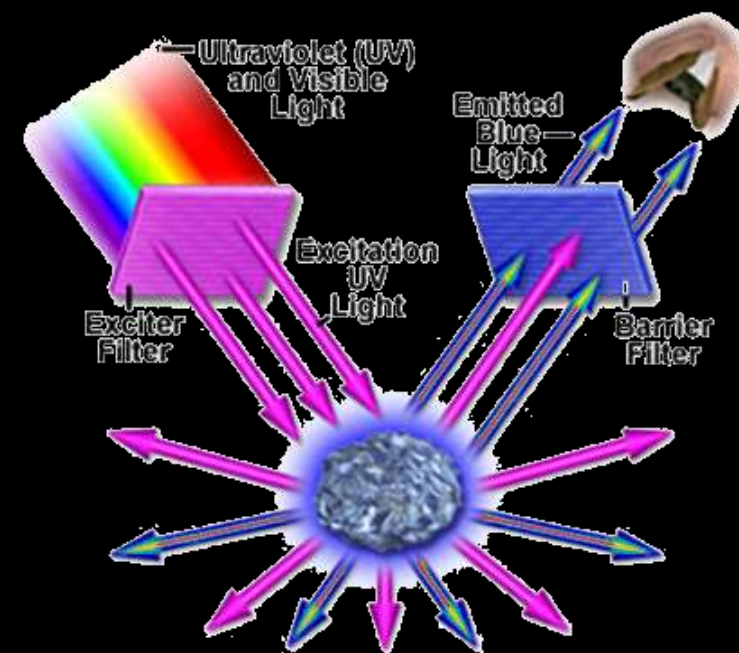
L'energia assorbita viene riemessa come luce di fluorescenza con lunghezza d'onda diversa

Tecnica:

Illuminazione con luce UV dell'opera e acquisizione di immagini di fluorescenza (filtro per schermare la luce UV riflessa)

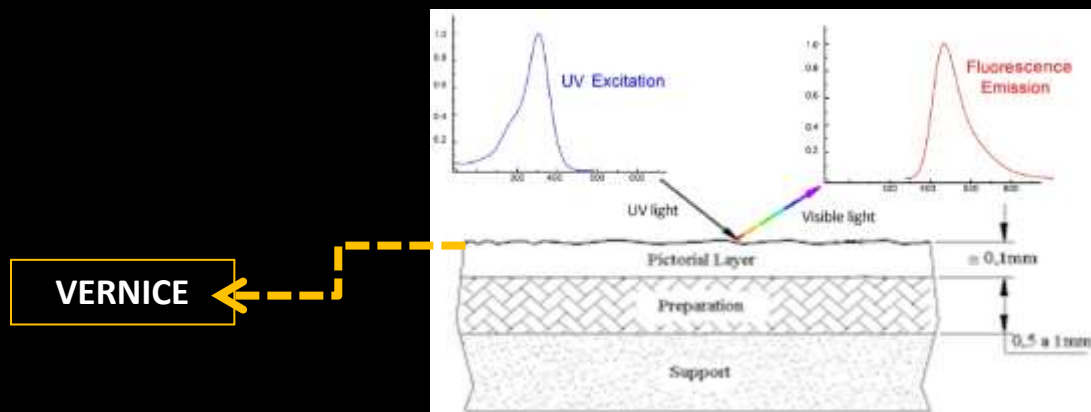
Applicazione:

Studio materico dello strato superficiale dell'opera

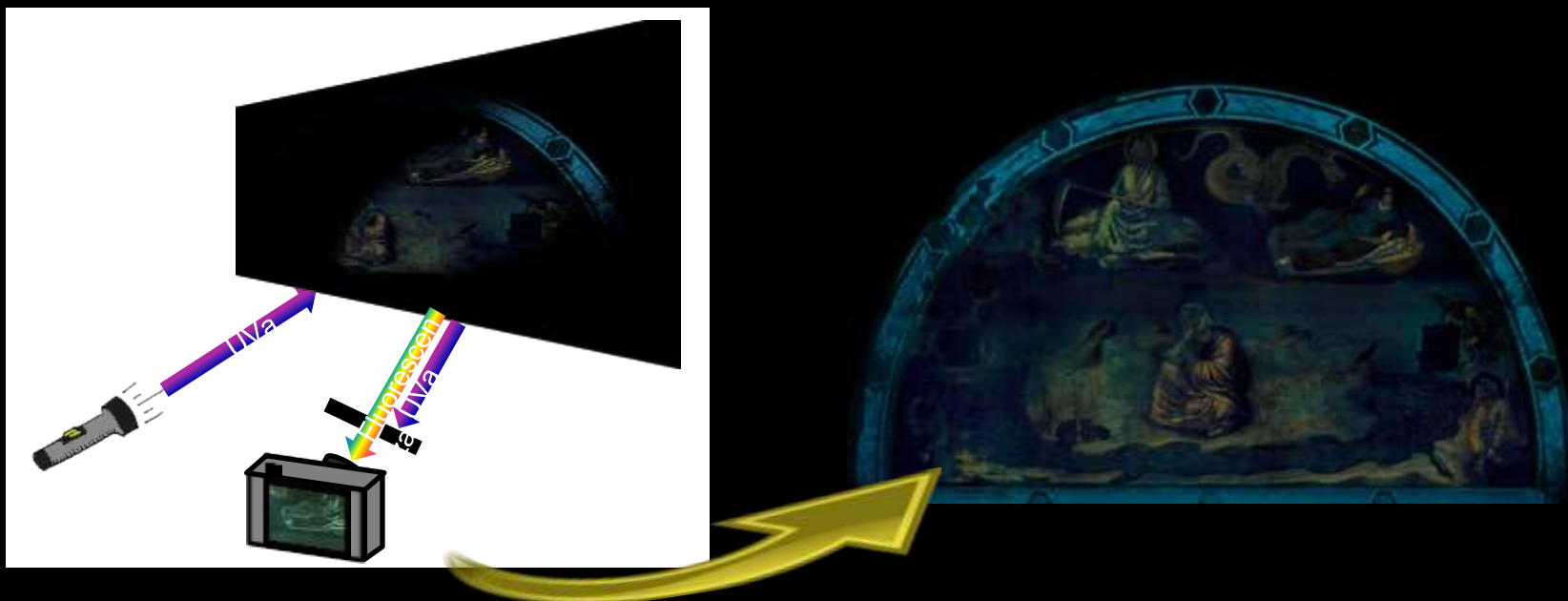


Imaging di fluorescenza indotta da UV

Alcuni materiali sono in grado di assorbire la luce UV ed emettere una fluorescenza in luce visibile



La fluorescenza degli strati superficiali permette di rivelare dettagli cancellati dal tempo o di identificare ritocchi avvenuti in periodi successivi



Imaging di fluorescenza indotta da UV



olio su tela (Gerolamo Induno? 1825-1890, Italia)

Acquisizione di fluorescenza indotta da luce UV

Una macchia di colore appartenente ad un recente ritocco ha la stessa intensità di fluorescenza della firma, rivelando che anche questa è stata aggiunta solo di recente

Imaging di fluorescenza indotta da UV



Ciclo di affreschi della Cappella Peruzzi – Giotto (1318-1322)

La fluorescenza UV mostra tracce di materiali organici e permette di distinguere pigmenti che appaiono simili alla luce visibile



Fenomeno:

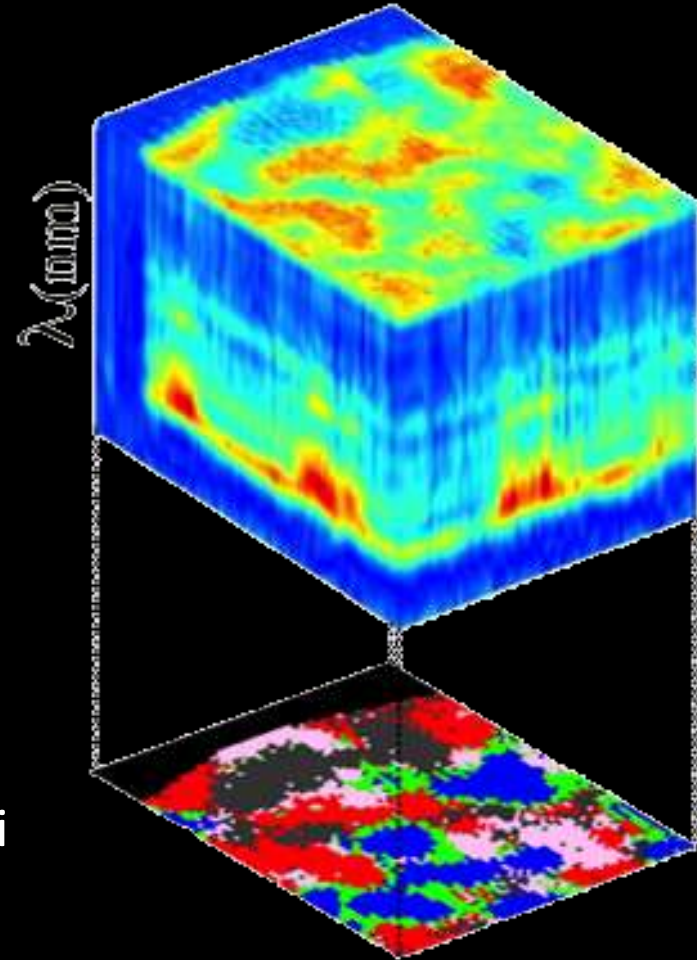
La luce nel visibile o nell'IR viene riflessa da materiali diversi in modo diverso
L'energia riflessa viene diffratta da sistemi di prismi ottici e raccolta in uno spettro di riflettanza caratteristico

Tecnica:

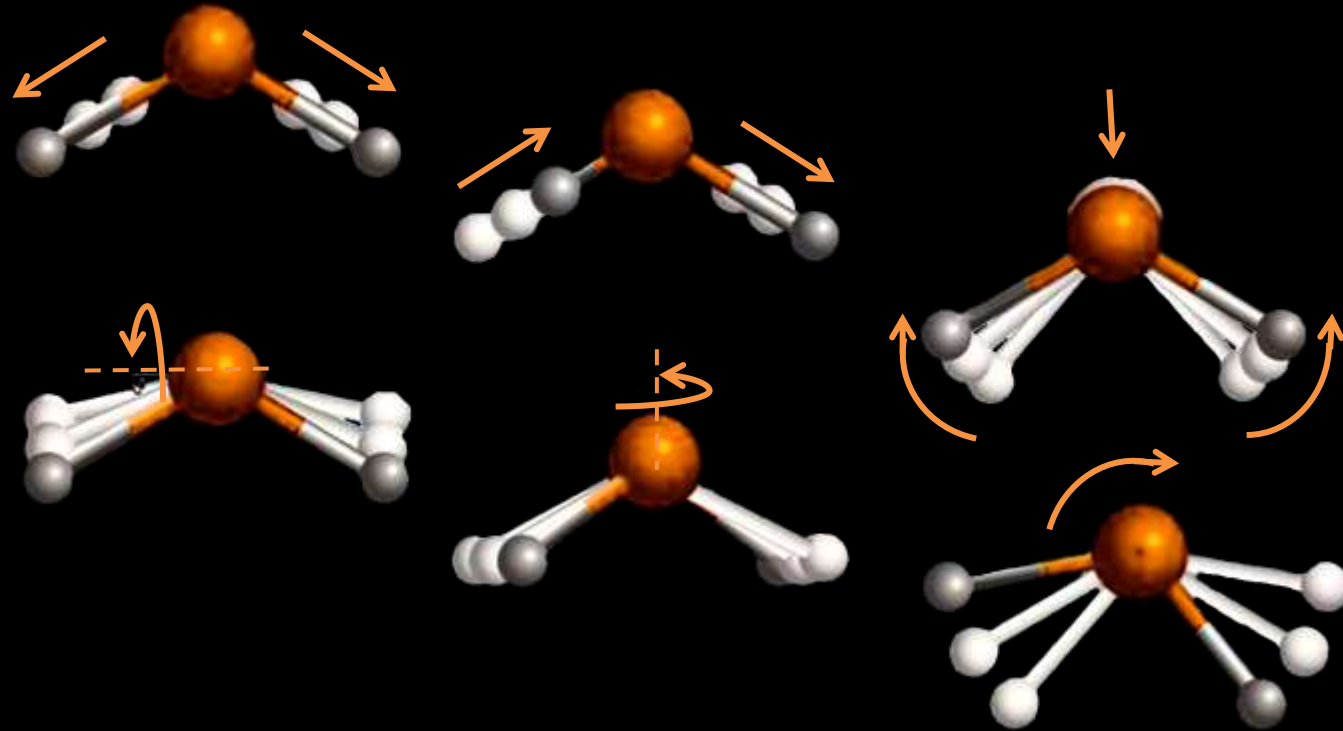
Illuminazione della superficie con luce di lunghezza d'onda nota e raccolta del segnale di luce riflessa in immagini spettrali

Applicazione:

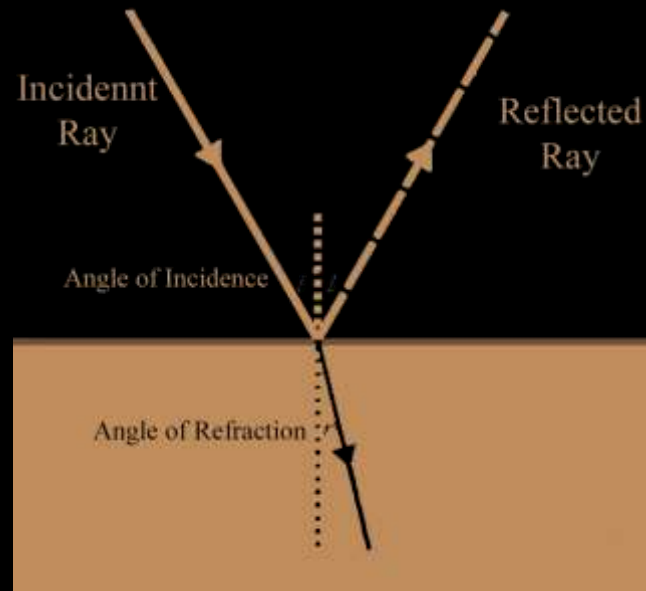
Studio mediante immagini degli spettri dei materiali in superficie o immediatamente al di sotto



Gli InfraRossi interagiscono con la materia a livello molecolare causando vibrazioni



L'indice di rifrazione di un mezzo dipende sia dalle caratteristiche molecolari del mezzo stesso, sia dalla lunghezza d'onda della luce incidente

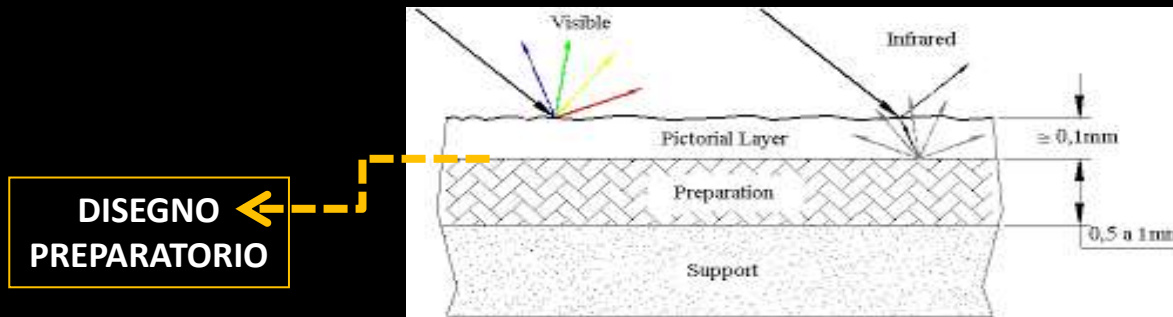


Quindi i materiali possono far passare o riflettere la luce in base alla sua lunghezza d'onda

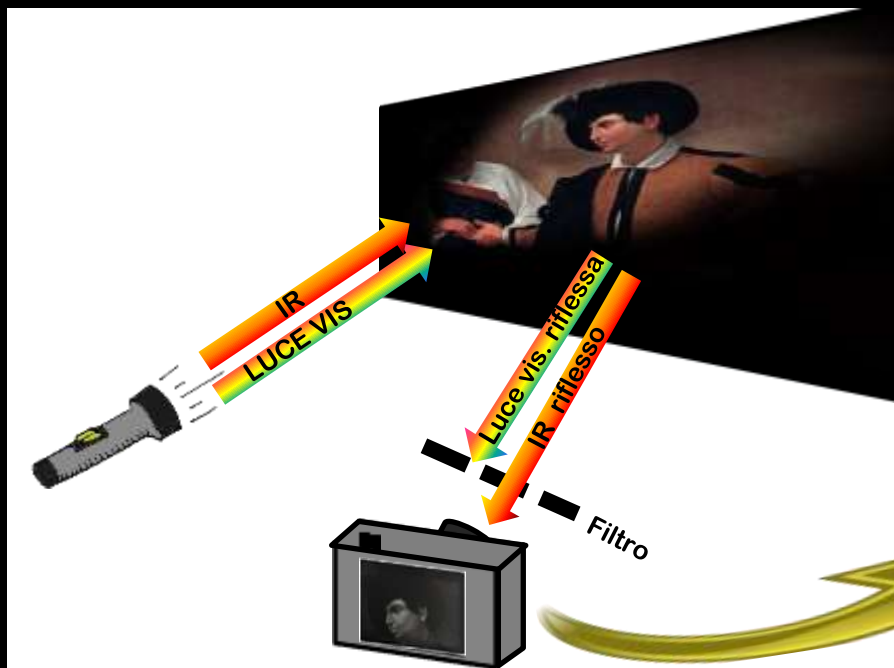
	LAPISLAZZULI	CARBONCINO	ZAFFIRO
Trasparente a luce visibile	NO	SI	NO
Trasparente a IR	NO	NO	SI

Imaging VIS/IR | Riflettografia IR

Molti pigmenti sono trasparenti agli InfraRossi e li lasciano passare



I filtri consentono di vedere solo i materiali che non lasciano passare gli IR
(es. carboncino con il quale spesso viene effettuato il disegno)





*“Madre con bambino in riva al mare”: olio su tela
(Pablo Picasso? 1881-1973, Francia)*

Acquisizione di immagini IR (900-1700nm)

Le immagini IR hanno rivelato l'impronta di un testo di giornale al di sotto dello strato pittorico. Il testo è di un giornale parigino del 17 gennaio 1902, data compatibile con il periodo in cui l'artista si trovava a Parigi

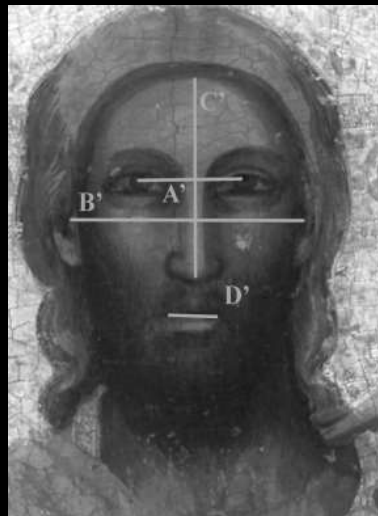
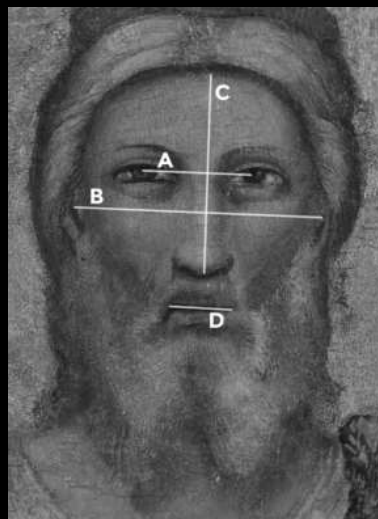


Quarto stato – Pelizza da Volpedo (1901)

L'imaging IR mostra il disegno preparatorio al di sotto dello strato pittorico, rivelando "pentimenti" (es. la struttura sullo sfondo a destra, poi cancellata)



Imaging VIS/IR



Dio padre e angeli – Giotto (1328)

Cristo Benedicente – Giotto (1315)

L'imaging IR mostra i disegni preparatori. Elaborazioni delle immagini dimostrano la forte somiglianza tra i disegni preparatori delle due opere. Somiglianza riscontrata anche nello studio delle proporzioni dei volti

Radiografia X

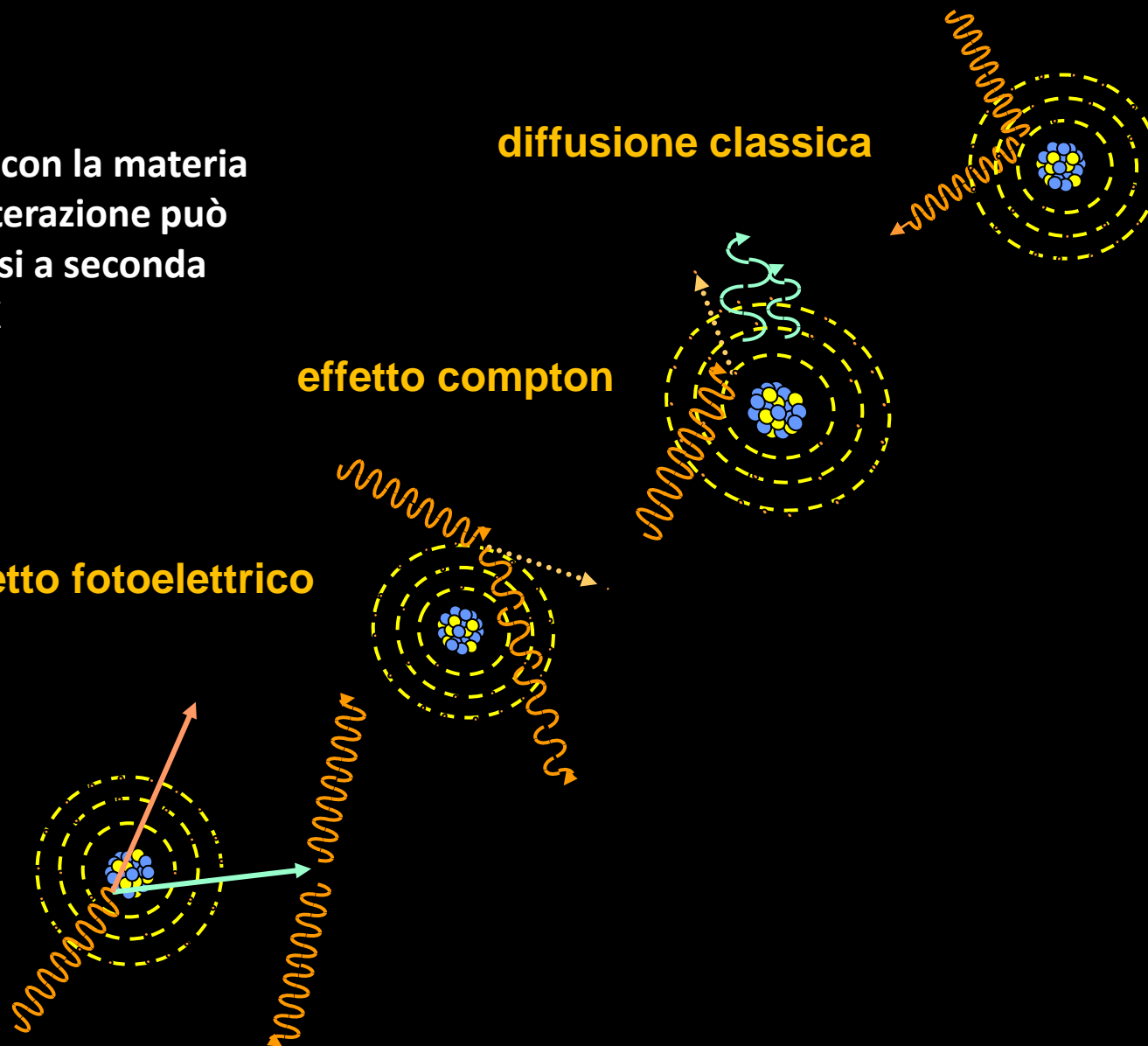
I raggi X interagiscono con la materia a livello atomico e l'interazione può avvenire in modi diversi a seconda dell'energia dei raggi X

produzione di coppie

effetto fotoelettrico

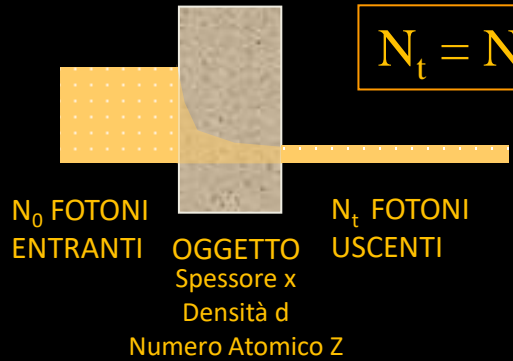
effetto compton

diffusione classica



Radiografia X

Il fascio di raggi X uscente sarà sempre inferiore a quello entrante a causa di queste interazioni



$$N_t = N_0 \exp(-\mu(d, Z)x)$$

Il numero di fotoni uscenti cala all'aumentare dello spessore, della densità e del numero atomico del materiale attraversato



Ferro (Fe) $Z = 26$
Pigmenti bruni (es. terre)

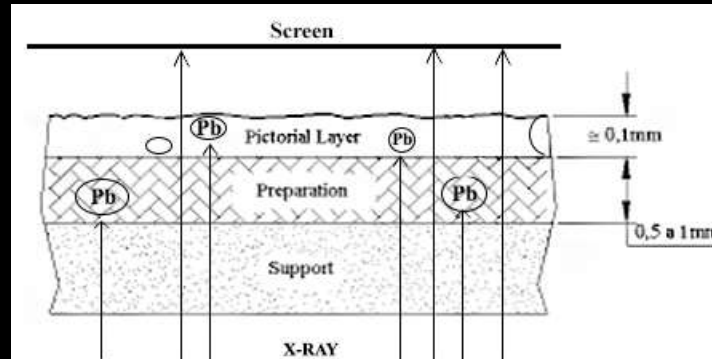


Piombo (Pb) $Z = 82$
Pigmenti chiari (es. bianco di piombo)

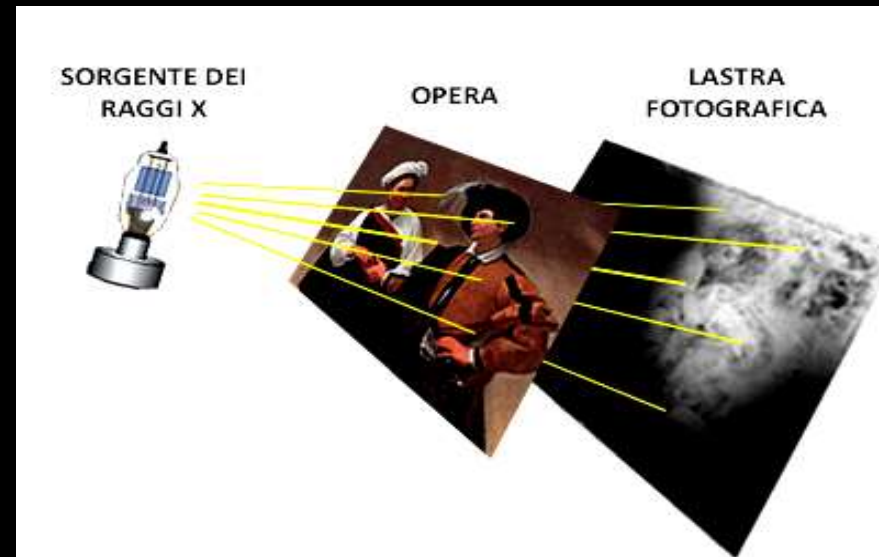
Il ferro ha un numero atomico basso e quindi frena meno raggi X rispetto al piombo che ha un numero atomico molto alto

Radiografia X

I raggi X vengono fermati maggiormente da materiali pesanti (es. Piombo)



I raggi non frenati raggiungono la lastra fotografica e la impressionano



**Le regioni chiare (più radio-opache) indicano una grande presenza di materiali pesanti.
Aree più scure indicano la presenza di materiali più leggeri, non in grado di frenare i raggi X**



TRUE

“Natura morta con fiori di campo e rose”: olio su tela (Vincent Van Gogh? 1853-1890, Olanda)

Immagine radiografica del dipinto

Esiste un altro dipinto sottostante che è attribuibile all'artista come documentato da una lettera al fratello

Radiografia X



Riposo durante la fuga in Egitto – Caravaggio (1594)

La radiografia X rivela elaborazioni precedenti di alcuni elementi dell'opera, poi coperti con nuovi strati pittorici



Buona ventura – Caravaggio (1597)

La radiografia X rivela un altro soggetto al di sotto dell'opera attualmente visibile, indicando un riutilizzo della tela

PROTOCOLLO DI ANALISI



Available online at
ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France
EM|consulte
www.em-consulte.com/en



Original article

Violon. Céret by Pablo Picasso: The case of a lost painting. A methodological approach

Eleonora Maria Stella^a, Susanna Bracci^{a,*}, Roberta Iannaccone^a, Jacopo La Nasa^b,

4.2. Photographic Imaging (VIS/UV/IR)

Photographic images were taken with a modified Canon EOS 400D camera with the low-pass infrared filter removed. The camera was equipped with a 22.2 × 14.8 mm CMOS sensor with an effective resolution of 10.4 MP. Images were recorded at 100 ISO. White balance was set to daylight.

4.3. Fiber Optics Reflectance Spectroscopy (FORS)

FORS [23,24] spectra were acquired using a Tungsten lamp as source and an Ocean Optics spectrometer (model HR2000) equipped with optical fibers. The measuring head with 45° illumination and 0° signal collection allowed the acquisition of the reflectance spectrum of an area of about 1 mm².

4.4. Infrared spectroscopy by Total Reflection (TR-FT-IR) and Attenuated Total Reflection (ATR-FT-IR)

Analyses were performed with a portable Bruker Optics ATR-FT-IR Spectrometer equipped with a germanium crystal detector. The instrument was equipped with a fiber-optic cable for the collection of the infrared signal.

4.5. X-ray fluorescence (XRF)

For X-ray fluorescence measurements [28,29], a portable XRF spectrometer (Bruker, Tracer III SD) with micro X-ray tube with rhodium anode was used. The analysis was performed in the following conditions: 40 kV, 15 mA, 155 mm². The spectral resolution (FWHM) < 145 eV at 59.5 keV. The acquisition time for each sample was 30 s.

4.6. Analyses of microsamples

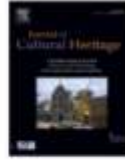
Once sampled, each micro-fragment was further sampled (if possible) with a lancet in order to isolate individual materials. Only from the micro-fragment P1.pr04, polished cross section was prepared by embedding the sample in a bi-component epoxy resin (Epofix, Struers DK).

The cross section was observed with an optical microscope and analysed using SEM-EDS.



Available online at
ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France
EM|consulte
www.em-consulte.com/en



Case study

The Giotto's workshop in the XXI century: looking inside the "God the Father with Angels" gable

Marco Gargano^a, Anna Galli^{b,c,*}, Letizia Bonizzoni^a, Roberto Alberti^d, Nicola Aresi^d, Michele Caccia^{b,c}, Isabella Castiglioni^b, Matteo Interlenghi^b, Christian Salvatore^b, Nicola Ludwig^a, Marco Martini^c

^a Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Milano, via Celoria 16, 20133 Milano, Italy

^b CNR-IBFM, via F.lli Cervi 93, 20090 Segrate (MI), Italy

^c Dipartimento di Scienza dei Materiali, Università degli Studi di Milano-Bicocca, via R. Cozzi 53, 20125 Milano (IT) and INFN, Sezione Milano-Bicocca, Italy

^d XCLab s.r.l. via Conte Rosso 23, 20134 Milano, Italy

3.2. Equipment and settings

Starting from the consideration that the panel cannot be moved from its exhibition place and that the in situ analyses must be compliant with the exhibition hours, we chose synergic and complementary analytical techniques to get information about the stratigraphic sequence of pictorial material and the underdrawing study. The image processing was simultaneously performed so that the results achieved have been ready for the public to enjoy before the end of the exhibition.

3.2.1. Pigment analyses

3.2.1.1. EDXRF. The instrument used in this study is a portable Energy Dispersive XRF (EDXRF) spectrometer (ELIO, produced by XGLab SRL), with elemental mapping capability (MA-XRF scan, Fig. 1a). Elío is based on a large area Silicon Drift Detector (SDD) of 25 mm² coupled with state-of-art electronics and on a low-power (4 W) transmission X-Ray tube with Rh anode equipped with a pin-hole collimator of 1 mm diameter to create an X-Ray beam on the sample of the order of 1.2 mm diameter. The instrument is specifically designed to operate in a complete non-contact mode, with a typical distance of 14 mm between the detection head and the sample. The compact detection head can be installed on an X-Y motorized translator stage (100 mm × 100 mm total travel) to perform automatic scans and analysis of the selected area or line. All the system is mounted on a standard and light tripod with a grip ball for free 3D positioning of the instrument.

A total amount of 19 single point measurements (50 kV, 80 µA, 120 sec) have been performed and analysed in order to accurately identify the elemental composition of the pigments (Fig. 2a, b, c). Moreover, mapping measurements have been performed to collect statistical information on the elemental distribution and possible correlation keeping the same settings for the X-ray tube (50 kV and 80 µA) and an acquisition dwell time of 1 s for each point. The

Fig. 1. (a) EDXRF spectrometer (ELIO).

3.2.1.2. FORS. Portable visible-near infrared (Vis-NIR) spectrophotometer (HR4000, Ocean Optics) was used on the same single points of EDXRF analysis (Fig. 1b) [26]. The spectrophotometer was connected to a tungsten halogen light source (D65, HL2000, Ocean Optics); radiation was transmitted through a quartz fibre optics bundle 1.5-meter-long (Ocean Optics), composed by six fibres to collect reflected light around the single central illuminating fibre using 45° × 45° measuring geometry. It was also connected to a laptop and calibrated using white and black reflectance standards (Spectralon® 99% and dark trap). Vis-NIR reflectance spectrum from 380 nm to 1000 nm was acquired for each sample (spectral resolution of 2.7 nm, Fig. 2a, b, c).

3.2.2. High resolution imaging techniques

3.2.2.1. Infrared false colour. The IRFC (Infrared False Colour) imaging analysis have been performed using a DSLR full frame Nikon D800E camera (4912 × 7360 pixel, raw image, X-Rite ColorChecker for white and colour profile calibration) modified to extend its sensibility from UV to NIR (350–1000 nm, Fig. 1c). An interference long-pass filter ($\lambda > 850$ nm) was used to cut the visible wavelengths. The resulting images have a spatial resolution of 700 pixel/inch (28 points/mm). The acquisition and the post processing to obtain IRFC images has been performed with the traditional experimental set up and procedures [7].

3.2.2.2. Infrared reflectography. IR reflectography (IRR) has been performed with a portable scanning system prototype based on a spherical scanning system [27]: an InGaAs camera (Xenics Xeva-1.7-320, 320 × 256 elements, spectral sensitivity: 1000–1700 nm) is mounted on a motorized head that allows precise and small movements (0.01° resolution for the rotations and 0.1 mm for the linear stage). This system allows to acquire IR images corresponding to a surface up to 1 m × 1 m with a resolution of 256 pixels per

AUTHENTIC: COMPUTERIZED BRUSHSTROKE ANALYSIS

Igor E. Berezhnoy Eric O. Postma H. Jaap van den Herik

Institute for Knowledge and Agent Technology (IKAT)
Maastricht University, Maastricht, The Netherlands.

ABSTRACT

The paper provides insights into our efforts to develop techniques for the analysis of visual art. The AUTHENTIC project aims at creating a collection of software tools to support art experts in their assessments of the authenticity of paintings. We describe our progress on the automatic analysis of the visual texture of the paintings of Vincent van Gogh. The texture-analysis technique reveals two main clusters of brushstroke shapes used in the paintings by Van Gogh. These qualifying results lead us to conclude that the use of advanced digital analysis techniques will change the way in which the authentication of visual art is performed.

digitized paintings of Vincent van Gogh. The outline of the paper is as follows. Section 2 presents our qualifying results on the brushstroke analysis applied to the same collection of paintings. Then, in section 3 we discuss how our analysis techniques will change the way authentication and art analysis will be performed in the near future. Finally, in section 4 we draw conclusions.

2. THE AUTOMATIC ANALYSIS OF BRUSHSTROKE TEXTURE

Texture is the second visual feature for which we developed an analysis technique. This feature reflects the statistical properties of small image regions. The statistical properties are dominated by visual contours, i.e.,

0-7803-9332-5/05/\$20.00 ©2005 IEEE

Boosting multi-feature visual texture classifiers for the authentication of Jackson Pollock's drip paintings

Mahmoud Al-Ayyoub,^a Mohammad T. Irfan^a and David G. Stork^b

^aDepartment of Computer Science, Stony Brook University, Stony Brook NY 11794 USA

^bRicoh Innovations, 2882 Sand Hill Road Suite 115, Menlo Park CA 94025 USA

SPIE proceedings on Computer Vision and Image Analysis of Art II, vol. 7869, 78690H (2009).



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Pattern Recognition Letters 28 (2007) 695–702

Pattern Recognition
Letters

www.elsevier.com/locate/patrec

Authenticating Pollock paintings using fractal geometry

R.P. Taylor ^{a,*}, R. Guzman ^a, T.P. Martin ^a, G.D.R. Hall ^a, A.P. Micolich ^b, D. Jonas ^b,
B.C. Scannell ^a, M.S. Fairbanks ^a, C.A. Marlow ^a

^a Physics Department, University of Oregon, Eugene, OR 97403, USA

^b School of Physics, University of New South Wales, Sydney, NSW 2052, Australia

Available online 13 October 2006

Hierarchical Classification of Paintings Using Face- and Brush Stroke Models *

Robert Sablatnig, Paul Kammerer and Ernestine Zolda
Vienna University of Technology, Institute of Automation,
Pattern Recognition and Image Processing Group
Treitlstraße 3/183/2, A-1040 Vienna, Austria

14th International Conference in Pattern Recognition (ICPR 1998)

C. Richard Johnson, Jr., Ella Hendriks, Igor J. Berezhtoy, Eugene Brevdo,
Shannon M. Hughes, Ingrid Daubechies, Jia Li, Eric Postma, and James Z. Wang

Image Processing for Artist Identification

[Computerized analysis of Vincent van Gogh's painting brushstrokes]

IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE [38] JULY 2008

IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, VOL. 34, NO. 6, JUNE 2012

1159

Rhythmic Brushstrokes Distinguish van Gogh from His Contemporaries: Findings via Automated Brushstroke Extraction

Jia Li, *Senior Member, IEEE*, Lei Yao, *Student Member, IEEE*, Ella Hendriks, and James Z. Wang, *Senior Member, IEEE*

Towards Automated Classification of Fine-art Painting Style: a Comparative Study

Ravneet Singh Arora and Ahmed Elgammal
Department of Computer Science, Rutgers University, NJ, USA

21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2012)
November 11-15, 2012. Tsukuba, Japan

Off-Line Skilled Forgery Detection Using Stroke and Sub-stroke Properties

Jinhong K. Guo
Panasonic Information and Networking
Technologies Laboratory
2 Research Way, Princeton, NJ 08540

David Doermann, Azriel Rosenfeld
Language And Media Processing Laboratory
University of Maryland
College Park, MD 20742-3275

Pattern Recognition, 2000. Proceedings. 15th International Conference, volume 2, pages 355–358. IEEE, 2000.

DETECTION OF FORGERY IN PAINTINGS USING SUPERVISED LEARNING

Güngör Polatkan, Sina Jafarpour, Andrei Brasoveanu, Shannon Hughes, Ingrid Daubechies

Departments of Electrical Engineering, Computer Science, and Mathematics
Princeton University, Princeton, NJ 08544

978-1-4244-5654-3/09/\$26.00 ©2009 IEEE

Canvas Matches in Vermeer: A Case Study in the Computer Analysis of Fabric Supports

WALTER LIEDTKE

Curator, Department of European Paintings, The Metropolitan Museum of Art

C. RICHARD JOHNSON JR.

Geoffrey S. M. Hedrick Senior Professor of Engineering, Cornell University

DON H. JOHNSON

J. S. Abercrombie Professor Emeritus of Electrical and Computer Engineering, Rice University

Metropolitan Museum Journal 47

© 2012 The Metropolitan Museum of Art, New York

Rhythmic Brushstrokes Distinguish van Gogh from His Contemporaries: Findings via Automated Brushstroke Extraction

Jia Li, *Senior Member, IEEE*, Lei Yao, *Student Member, IEEE*, Ella Hendriks, and
James Z. Wang, *Senior Member, IEEE*

Canvas Matches in Vermeer: A Case Study in the Computer Analysis of Fabric Supports

WALTER LIEDTKE

Curator, Department of European Paintings, The Metropolitan Museum of Art

C. RICHARD JOHNSON JR.

Geoffrey S. M. Hedrick Senior Professor of Engineering, Cornell University

DON H. JOHNSON

J. S. Abercrombie Professor Emeritus of Electrical and Computer Engineering, Rice University

Metropolitan Museum Journal 47

© 2012 The Metropolitan Museum of Art, New York

Towards Automated Classification of Fine-art Painting Style: a Comparative Study

Ravneet Singh Arora and Ahmed Elgammal

Department of Computer Science, Rutgers University, NJ, USA

21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2012)
November 11-15, 2012. Tsukuba, Japan

Picasso, Matisse, or a Fake?
Automated Analysis of Drawings at the Stroke Level
for Attribution and Authentication*

Ahmed Elgammal^{1,2 †}, Yan Kang¹, Milko Den Leeuw³

¹ Artrendex LLC., NJ, USA[†]

² Department of Computer Science, Rutgers University, NJ, USA

³ Atelier for Restoration & Research of Paintings (ARRS),
The Hague, The Netherlands

November 13, 2017

*This paper is an extended version of a paper that will be published on the 32nd AAAI conference on Artificial Intelligence, to be held in New Orleans, USA, February 2-7, 2018

100% Accuracy!

Picasso, Matisse, or a Fake? Automated Analysis of Drawings at the Stroke Level for Attribution and Authentication*

Ahmed Elgammal^{1,2} †, Yan Kang¹, Milko Den Leeuw³

¹ Artrendex LLC., NJ, USA[†]

² Department of Computer Science, Rutgers University, NJ, USA

³ Atelier for Restoration & Research of Paintings (ARRS),
The Hague, The Netherlands

November 13, 2017

*This paper is an extended version of a paper that will be published on the 32nd AAAI conference on Artificial Intelligence, to be held in New Orleans, USA, February 2-7, 2018

Table 1: Dataset collection: technique distribution

Technique	Pen/brush (ink)	Etching	Pencil	Drypoint	Lithograph	Crayon	Charcoal	Unknown	Total
Picasso	80	38	8	2	2	0	0	0	130
Matisse	45	10	5	2	14	1	0	0	77
Schiele	0	0	10	0	0	5	4	17	36
Modigliani	0	0	9	0	0	8	1	0	18
Others	20	0	0	0	9	4	1	2	36
Total	145	48	32	4	25	18	6	19	297
Strokes	36,533	19,645	9,300	914	6,180	4,648	666	2,204	80,090
Others: Georges Braque, Antoine Bourdelle, Massimo Campigli, Marc Chagall, Marcel Gimond, Alexej Jawlensky, Henri Laurens, Andre Marchand, Albert Marquet, Andr Masson, Andre Dunoyer Dr Segonzac, Louis Toughague									



Figure 3: Examples of images of the fake dataset mixed up with real images of drawings by Matisse, Picasso, and Schiele. See the key at the end of the document to tell which are real and which are fake!

Stroke Segmentation

Picasso, Matisse, or a Fake? Automated Analysis of Drawings at the Stroke Level for Attribution and Authentication*

Ahmed Elgammal^{1,2} †, Yan Kang¹, Milko Den Leeuw³

¹ Artrendex LLC., NJ, USA†

² Department of Computer Science, Rutgers University, NJ, USA

³ Atelier for Restoration & Research of Paintings (ARRS),
The Hague, The Netherlands

November 13, 2017

*This paper is an extended version of a paper that will be published on the 32nd AAAI conference on Artificial Intelligence, to be held in New Orleans, USA, February 2-7, 2018

Hand-crafted Features

Shape of the boundary: The shape of the boundary is described by Fourier descriptors, which are widely used in image processing, such as character recognition and object recognition. These descriptors are proven to be invariant to translation, rotation, and scaling [14]. We used 40 amplitude and phase points [14].

Reconstruction error profile: The shape of the boundary is approximated by Fourier series harmonics used to approximate the boundary. The reconstruction error at each step is the contour and the negative space. The reconstruction error at each step is the shape of the stroke. The reconstruction error is the width in pixels to obtain a description of the stroke.

Contour Curvature descriptor: The first and second derivatives of the angle and curvature are represented by their histograms.

Stroke thickness profile: To quantify the deviation of the rib length around the mean, the standard deviation of the rib length measurements are used.

Stroke Length: The length of the stroke is normalized to the canvas diagonal length. The

Deep Learned Features

Picasso, Matisse, or a Fake? Automated Analysis of Drawings at the Stroke Level for Attribution and Authentication*

Ahmed Elgammal^{1,2} †, Yan Kang¹, Milko Den Leeuw³

¹ Artrendex LLC., NJ, USA†

² Department of Computer Science, Rutgers University, NJ, USA

³ Atelier for Restoration & Research of Paintings (ARRS),
The Hague, The Netherlands

November 13, 2017

*This paper is an extended version of a paper that will be published on the 32nd AAAI conference on Artificial Intelligence, to be held in New Orleans, USA, February 2-7, 2018

Drawing classification:

iven drawing is classified by aggregating the ou
l four different strategies for aggregating the str

- *Majority Voting:* In this strategy each stroke v
regardless of the certainty of the output of the
- *Posterior aggregate:* In this strategy each st
class probability. This results in reducing th
high certainty by the stroke classifier.
- *k-certain voting:* In this strategy, only the stro
k are allowed to vote. This eliminates effect c
- *certainty weighted voting:* In this strategy
function based on the certainty of the stroke c

5.2 Stroke Classification

Evaluation Methodology: In all experiments the image datasets were split into five 80/20% folds to perform five-fold cross validation. Since strokes from the same drawings might share similar characteristics, we did this splits at the image level and not at the stroke level. For each fold, after splitting the images to train and test sets, equal number of strokes were sampled for each artist class for training and testing to avoid the bias in the data, which is significant in our case. We evaluated different classification settings including pair-wise classification, and one-vs-all classification, and multi-class classification. Extensive ablation studies are also performed to evaluate the different features and their effects, as well as to choose the optimal settings.

Picasso, Matisse, or a Fake? Automated Analysis of Drawings at the Stroke Level for Attribution and Authentication*

Ahmed Elgammal^{1,2} †, Yan Kang¹, Milko Den Leeuw³

¹ Artrendex LLC., NJ, USA[†]

² Department of Computer Science, Rutgers University, NJ, USA

³ Atelier for Restoration & Research of Paintings (ARRS),
The Hague, The Netherlands

November 13, 2017

*This paper is an extended version of a paper that will be published on the 32nd AAAI conference on Artificial Intelligence, to be held in New Orleans, USA, February 2-7, 2018

Table 3: Validation of Stroke Classifier - Technique specific (Picasso vs Matisse)

Ink Drawing (Pen/Brush) (Picasso vs Matisse)		
Approach	Train	Test
Hand-Crafted - SVM-RBF	87.99% (0.39%)	79.16% (0.26%)
Hand-Crafted - SVM-POLY	79.88% (0.14%)	77.17% (0.58%)
GRU	84.92 % (1.89%)	65.86 (13.58 %)
Etching Prints (Picasso vs Matisse)		
Approach	Train	Test
Hand-Crafted - SVM-RBF	94.53% (0.22%)	84.18% (0.85 %)
Hand-Crafted - SVM-POLY	94.27% (0.21%)	93.09% (0.88%)
GRU	83.74% (4.60 %)	75.08% (8.11%)

Table 4: Validation of Stroke Classifiers - One-vs-All

Across-Techniques - Mean (std) of five folds							
Classifier	technique	Hand-crafted + SVM		GRU		Combined	
		train	test	train	test	train	test
Picasso vs. all	All	72.59% (1.19 %)	67.26% (8.37 %)	81.92% (2.59 %)	75.09% (5.09%)	86.05% (1.08 %)	78.54% (4.36 %)
Matisse vs. all	All	65.83% (1.72 %)	60.61% (8.71%)	81.01% (3.41 %)	72.68% (5.58 %)	87.92% (1.73%)	77.08% (4.33%)
Schiele vs. all	All	84.76% (0.91%)	81.49% (3.30 %)	85.55% (1.74 %)	78.54% (8.77%)	91.85% (0.87 %)	86.20 % (3.78%)
Technique-specific - Mean (std) of five folds							
Classifier	Technique	Hand-crafted + SVM		GRU		Combined	
		train	test	train	test	train	test
Picasso vs. all	Pen/Ink	73.20% (2.21%)	68.93% (7.04%)	84.08% (2.20%)	72.24% (1.87 %)	88.40% (1.19%)	75.92% (4.22%)
Matisse vs. all	Pen/Ink	73.35% (1.99 %)	70.08% (7.94%)	86.88% (1.98 %)	75.03% (6.47%)	91.56% (1.03%)	79.10% (6.65 %)
Schiele vs. all	Pencil	82.58% (2.78%)	75.39% (20.64 %)	94.33% (3.52 %)	69.60% (20.62 %)	91.30% (4.57 %)	72.93% (19.67 %)

Picasso, Matisse, or a Fake? Automated Analysis of Drawings at the Stroke Level for Attribution and Authentication*

Ahmed Elgammal^{1,2} †, Yan Kang¹, Milko Den Leeuw³

¹ Artrendex LLC., NJ, USA[†]

² Department of Computer Science, Rutgers University, NJ, USA

³ Atelier for Restoration & Research of Paintings (ARRS),
The Hague, The Netherlands

November 13, 2017

*This paper is an extended version of a paper that will be published on the 32nd AAAI conference on Artificial Intelligence, to be held in New Orleans, USA, February 2-7, 2018

Table 6: Validation of Drawing Classifiers - - One-vs-All -Across Techniques

Across-Techniques									
	Picasso-vs-All			Matisse-vs-All			Schiele-vs-All		
Aggregation	Hand-crafted	GRU	Combined	Hand-crafted	GRU	Combined	Hand-crafted	GRU	Combined
Majority	66.67%	76.77%	82.49%	54.88%	81.14%	80.47%	74.41%	82.49%	81.82%
Posterior	67.68%	77.44%	81.48%	56.90%	81.48%	79.12%	74.75%	83.50%	82.49%
85%-certain	73.06%	79.80%	82.83%	38.05%	80.47%	78.79%	75.42%	83.50%	83.84%
Certainty-weighted	67.34%	79.80%	82.83%	58.25%	80.81%	80.47%	75.42%	85.19%	83.16%
Detection of Fake Drawings									
	Picasso-vs-All			Matisse-vs-All			Schiele-vs-All		
Aggregation	Hand-crafted	GRU	Combined	Hand-crafted	GRU	Combined	Hand-crafted	GRU	Combined
Majority	100%	87.50 %	100%	76.92 %	100%	100%	100%	100%	100%
Posterior	100%	87.50 %	100%	76.92 %	100%	100%	100%	100%	100%
85%-certain	100%	87.50 %	100%	76.92 %	100%	100%	100%	100%	100%
Certainty-weighted	100%	87.50 %	100%	76.92 %	100%	100%	100%	100%	100%

Table 7: Validation of Drawing Classifiers - One-vs-All - Technique-specific

Technique-Specific									
	Picasso-vs-All			Matisse-vs-All			Schiele-vs-All		
Aggregation	Hand-crafted	GRU	Combined	Hand-crafted	GRU	Combined	Hand-crafted	GRU	Combined
Majority	72.41%	82.76%	81.38%	65.52%	78.62%	82.76%	81.25%	78.12%	81.25%
Posterior	72.41%	82.76%	81.38%	66.21%	79.31%	80.69%	84.38%	78.12%	81.25%
85%-certain	72.41%	82.76%	82.76%	69.66%	76.55%	80.69%	84.38%	78.12%	81.25%
Certainty-weighted	71.72%	82.76%	82.07%	69.66%	77.93%	80.00%	87.50%	78.12%	81.25%
Detection of Fake Drawings									
	Picasso-vs-All			Matisse-vs-All			Schiele-vs-All		
Aggregation	Hand-crafted	GRU	Combined	Hand-crafted	GRU	Combined	Hand-crafted	GRU	Combined
majority	100.00%	12.50%	16.67%	94.87%	100.00%	100.00%	100.00%	45.00%	55.00%
Posterior	100.00%	12.50%	16.67%	97.44%	100.00%	100.00%	100.00%	45.00%	55.00%
k-certain	100.00%	12.50%	20.83%	97.44%	100.00%	100.00%	100.00%	45.00%	60.00%
certainty-weighted	100.00%	12.50%	20.83%	97.44%	100.00%	100.00%	100.00%	45.00%	60.00%

<https://it.mathworks.com/company/newsletters/articles/creating-computer-vision-and-machine-learning-algorithms-that-can-analyze-works-of-art.html>



GIOTTO

Giotto, Cappella Peruzzi, Affreschi presso la Basilica di Santa Croce, Firenze



OBIETTIVO : ricostruzione dei frammenti di immagini in fluorescenza UV degli affreschi

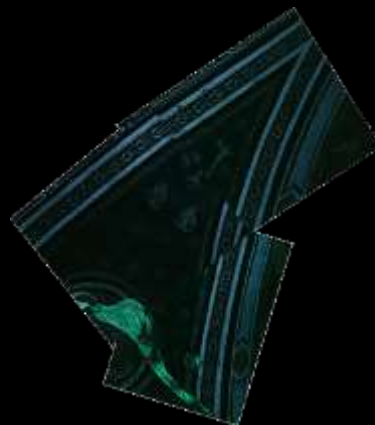
Giotto | Ricostruzione delle immagini



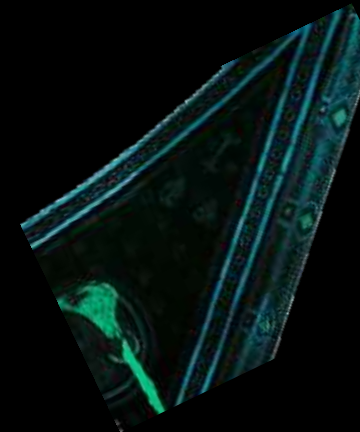
Correzione di voxel mancanti



eterogeneità di segnale



distorsioni geometriche



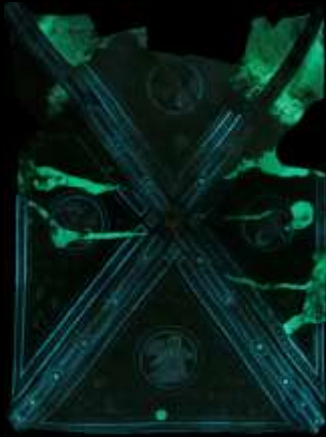
Giotto | Ricostruzione delle immagini



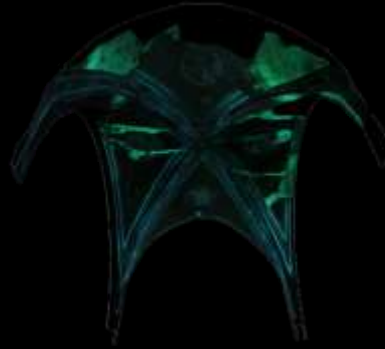
Elaborato finale

Giotto | Ricostruzione delle immagini

Affreschi di Giotto - Cappella Peruzzi (Firenze)



Texture elaborate
in piano



Texture applicate
sulle superfici



Render 3d

**Giotto, Dio Padre a Angeli – Cuspide di San Diego
Tempera e oro su tavola, Museo di San Diego**



OBIETTIVO 1: coregistrare

Giotto | Coregistrazione e confronto tra immagini

Coregistrazione



Riflettografia IR



**Segmentazione delle
pennellate più forti**



Coregistrazione

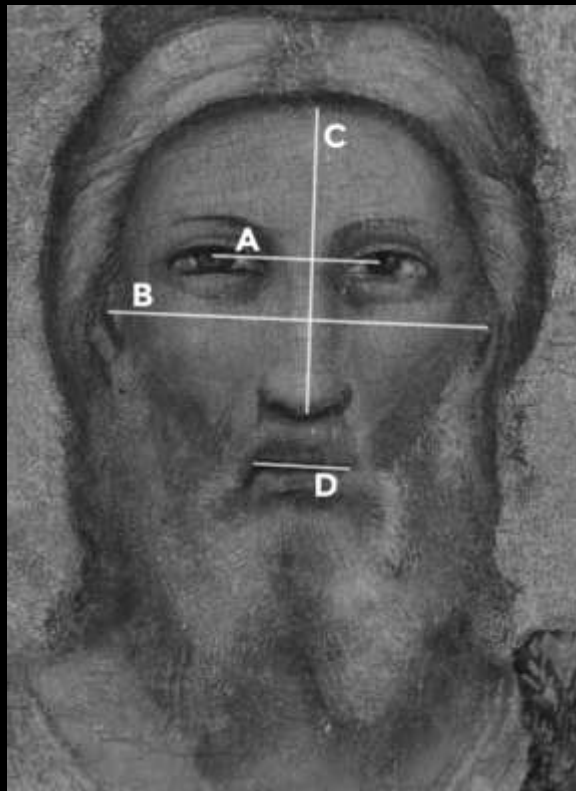


Riflettografia IR

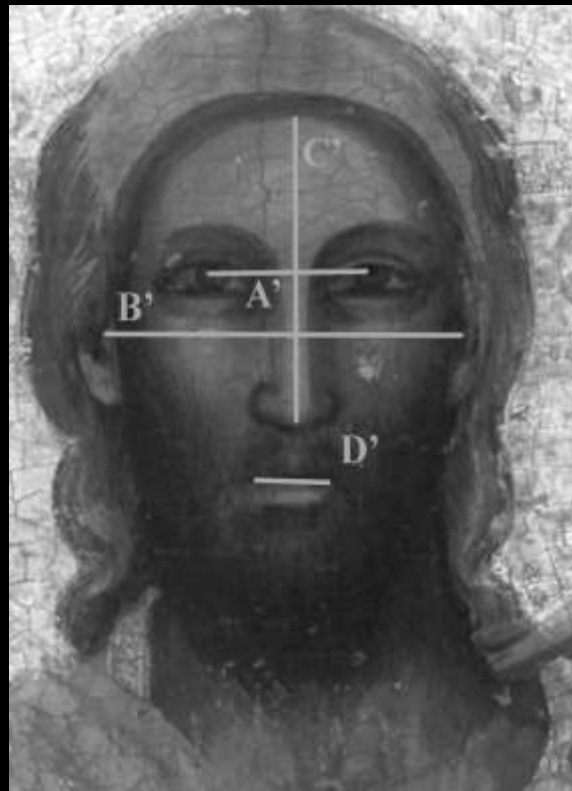
*Giotto. Cristo Benedicente,
Crocifisso di Ognissanti
Tempera e oro su tavola
(Chiesa di Ognissanti,
Firenze).*

Workshop "Giotto oltre l'immagine", ICOM 2016 – 1 July 2016

Misure di proporzioni



Riflettografia IR



Riflettografia IR

$$A/B = 0,44$$
$$A'/B' = 0,44$$

$$A/C = 0,55$$
$$A'/C' = 0,55$$

$$A/D = 1,74$$
$$A'/D' = 1,61$$

*Giotto. Cristo Benedicente, Crocifisso di Ognissanti
Tempera e oro su tavola (Chiesa di Ognissanti,
Firenze).*

Workshop "Giotto oltre l'immagine", ICOM 2016 – 1 July 2016

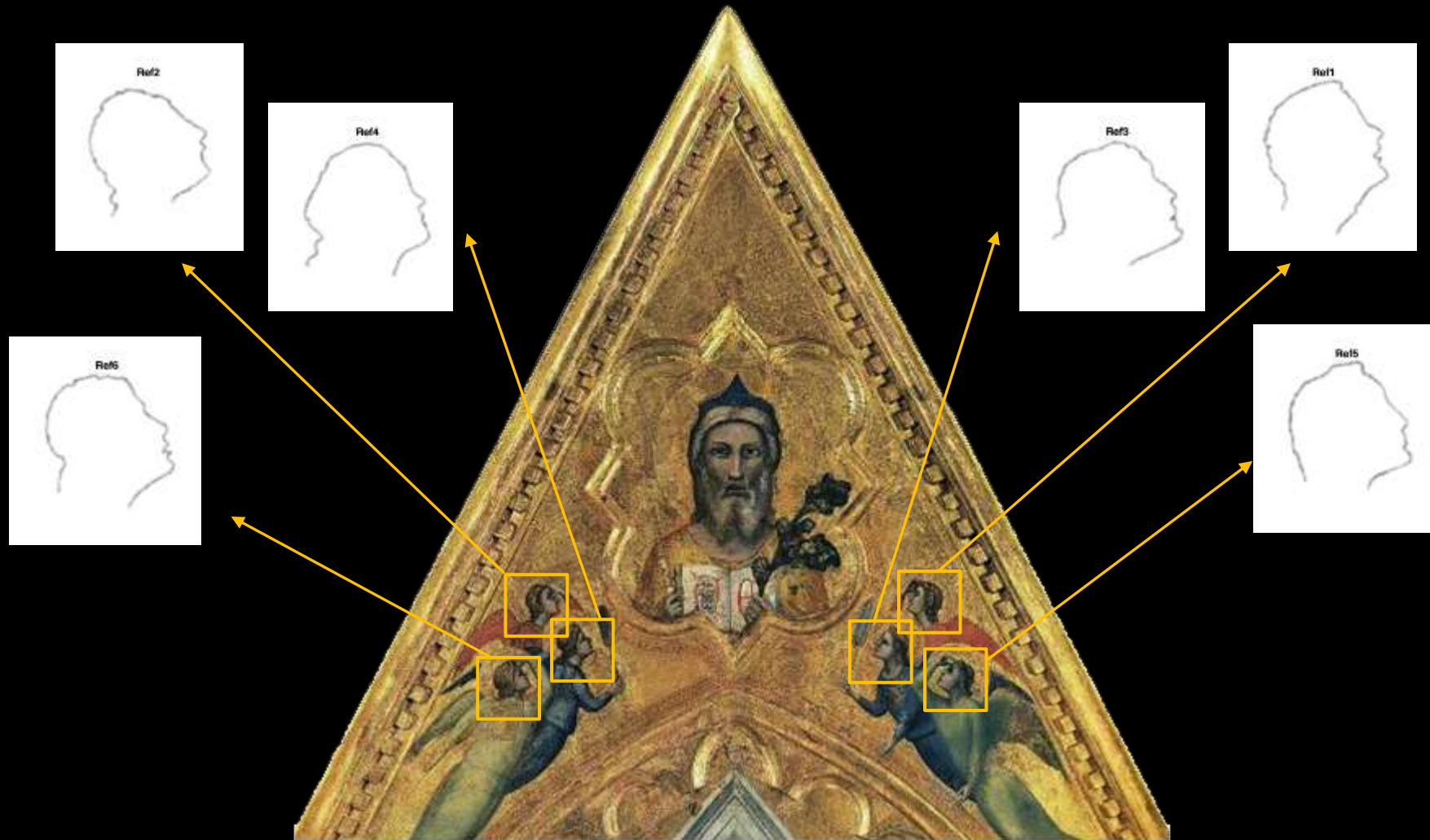
Giotto | Valutazione statistica delle differenze tra immagini

Giotto, Tempera e oro su tavola, Museo di San Diego



OBIETTIVO 2: valutare statisticamente le somiglianze tra le figure dell'opera

Giotto | Valutazione statistica delle differenze tra immagini



Workshop "Giotto oltre l'immagine", ICOM 2016 – 1 July 2016

Giotto | Valutazione statistica delle differenze tra immagini

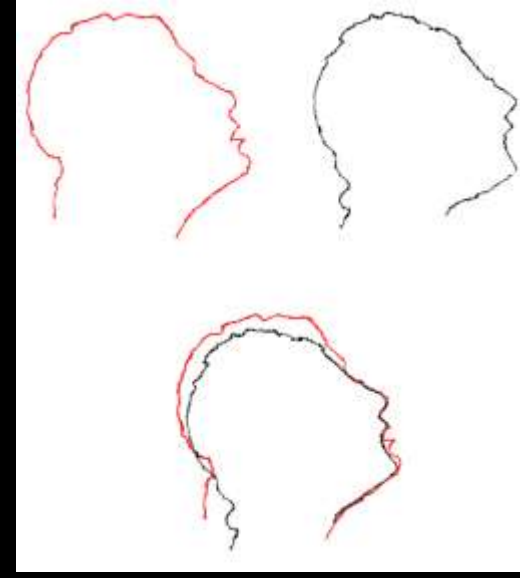
Valutazione statistica della differenza tra le due immagini



Riflettografia IR



**Segmentazione delle
pennellate più forti**



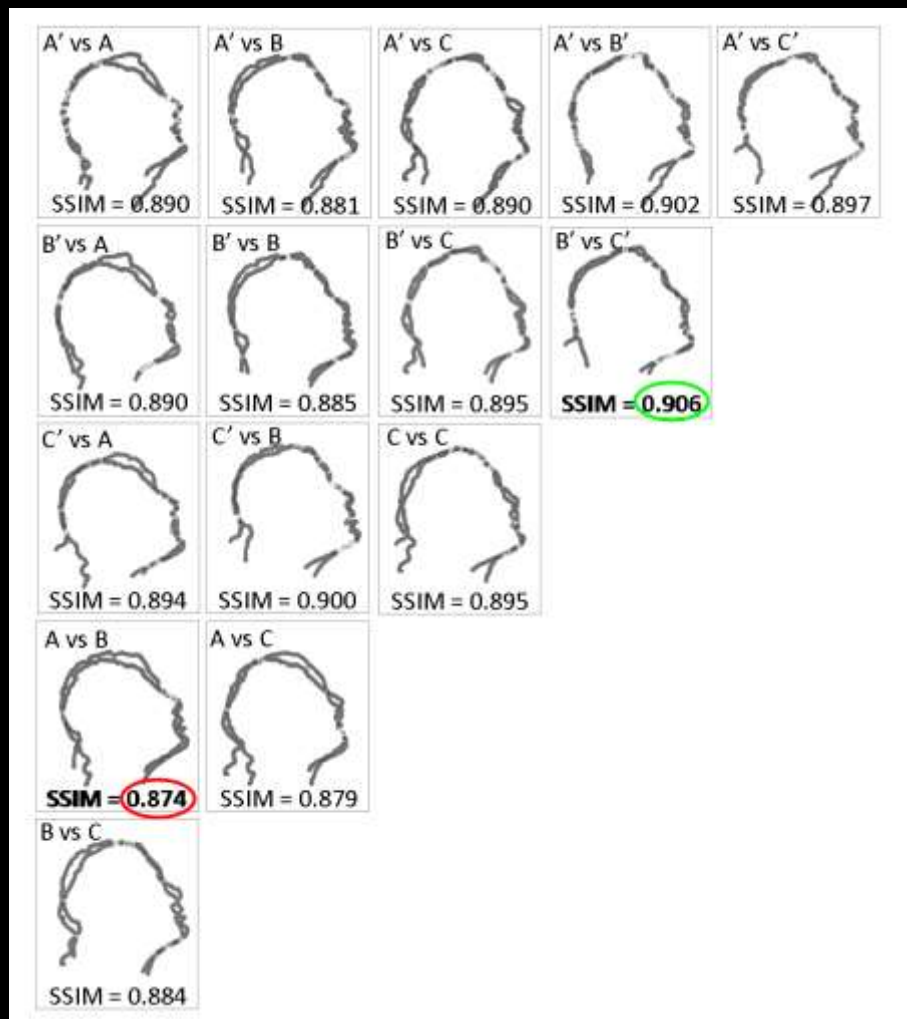
**Estrazione dei contorni e
coregistrazione rigida**

**Rotazione minima: 0,9°
Rotazione massima: 5,8°**

Workshop "Giotto oltre l'immagine", ICOM 2016 – 1 July 2016

SSIM = Indice di Similarità Strutturale

Max Value = 1.000





LA FALCONIERA, *SEGANTINI*

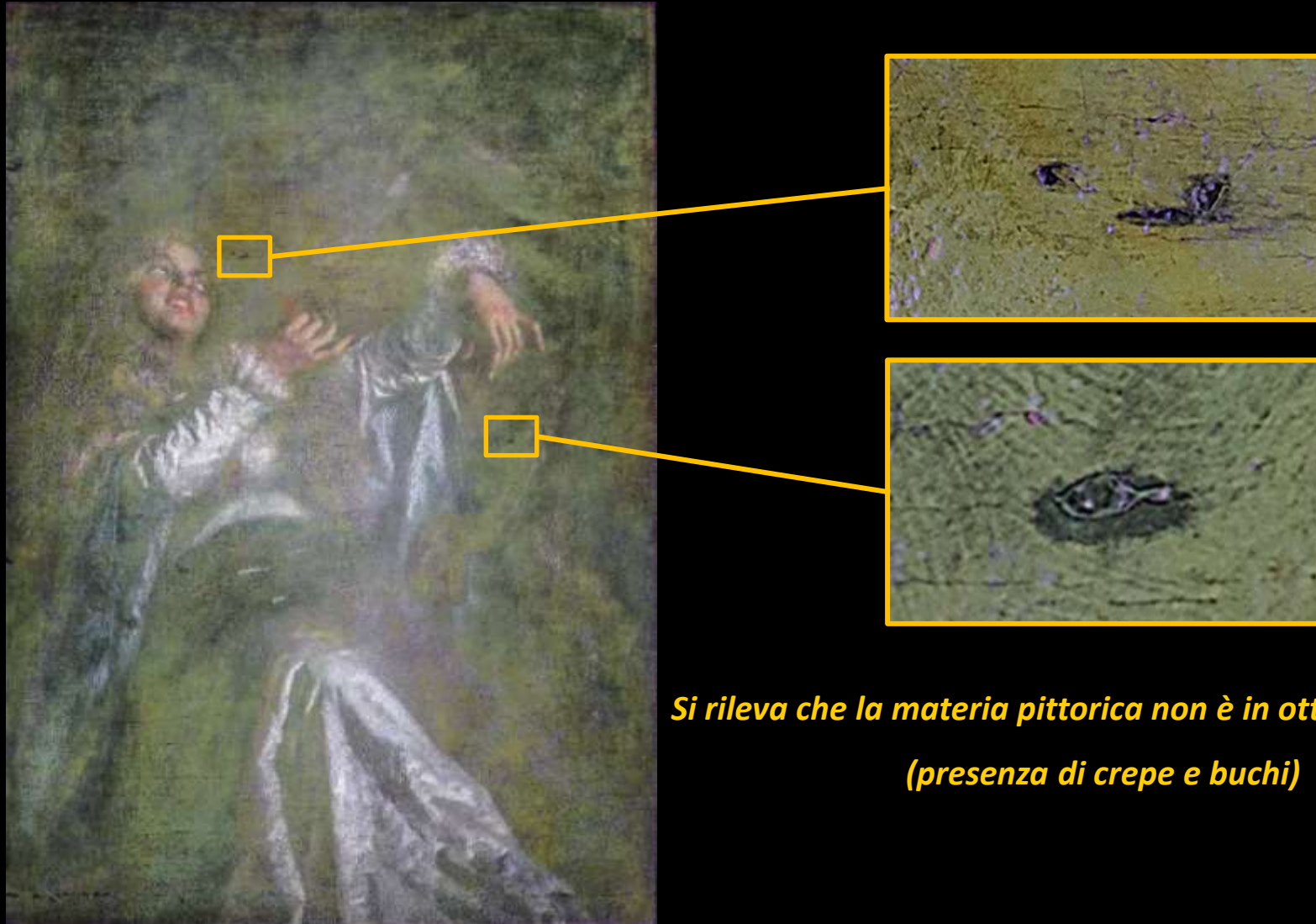
La Falconiera, G. Segantini



La Falconiera, G. Segantini | Macrofotografia in luce visibile

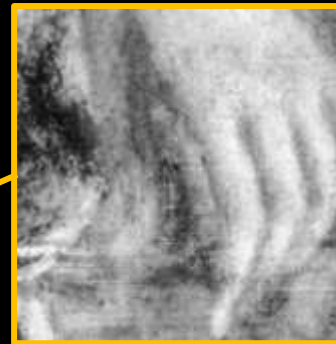
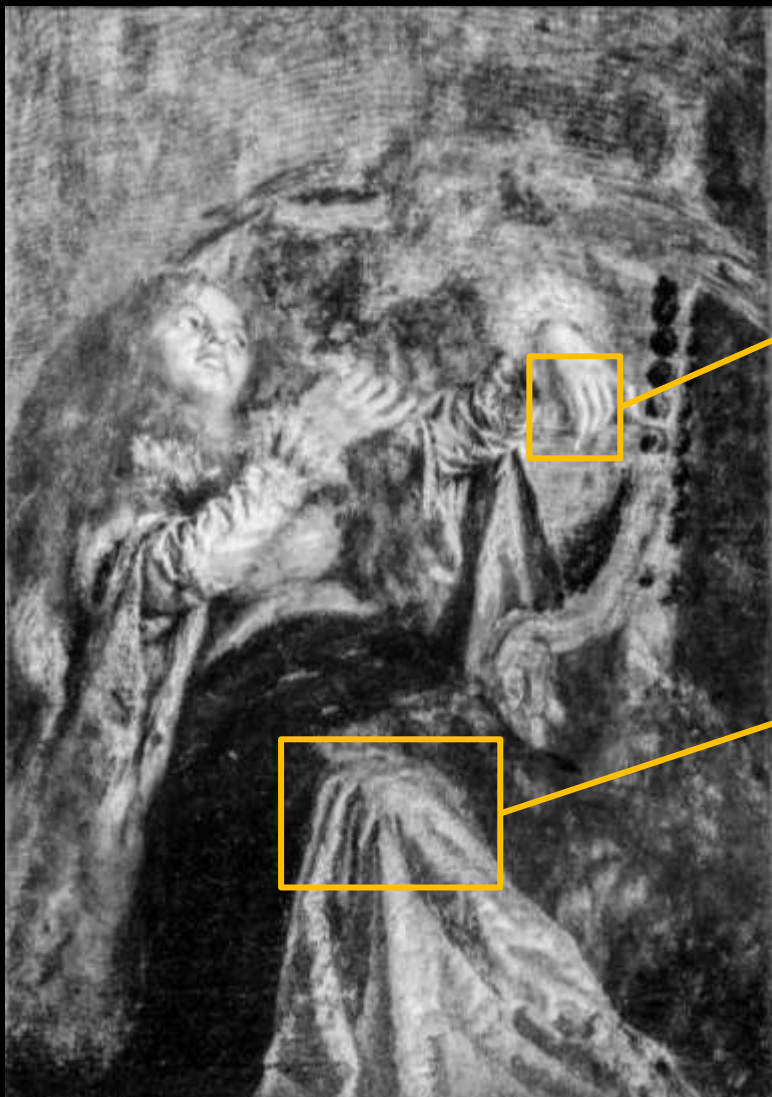


La Falconiera, G. Segantini | Fluorescenza indotta da stimolazione con luce UV



*Si rileva che la materia pittorica non è in ottime condizioni
(presenza di crepe e buchi)*

La Falconiera, G. Segantini | Riflettografia IR

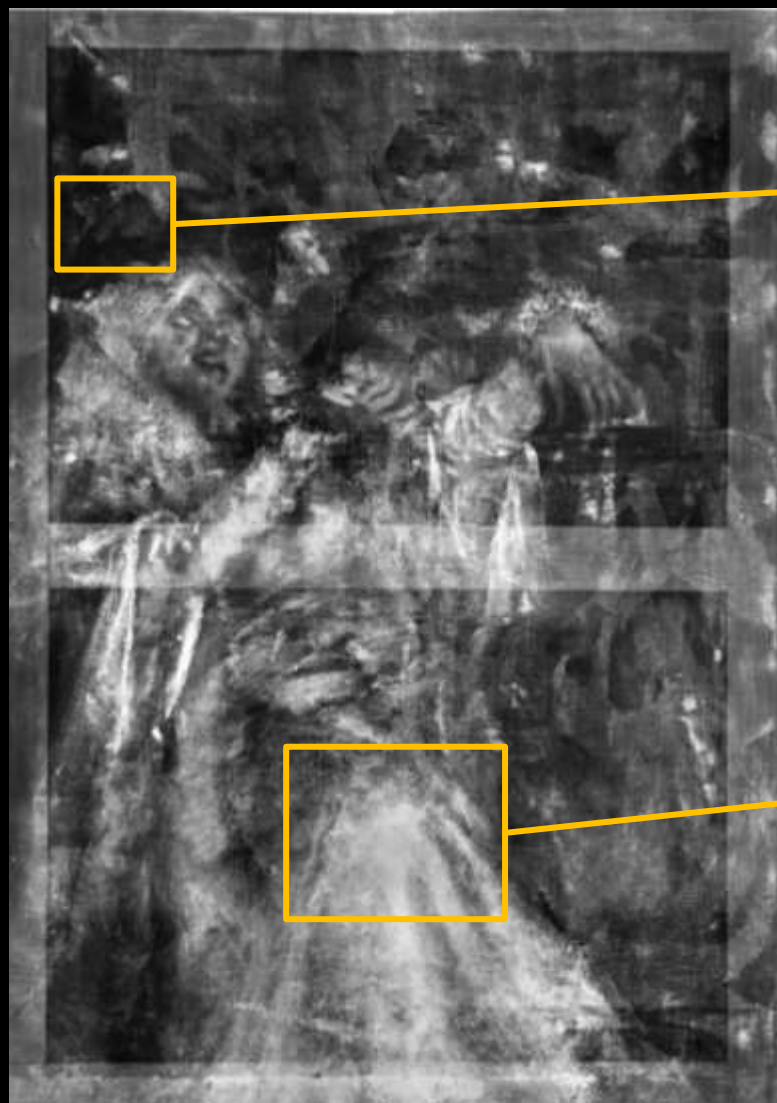


Il tracciato di particolari impostati con colore non trasparente all'infrarosso

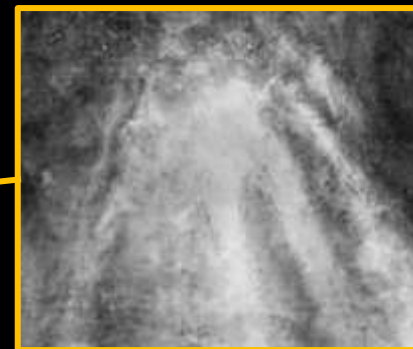


*Presenza di strati di pittura estremamente spessi non trasparenti all'infrarosso vicino
(stessi dettagli presenti in riflettografia IR e luce visibile)*

La Falconiera, G. Segantini | Radiografia



Preparazione della tela con materiali poco radiopachi



Distribuzione di materiali particolarmente radiopachi in corrispondenza delle campiture chiare delle vesti

La Falconiera, G. Segantini | La firma



***Sigla "G Seg" nell'area
a sinistra dell'opera***



***Firma "G Segantini" sulla tela visibile nel
retro del dipinto***

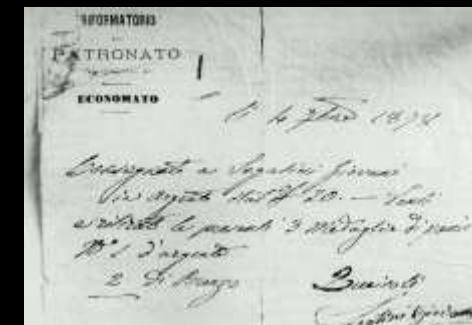
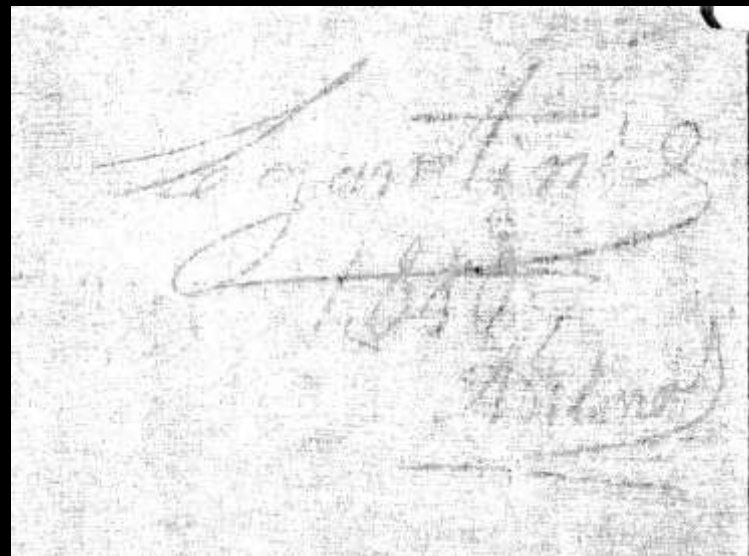
La Falconiera, G. Segantini | La firma



Retro in luce visibile



Retro in riflettografia IR

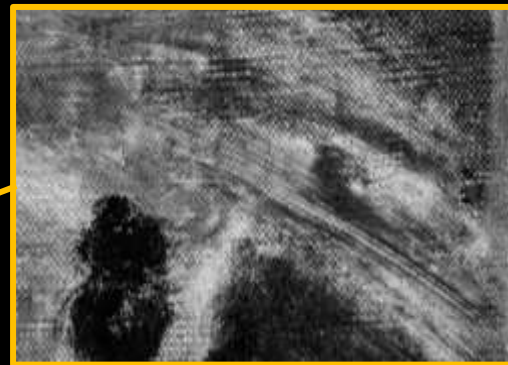
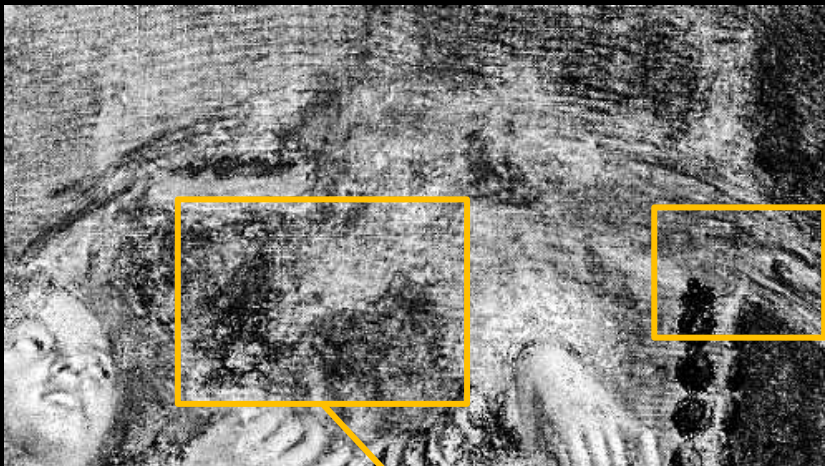


**Elaborazione della riflettografia IR per valorizzare la scritta:
"Segantini 1880 Milano"**

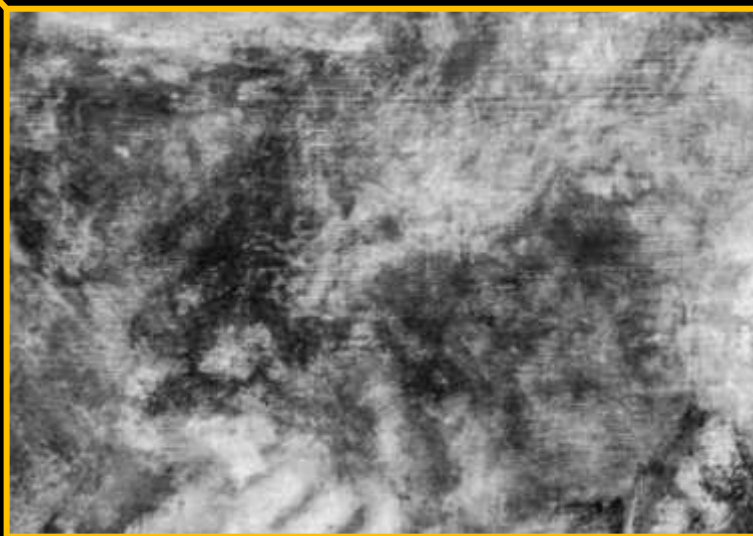
La Falconiera, G. Segantini | Il falco



La Falconiera, G. Segantini | Il falco

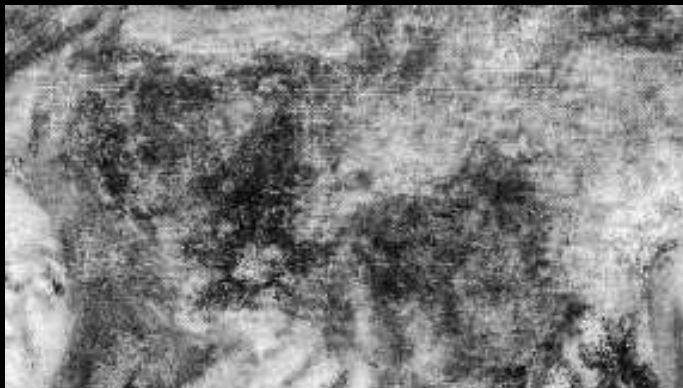


Ala caratterizzata da un ricco e dettagliato piumaggio



Materiale riflettente all'IR nella regione tra il muso del falco e il boccone di carne

La Falconiera, G. Segantini | Il falco



Assenza di corrispondenze tra il particolare in riflettografia IR e le altre tecniche di immagine





**IR –Riflettografia co-registrata
all'immagine nel VIS**

*Le due immagini, co-registrate, mostrano la diversa
posizione tra il “muso” rivelato in IR e
quello dipinto, visibile nella fotografia*



CARAVAGGIO

Caravaggio | Applicazione di filtri di imaging

Caravaggio, Dipinto ad olio su tela (1594-96), Galleria Doria Pamphilj, Roma



**Immagine originale del dipinto
(visibile)**



**Immagine radiografica del dipinto
(X)**

**OBIETTIVO : valorizzare la figura dell'angelo abbozzata
nella regione inferiore destra della radiografia**

Caravaggio | Applicazione di filtri di imaging



Immagine radiografica

+ Applicazione di filtri =



Immagine radiografica elaborata

Caravaggio | Segmentazione e applicazione di filtri di imaging

Caravaggio, Dipinto ad olio su tela (1603), Galleria Corsini, Roma



**Immagine originale del dipinto
(visibile)**



**Immagine radiografica del dipinto
(X)**

OBIETTIVO : valorizzare l'impronta radiopaca a destra del Santo

Caravaggio | Segmentazione e applicazione di filtri di imaging

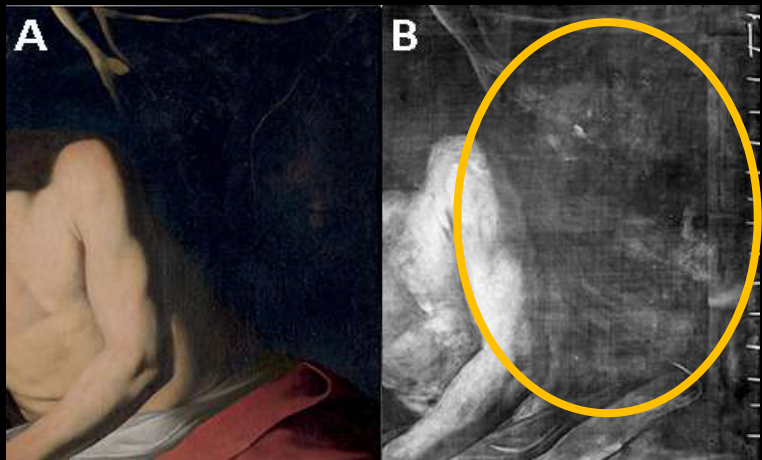
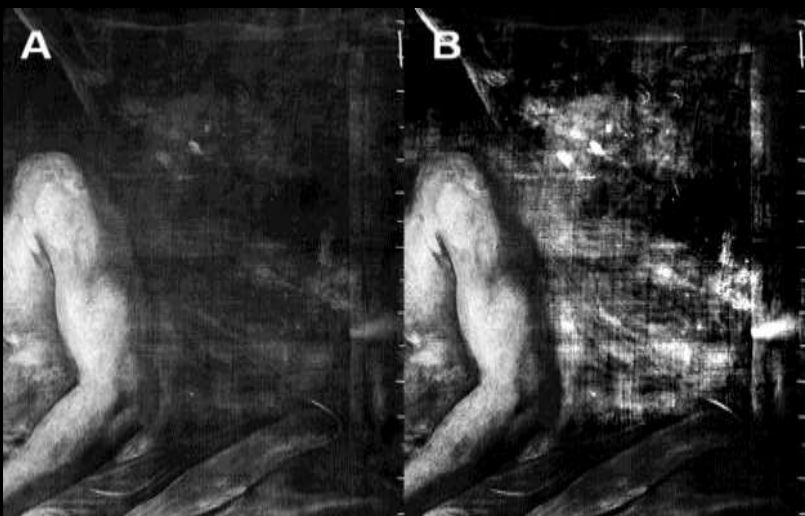


Immagine digitale e radiografica del dipinto



Immagine radiografica elaborata



Caravaggio | Segmentazione e applicazione di filtri di imaging

Caravaggio, Dipinto ad olio su tela (1603), Palazzo Barberini, Roma



**Immagine originale del dipinto
(visibile)**



**Immagine radiografica del dipinto
(X)**

OBIETTIVO : valorizzare la figura del Santo più piccola

Caravaggio | Segmentazione e applicazione di filtri di imaging

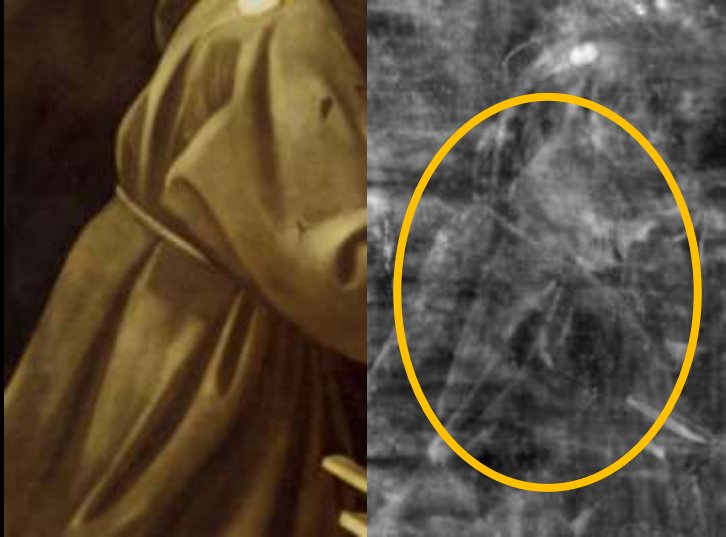


Immagine digitale e radiografica del dipinto



Immagine radiografica elaborata

Caravaggio | Applicazione di filtri probabilistici

Caravaggio, Dipinto ad olio su tela (1597), Musei Capitolini di Roma



**Immagine originale del dipinto
(visibile)**



**Immagine radiografica del dipinto
(X)**

OBIETTIVO : valorizzare l'immagine Mariana ruotata di 90° rispetto al dipinto visibile

Stima del filtro statistico (probabilità a priori)



Immagine radiografica

—



Dipinto in scala di grigi

=



0 (nero)-1 (bianco)

Caravaggio | Applicazione di filtri probabilistici

**Iterazione 1: radiografia
priori**



X

x probabilità a



=

true'



**Iterazione 2: radiografia
priori**



X

x (true') probabilità a



=

true''



Caravaggio | Applicazione di filtri probabilistici



[video]

christian.salvatore@iusspavia.it

<https://christiansalvatore.github.io/machinelearning-culturalheritage-iuss/>