

Indagini non distruttive

Applicazione dei Raggi X



Fasi dell'indagine

- **Ispezione:** per es. per mezzo di radiazione elettromagnetica
- **Valutazione:** confronto con un modello



Diagnostica: tipologie d'indagine

➤ NON DISTRUTTIVE

*L'oggetto NON subisce
alcun tipo
d'alterazione durante
l'analisi*

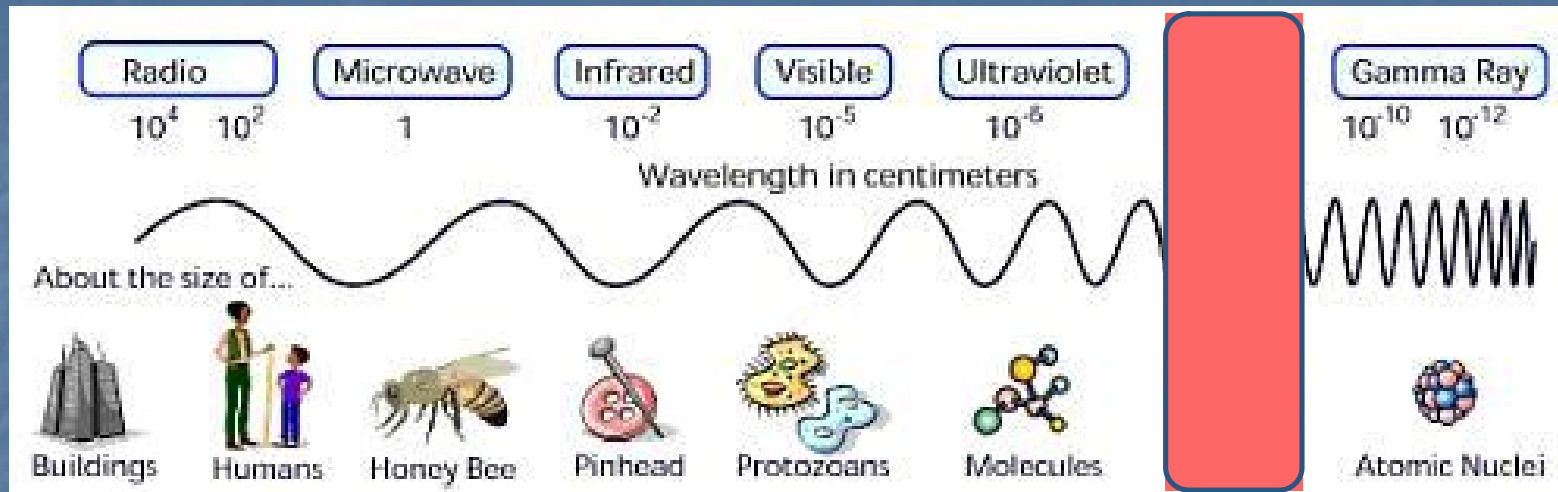
➤ NON INVASIVE

*Si opera su campioni
rappresentativi, di
piccolissima quantità,
prelevati dall'opera*

Esempi di analisi ND

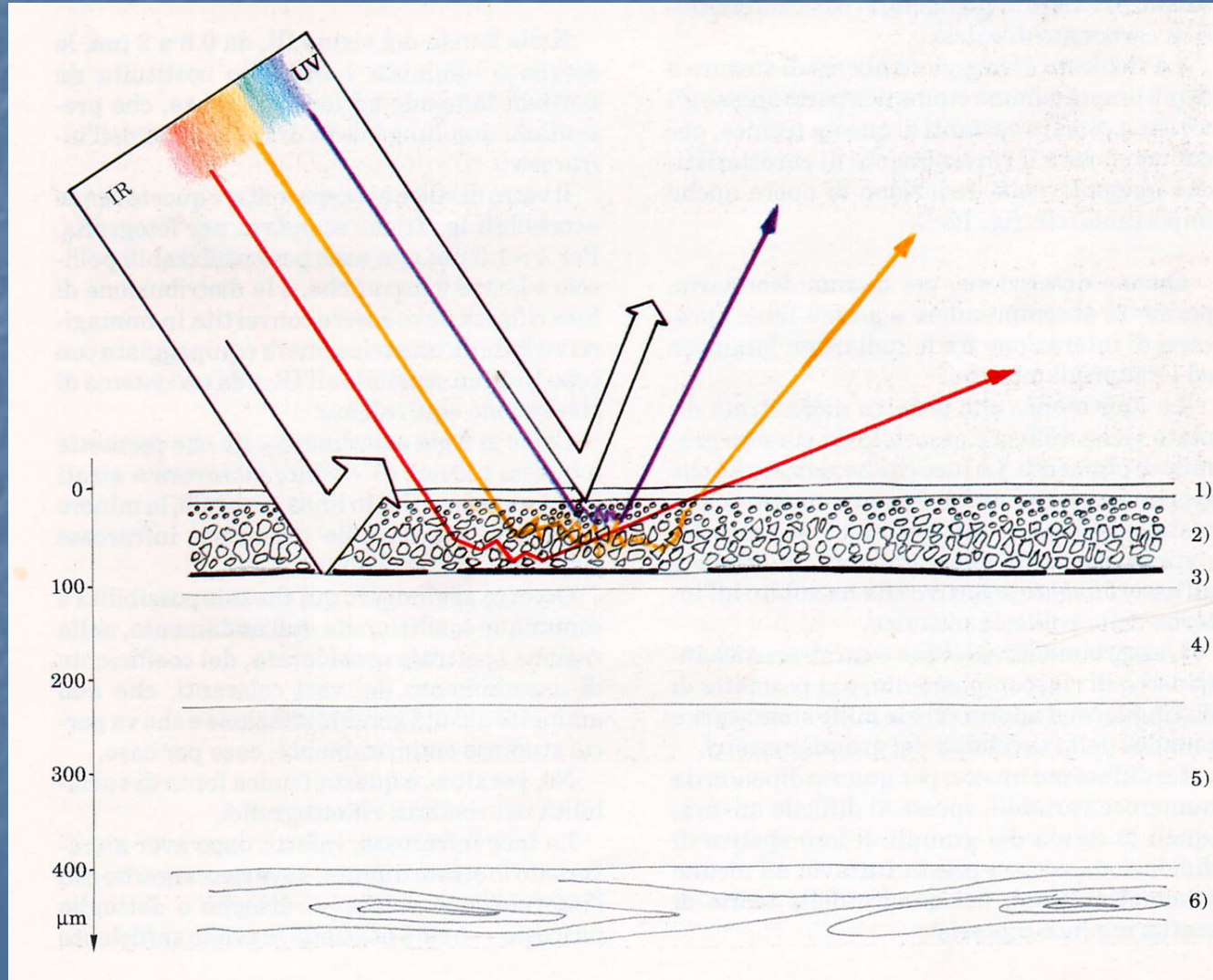
- Tecniche fotografiche speciali
- Riflettografia IR
- Radiografia
- Fluorescenza X
- Tomografia
- Gammagrafia
- Termografia
- Olografia
- Ultrasuoni

Spettro Elettromagnetico



Region	Wavelength (Angstroms)	Wavelength (centimeters)	Frequency (Hz)	Energy (eV)
Radio	$> 10^9$	> 10	$< 3 \times 10^9$	$< 10^{-5}$
Microwave	$10^9 - 10^6$	$10 - 0.01$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	$10^{-5} - 0.01$
Infrared	$10^6 - 7000$	$0.01 - 7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{12} - 4.3 \times 10^{14}$	$0.01 - 2$
Visible	$7000 - 4000$	$7 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$2 - 3$
Ultraviolet	$4000 - 10$	$4 \times 10^{-5} - 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$3 - 10^3$
Gamma Rays	< 0.1	$< 10^{-9}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 10^5$

Informazioni rilevabili per mezzo di radiazione ottica (UV,VIS,IR)

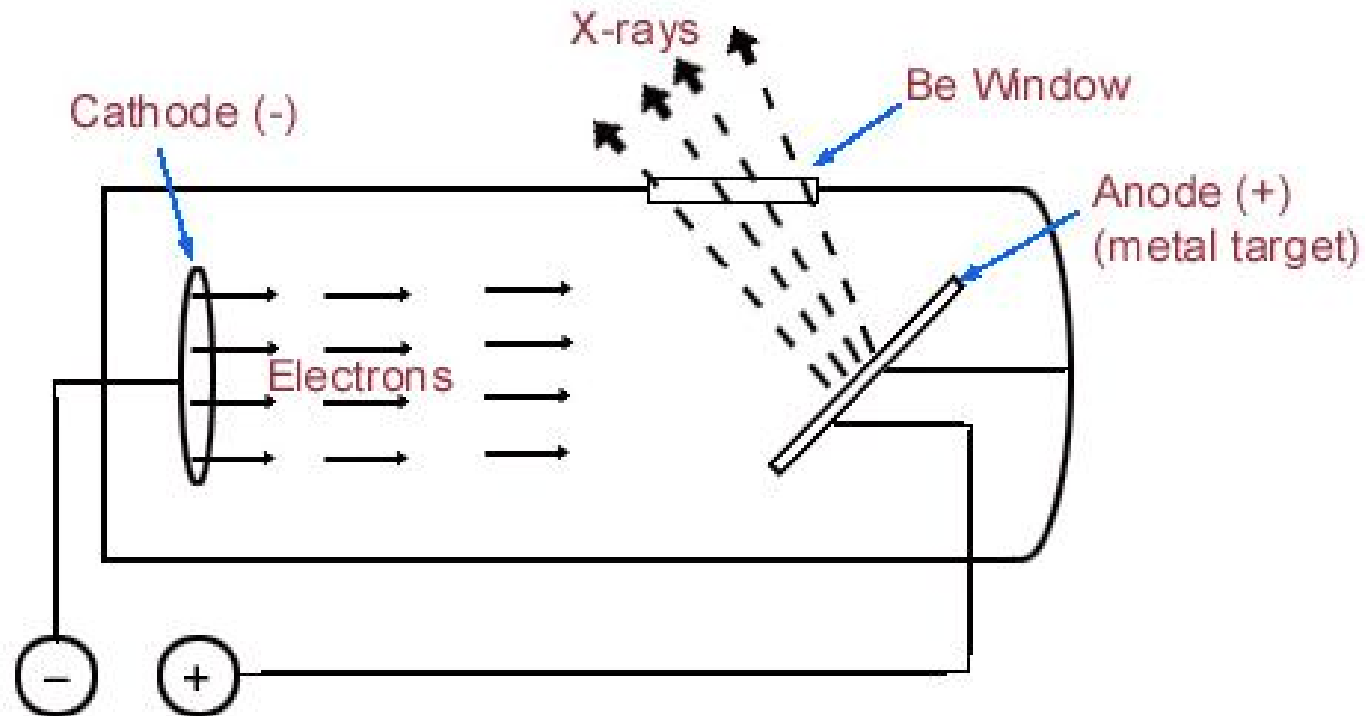


Applicazione dei RX

Analisi non distruttiva che impiega radiazione X

- Radiografia
- Tomografia
- Fluorescenza

Produzione di RX



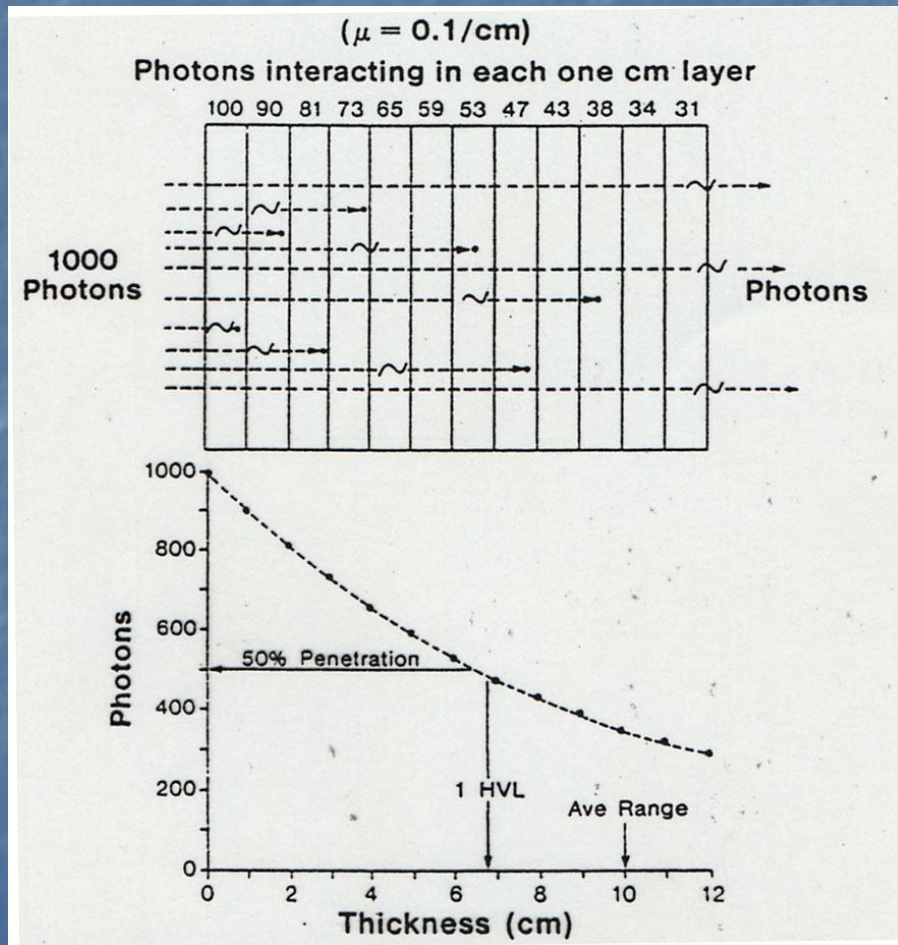
d.d.p 1-60 kV

Corrente: Qualche
centinaio di μA

RADIOGRAFIA

Legge di penetrazione dei RX:

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



I : Intensità della radiazione incidente

I_0 : Intensità della radiazione trasmessa

x : Spessore del campione

μ : Coefficiente di assorbimento caratteristico del materiale

Penetrazione di diversi centimetri

Applicazioni (radiografia)

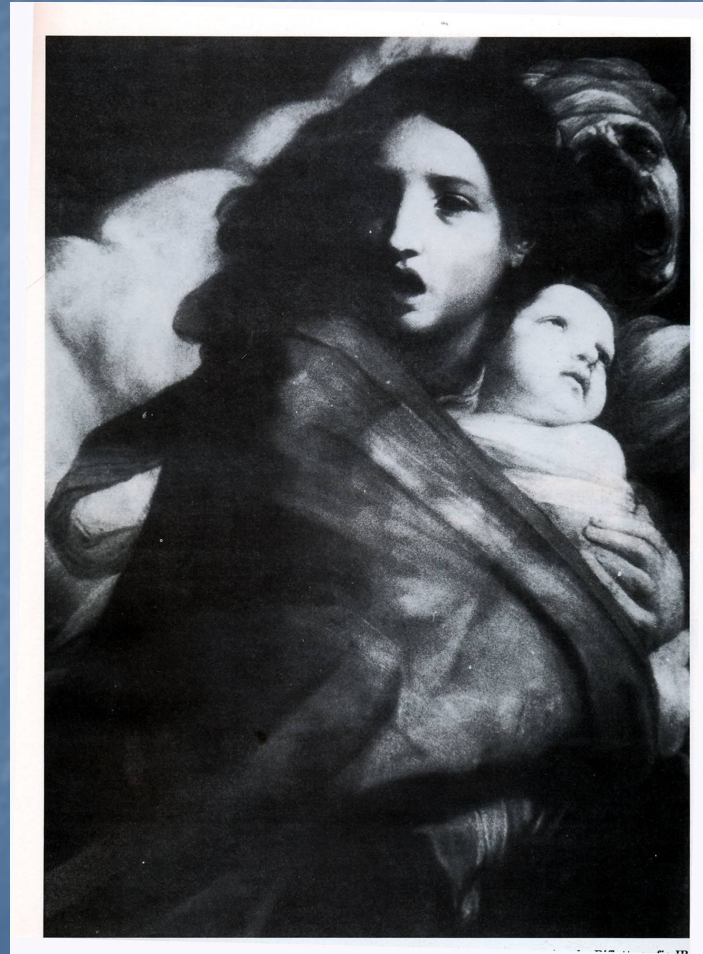
- Dipinti
- Bronzi
- Manufatti lignei e ceramici
- Mummie
- Pergamene
- Francobolli e cartone

Informazione sui *DIPINTI* (radiografia)

- Convalida autenticità
- Individuazione di pentimenti e sovrapposizioni
- Analisi del supporto (tela, legno)
- Analisi dell'imprimatura
- Analisi della pellicola pittorica
- Analisi dello stato di conservazione
- Restauri precedenti
- Tecnica dell'artista

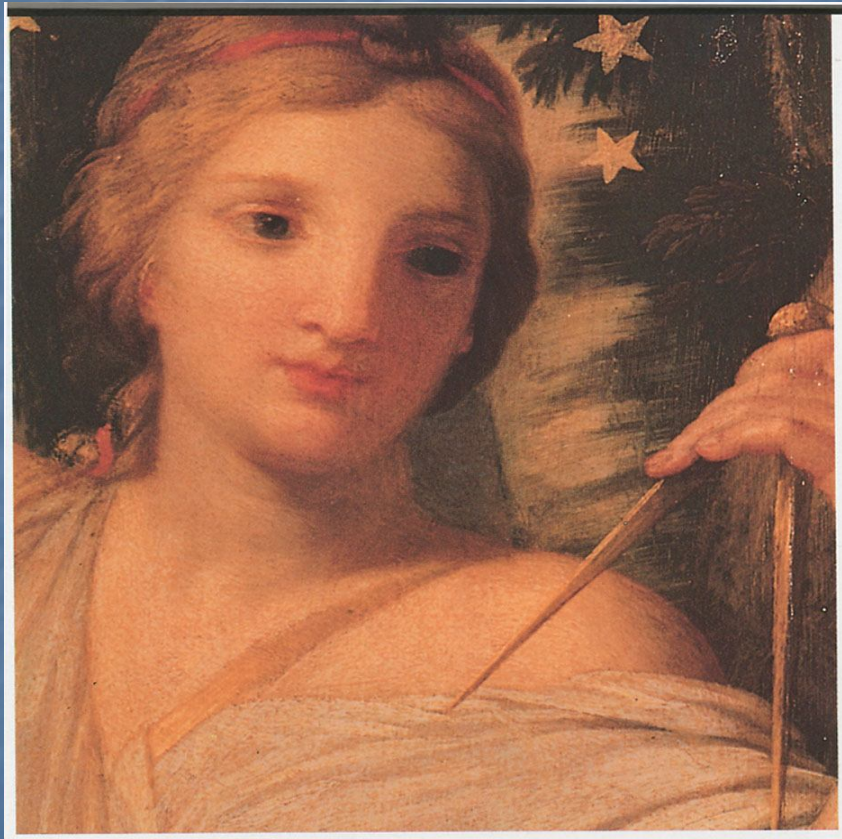
Pentimenti

Guido Reni – La Strage degli Innocenti



Pentimenti

Le Sueur – musa Urania (particolare)



Restauri precedenti – pentimenti

Raffaello – Madonna dell'Impannata



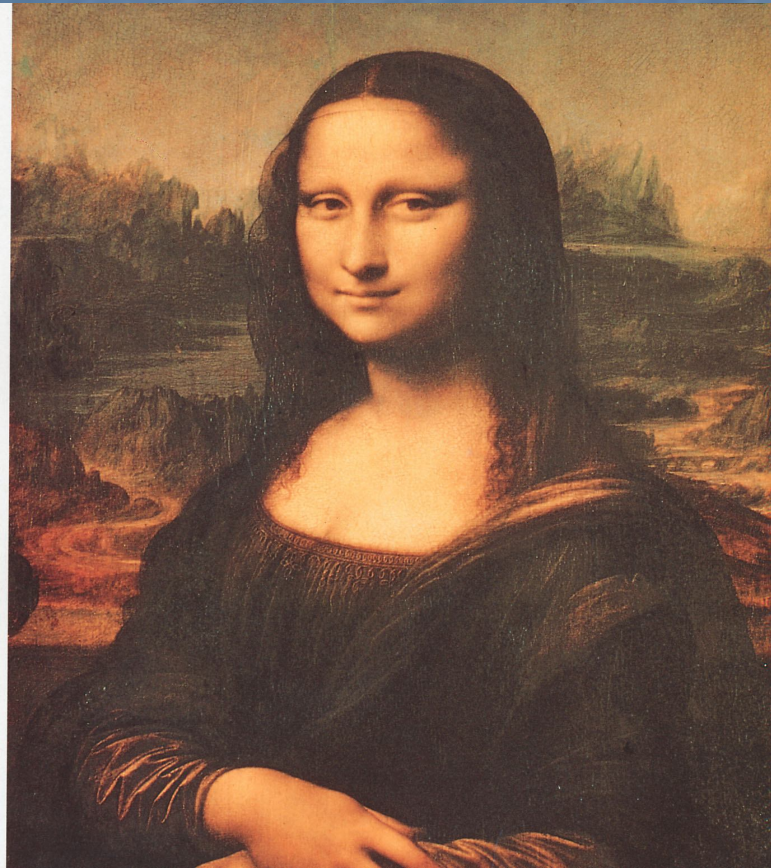
Analisi sfondo

Raffaello - Madonna del Cardellino



Analisi dei pigmenti

Leonardo Da Vinci – La Gioconda



Assorbimento RX di vari pigmenti

Colore	Denominazione Commerciale	Assorbimento ai Raggi X
Bianco	Bianco d'argento	molto alto
	Bianco di piombo	molto alto
	Bianco di zinco	alto
	Bianco di China	alto
	Bianco di calce	medio
Giallo e Arancio	Giallo di cromo: chiaro, scuro, arancio	molto alto
	Giallo di cadmio: chiaro, medio, scuro, arancio	alto
	Giallo di zinco	alto
	Giallo aurora	alto
	Ocra gialla, Terra di Siena naturale	medio-alto
	Giallo di Napoli	molto alto
	Massicott	molto alto
	Giallo di Marte	medio
Lacca gialla di guado	basso	
Rosso	Rosso di Saturno o minio	molto alto
	Vermiglione o cinabro	molto alto
	Rosso di Venezia	medio
	Lacca di carminio	basso
	Lacca di garanza	basso
Ocra rossa	medio-alto	
Bruno	Bruno di Firenze	alto
	Bruno di Marte	medio
	Bruno di Prussia	medio
	Seppia	basso
	Bistro, fuliggine	basso
	Bitume, asfalto	basso
Terra di Siena bruciata	medio-alto	
Azzurro	Bleu ceruleo	alto
	Bleu di cobalto	medio
	Oltremare chiaro	medio
	Bleu di Prussia	medio-alto
	Indaco	basso
Violetto	Violetto di cobalto	medio
	Violetto di Marte	medio-alto
	Violetto minerale	medio
Verde	Verde di Verona	alto
	Verde di cromo	medio
	Verde di cobalto	alto
	Lacca verde	basso
Grigio e Nero	Nero avorio	medio
	Nero di ferro	medio-alto
	Nero vite	basso
	Nero fumo di lampada	basso
Nero di carbone	basso	
Tutti i Colori	Acrilici	basso

Riutilizzo tela

Rembrandt – Ritratto di giovane uomo Titus



Informazione sui *BRONZI* (radiografia)

- Sezioni originarie
- Tasselli originari
- Elementi aggiunti per fusione successiva
- Linee di giunzione
- Saldature
- Chiodi distanziatori
- Attacchi dei canali di colata
- Armature d'anima
- Ribattini, viti
- Inserti, riempimenti di lacune e lesioni con il metallo fuso

Informazioni sui *MANUFATTI LIGNEI* (radiografia)

- Integrità del pezzo
- Stato di conservazione del legno
- Individuazione di restauri precedenti
- Analisi dei chiodi

Radiografia manufatti lignei

Cristo – Chiesa di Santa Maria Assunta
Bagno di Romagna

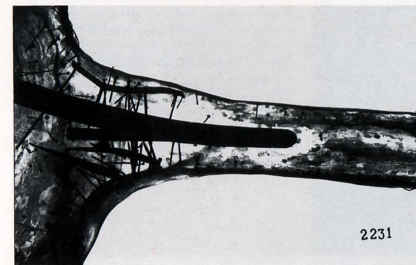
L'analisi preliminare per mezzo dei RX ha rilevato: un notevole danno causato dai tarli, le zone precedentemente restaurate.

Il braccio è sostenuto da un supporto di ferro. Sono stati inseriti molti chiodi per riparare la rottura tra la spalla e l'ascella, sotto l'ascella è visibile un restauro radiopaco.

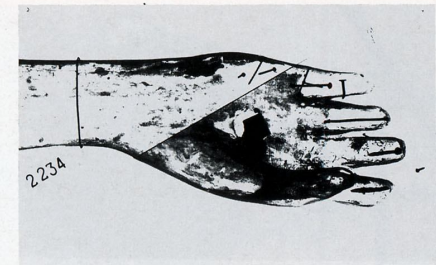
Nella mano sono visibili chiodi inseriti in epoca recente. Il pollice è stato rimodellato.



The wooden Christ as technicians set up the X-ray instrumentation. (Photo: A. Cannata)



X-ray of the left arm, showing the iron brace supporting the limb, and the numerous nails. A radio-opaque repair is visible in the underarm area.



X-ray of the right hand. The woodworm damage is evident, as is the remodelling of the hand, especially the thumb. There are also clear signs of the use of a rasp.

Informazioni sulle *PERGAMENE* (radiografia)

- Si rivela lo scritto antico sottostante eroso dalla pomice

Informazioni sui *FRANCOBOLLI* (radiografia)

- Tipo di inchiostro
- Struttura della carta
- Sistema di stampa
- Riconoscimento dei falsi

Limiti della RADIOGRAFIA

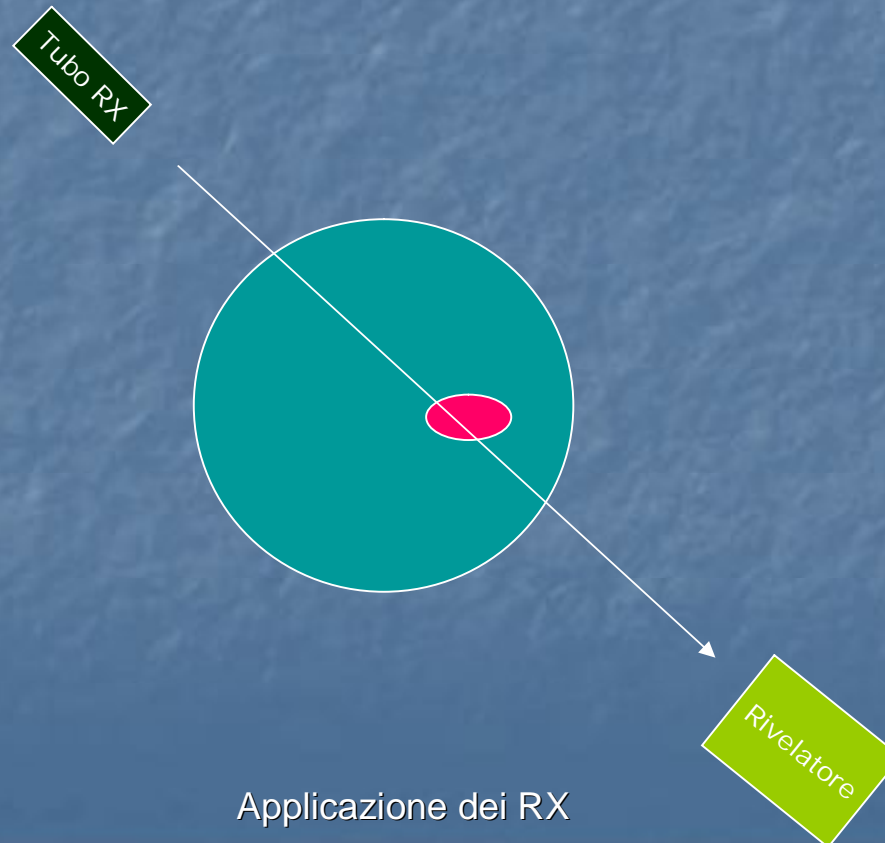
- Mancanza di dettaglio
- Risoluzione limitata

TOMOGRAFIA

Immagine 3D in grado di fornire informazioni sulla distribuzione di densità all'interno dell'oggetto

TOMOGRAFIA: Misura

- Un fascio di RX attraversa una sezione dell'oggetto.
- La stessa sezione successivamente viene ruotata di piccoli angoli ed attraversata ancora dagli stessi RX.
- In seguito ad una rotazione di 360° tutta la sezione sarà stata attraversata dai RX.



Applicazione dei RX

TOMOGRAFIA: Teoria

- Il coefficiente di attenuazione lineare $\mu(\rho, Z, E_0)$ è una funzione della densità della sezione, del numero atomico dell'elemento componente il campione, e dell'intensità dell'energia del fascio incidente.
- Se la sezione non è omogenea $\mu = \mu(s)$ varia nei vari punti di essa, essendo s le coordinate spaziali. Lungo la lunghezza L della sezione si ha:

$$g_L = \int_L \mu(s) ds$$

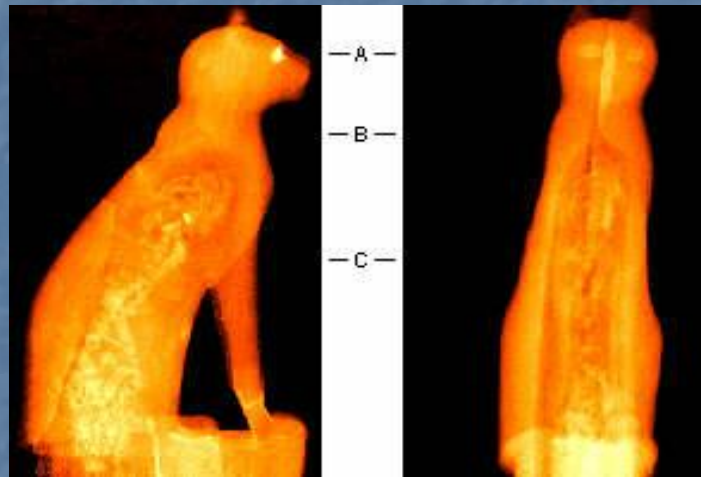
- Si ricostruisce l'immagine della sezione attraverso la retro-proiezione: dalla misura di g_L ottenuta lungo la sezione, si determina la funzione $\mu(s)$ che, per energie sufficientemente elevate, è legata alla distribuzione di densità del materiale.

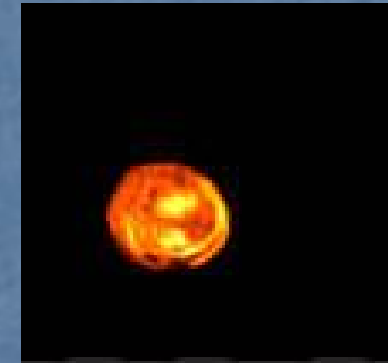
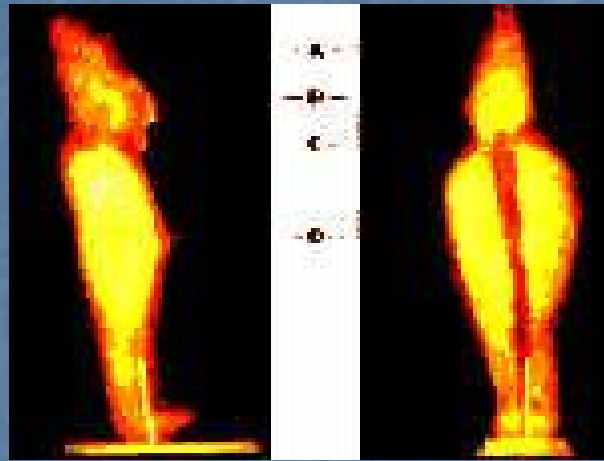
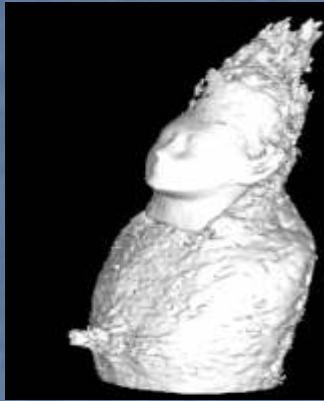
Tomografia: Applicazioni

- Statue di grandi e piccole dimensioni di bronzo o pietra
- Manufatti lignei e ceramici
- Mummie
- Materiale biologico
- Carta pesta

Tomografia: Informazioni

- Eseguendo le misure per sezioni diverse, si ottiene il profilo esatto dell'oggetto nei toni di grigio o a colori.
- Si può risalire alla sua composizione interna:
 - Individuando vuoti, cricche fratture ...
 - Spessori di lega nelle varie parti
 - individuazione di zone restaurate





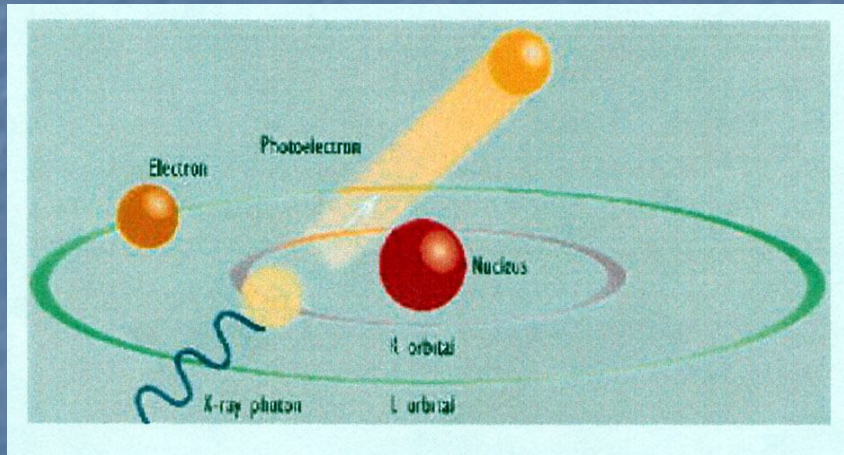
Tomografia: Caratteristiche

- La qualità dell'immagine dipende:
 - ✓ Dalla risoluzione geometrica: 20-30 μm (microtomografo) a 1 mm (macrotomografo)
 - ✓ Dalla risoluzione dei contrasti
 - ✓ Dal rumore (incertezza sul segnale registrato)
- L'uso dei RX è inadeguato per spessori:
 - ✓ >1,5 cm Metalli
 - ✓ >20 cm Marmo, materiale lapideo

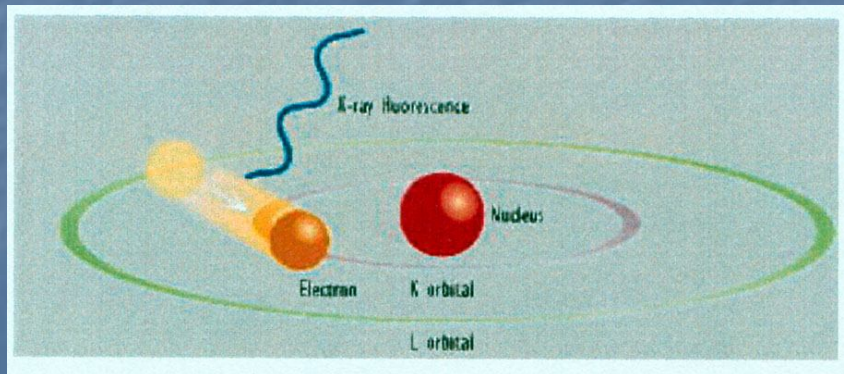
Per spessori superiori si devono usare i raggi γ

FLUORESCENZA X

(XRF)



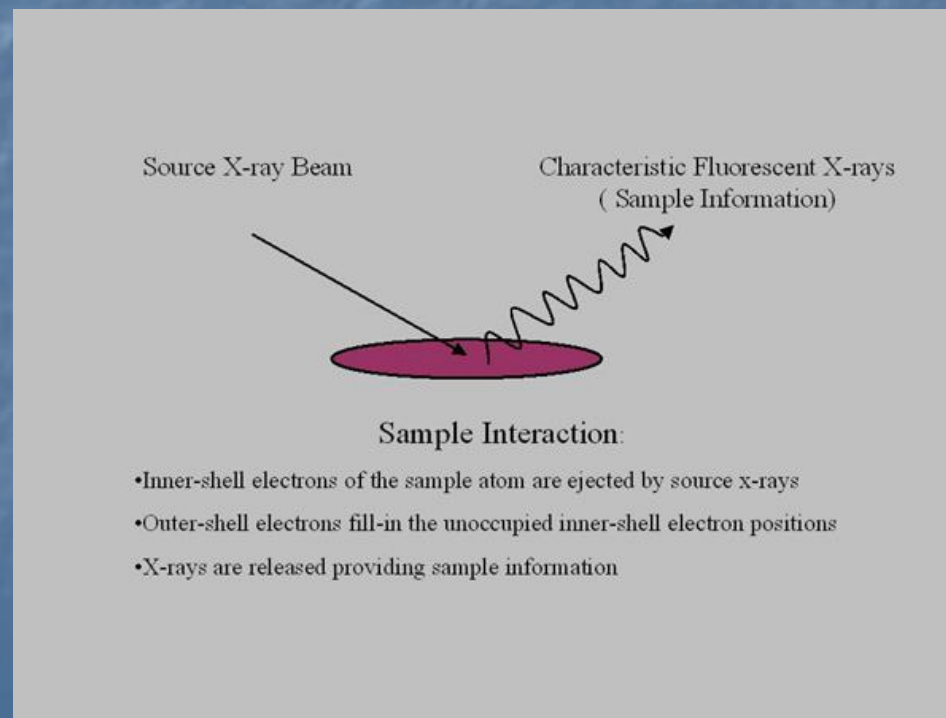
Un fascio di RX che investe un campione, trasferisce una parte della sua energia agli e^- delle orbite più interne in quantità note e caratteristiche dell'atomo a cui appartengono, producendo l'espulsione di un e^- (effetto fotoelettrico)



Nell'atomo eccitato si induce una transizione elettronica con conseguente emissione di radiazione RX di energia ed intensità legate all'**abbondanza** ed al **tipo** di **elemento** presente nel campione investito.

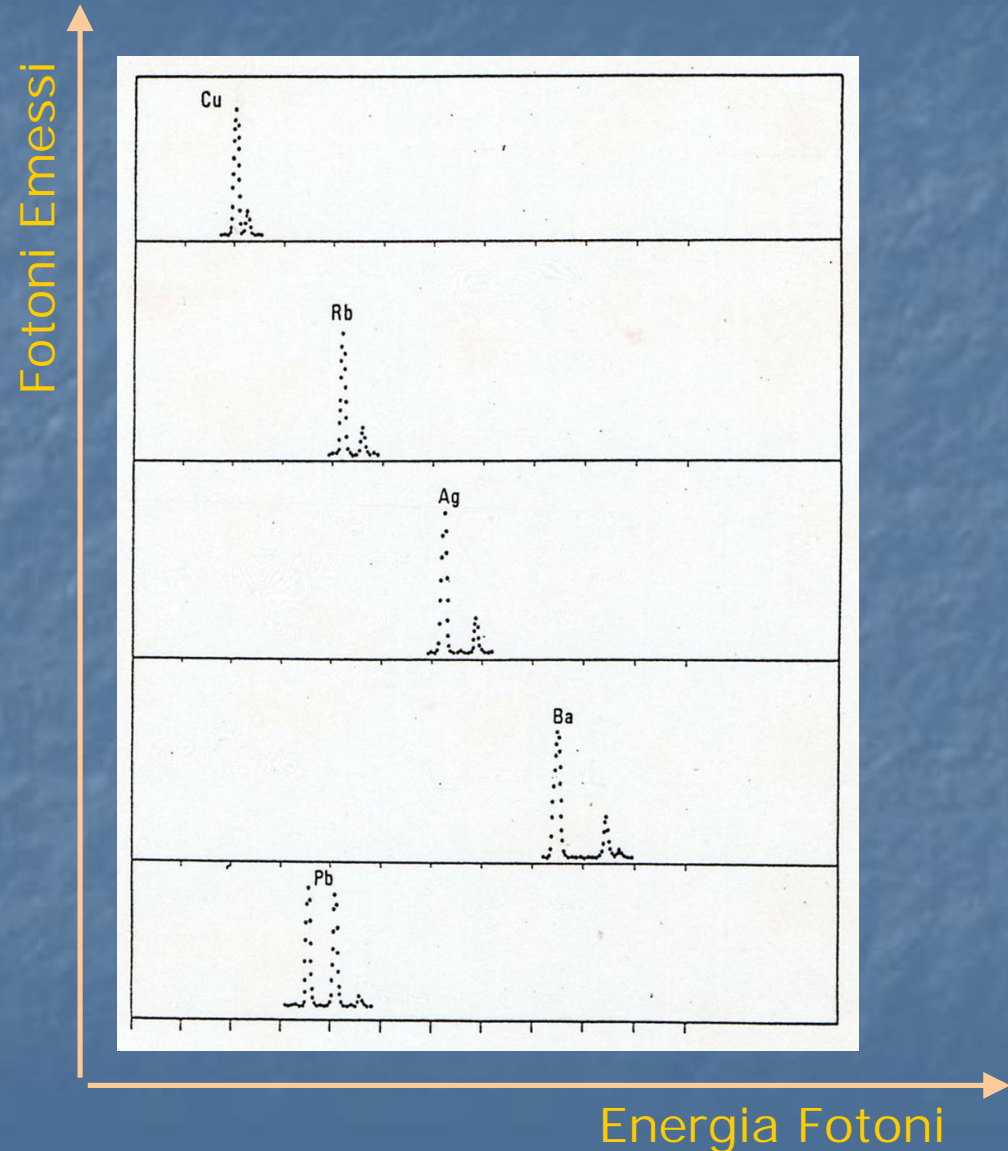
Misure XRF

Le misure sono effettuate in tempi dell'ordine di qualche centinaio di secondo, l'informazione ottenuta è relativa ad uno **strato superficiale** del campione (metalli frazione di qualche mm – legno qualche cm) di **area** pari alla dimensione del fascio incidente: da **qualche mm²** (secondo le esigenze si può diminuire tale dimensione) a **qualche cm²**.



Spettro XRF

Il risultato dell'indagine è fornito dallo **Spettro XRF**: diagramma in cui il numero di fotoni X emessi da un determinato elemento è rappresentato in funzione della loro energia.



APPLICAZIONI (XRF)

Analisi di:

- Dipinti
- Manufatti metallici
- Manufatti ceramici
- Smalti

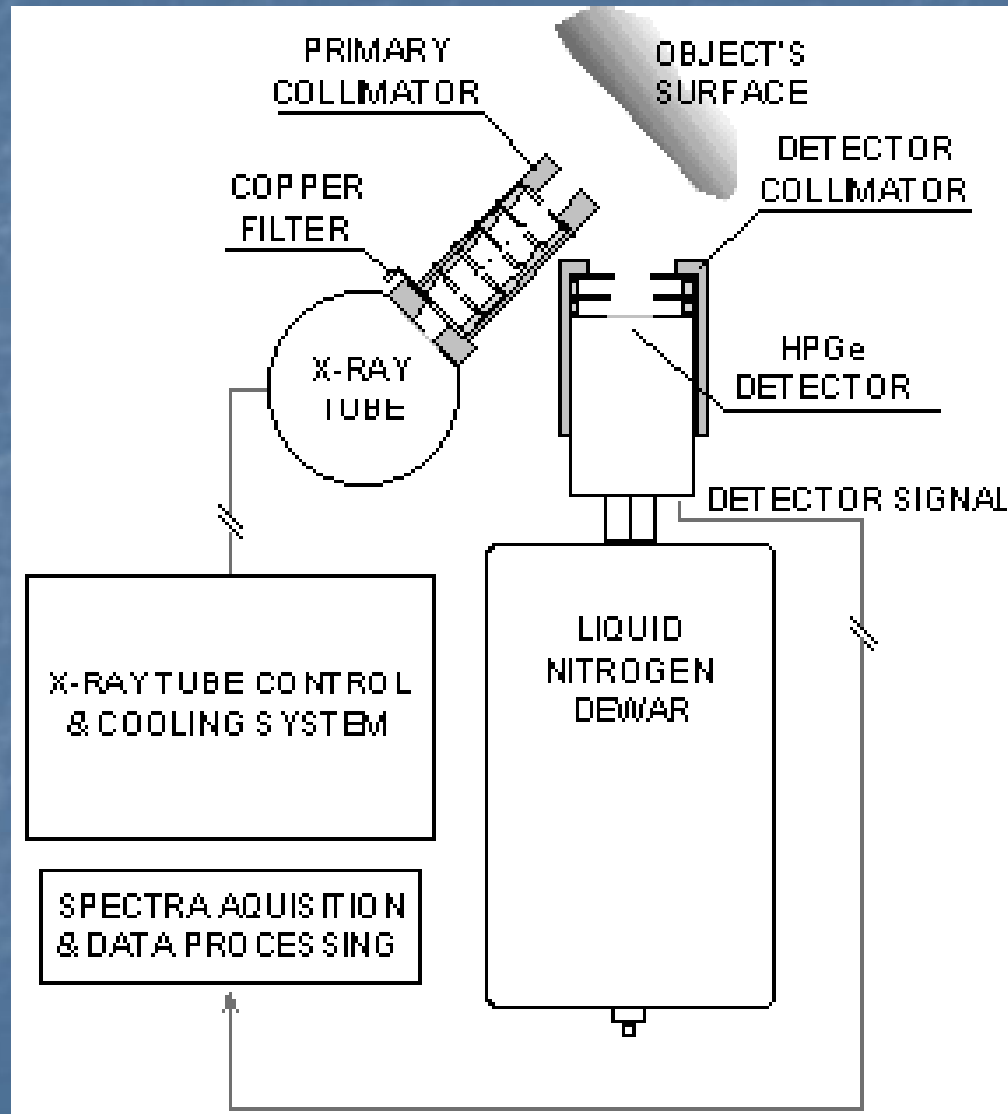
Informazioni (XRF)

- Individuazione qualitativa degli elementi chimici presenti nel campione con percentuali in peso < qualche per cento
- Determinazione quantitativa, con errore di qualche per cento, degli elementi chimici presenti in una lega metallica

Apparato strumentale

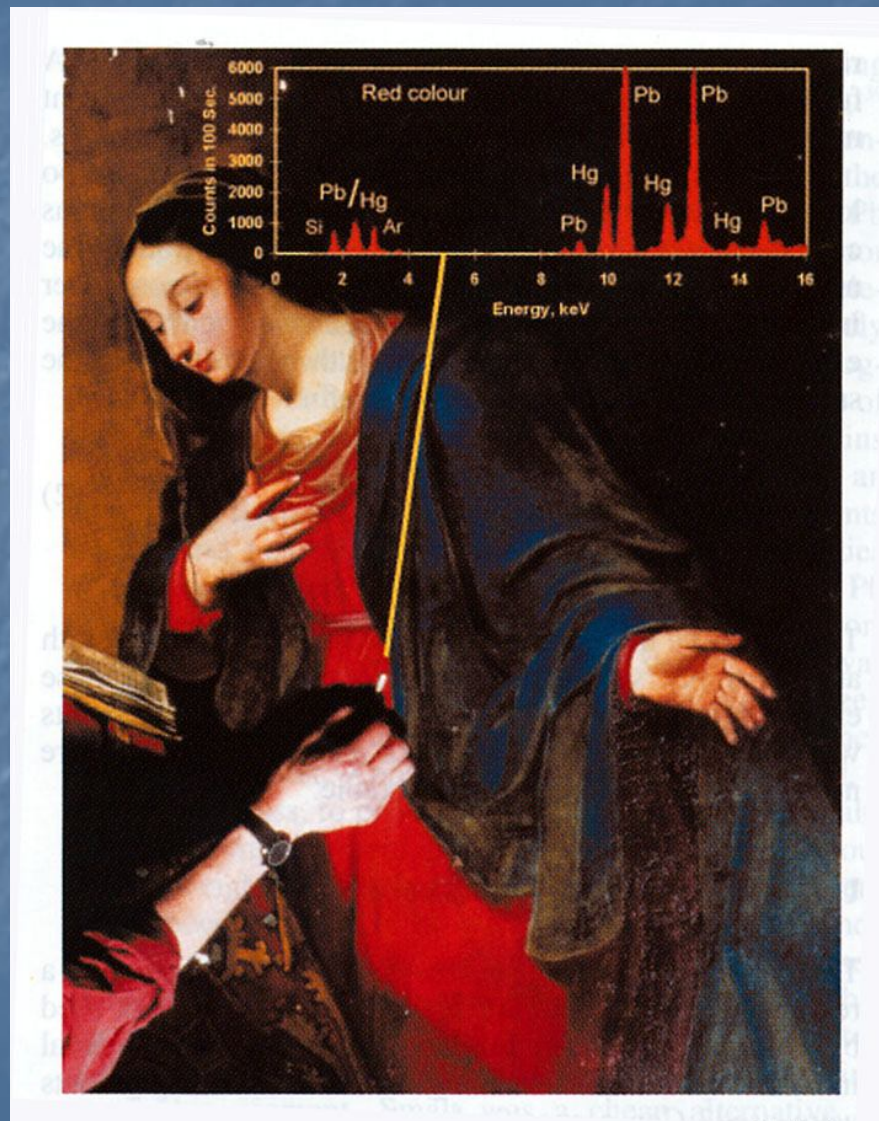
- Sorgente raggi X (energia ≤ 60 keV)
- Campione
- Rivelatore a semiconduttore Si(Pin) raffreddato per effetto Peltier
- Amplificatore di segnale analogico
- Analizzatore multicanale MCA (convertitore analogico/digitale)
- Sistema di acquisizione ed elaborazione dati

Schema della strumentazione



XRF dipinti

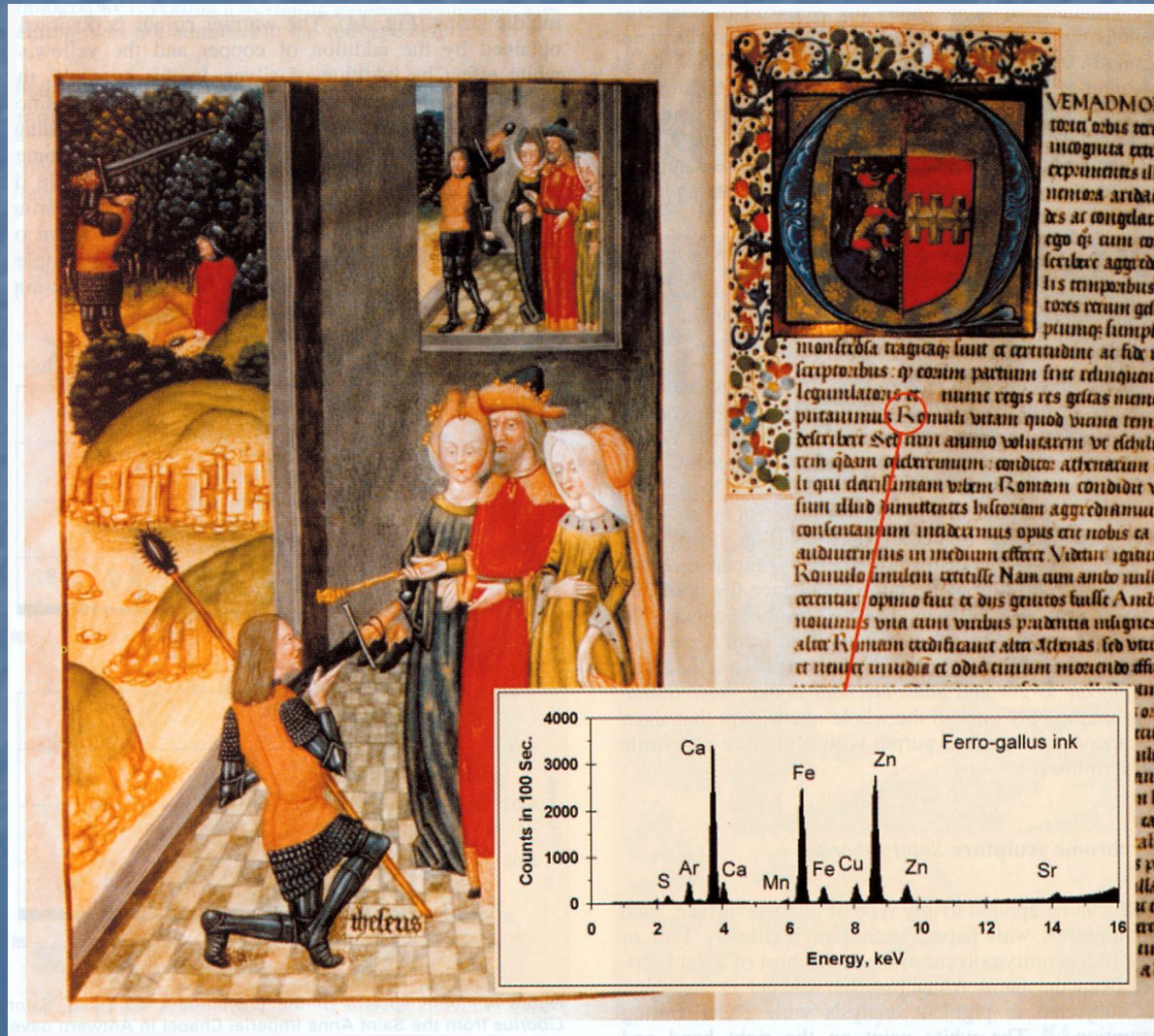
Van den Heuvel - Annunciazione



Applicazione dei RX

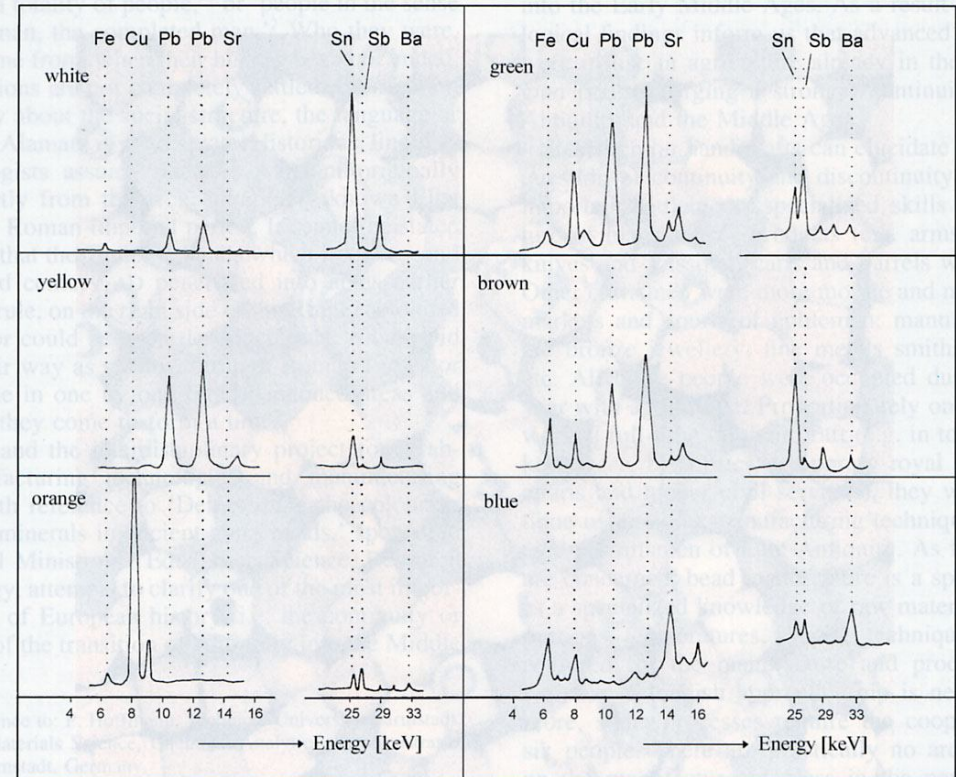
XRF inchiostro

Raffaello de Mercatellis - manoscritto n.109



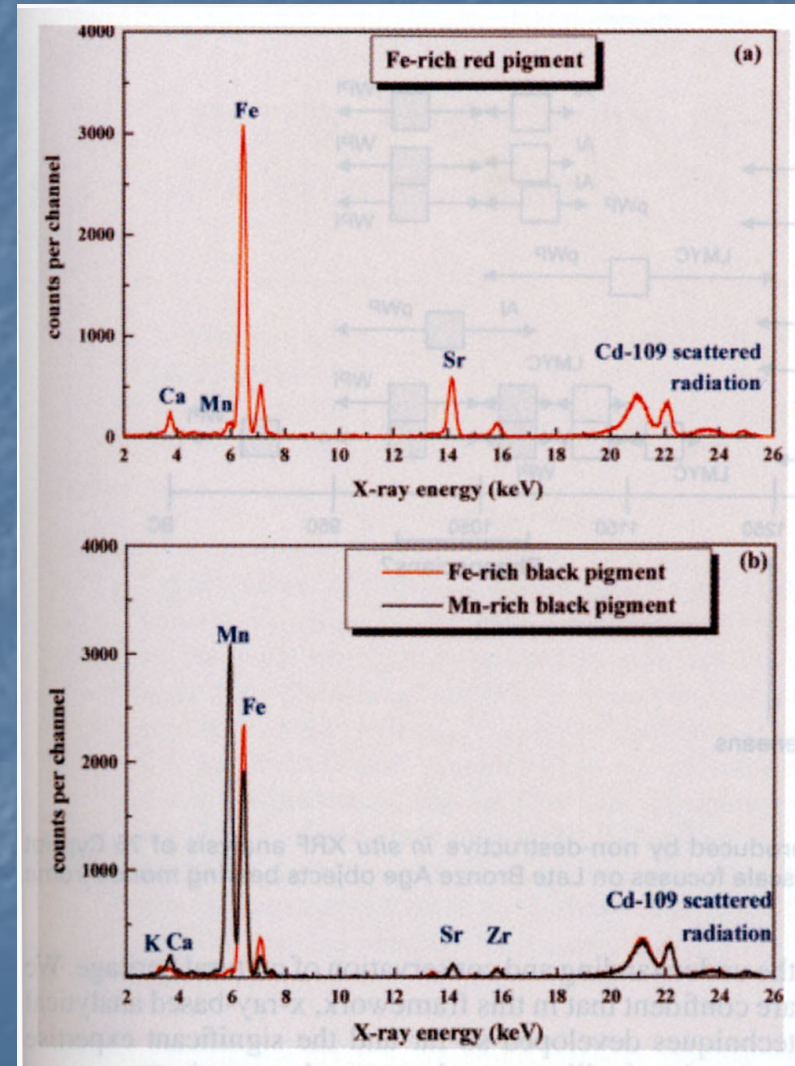
XRF vetro

cimitero Merovingio - perline



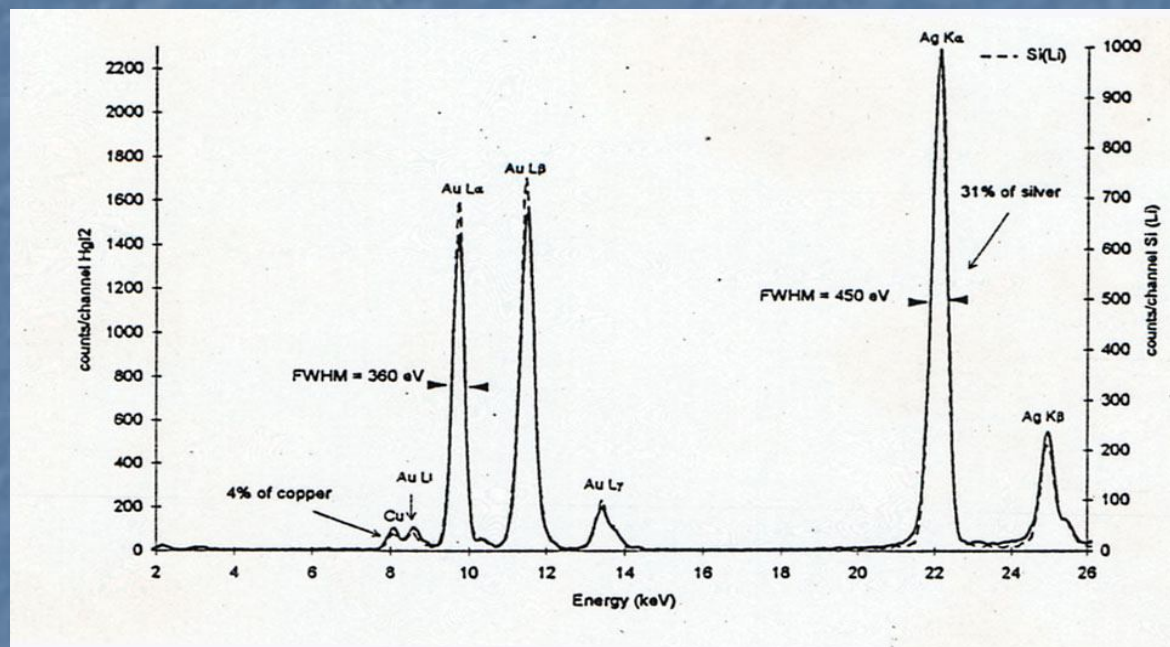
XRF terracotta

Museo di Nicosia – terrecotte cipriote



XRF oro

gioielli etruschi (Collezione Castellani)



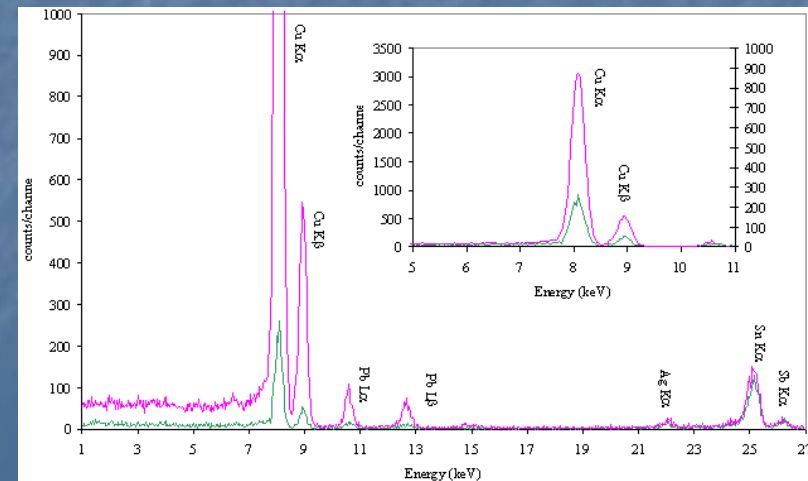
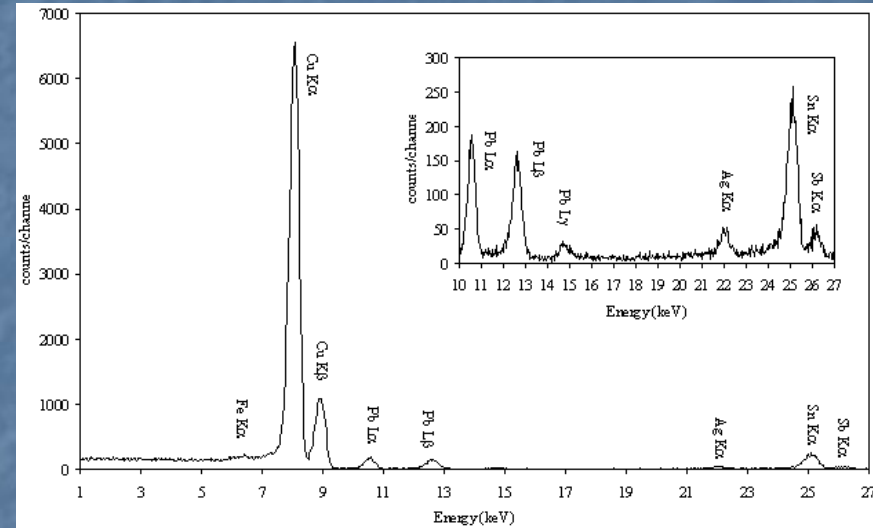
XRF bronzo

studio della patina e della lega in vari punti

Cellini - Perseo

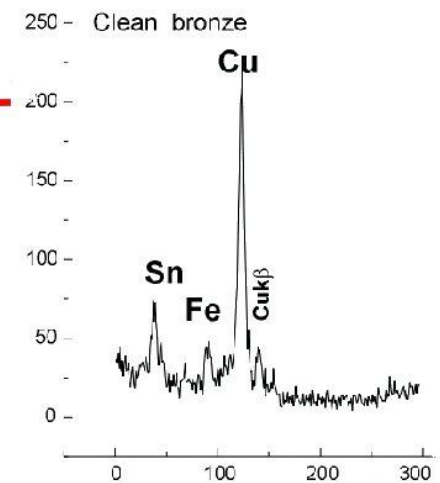
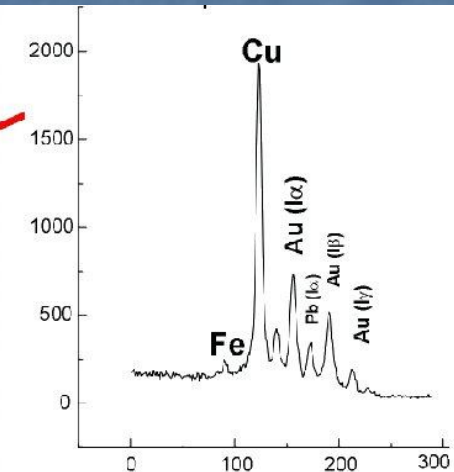
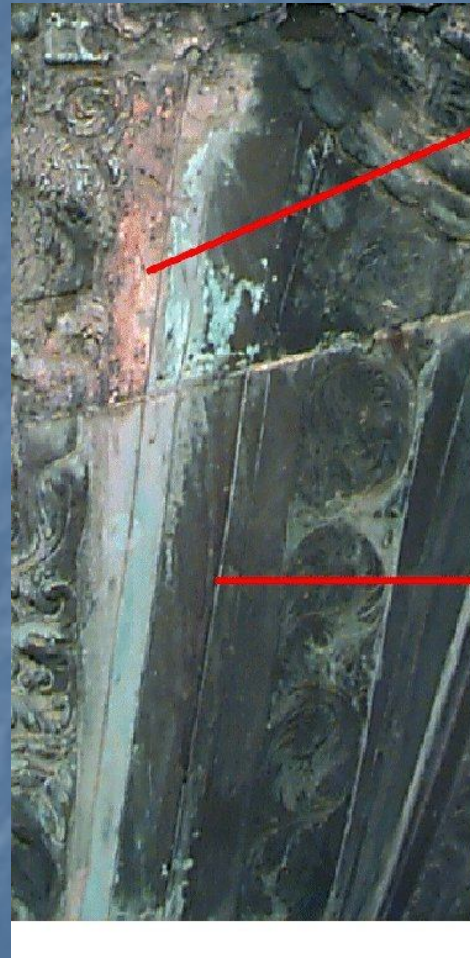


Esempio di influenza della patina sullo spettro.



XRF bronzo

Giove



Applicazione recente (XRF)

- Materiale lapideo
- Affreschi

Informazione

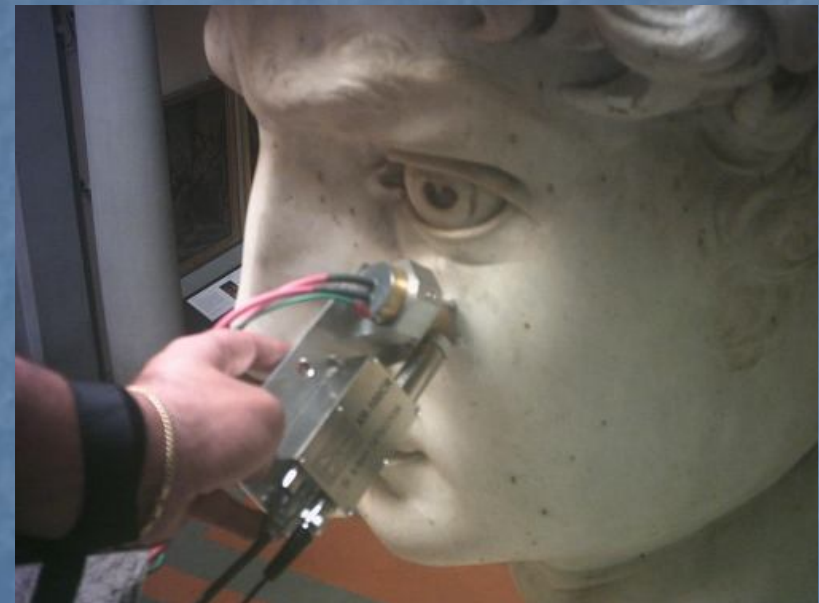
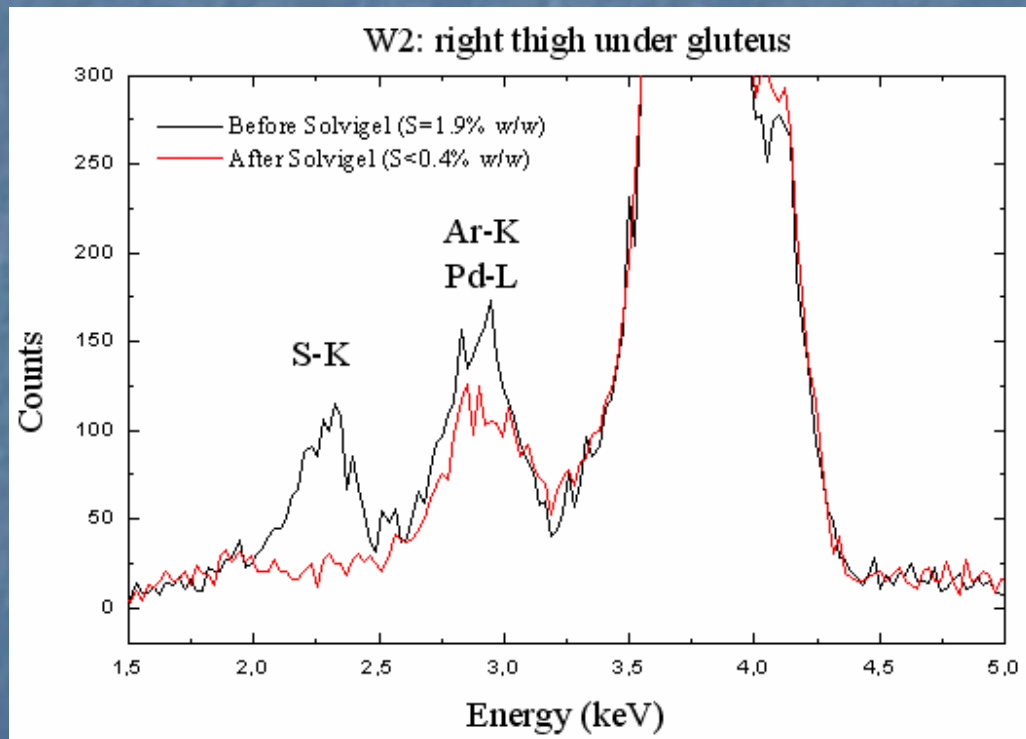
- Analisi quantitativa degli inquinanti S (0.1% min) e Cl

XRF marmo prove di pulizia

studio dei solfati

Michelangelo - David

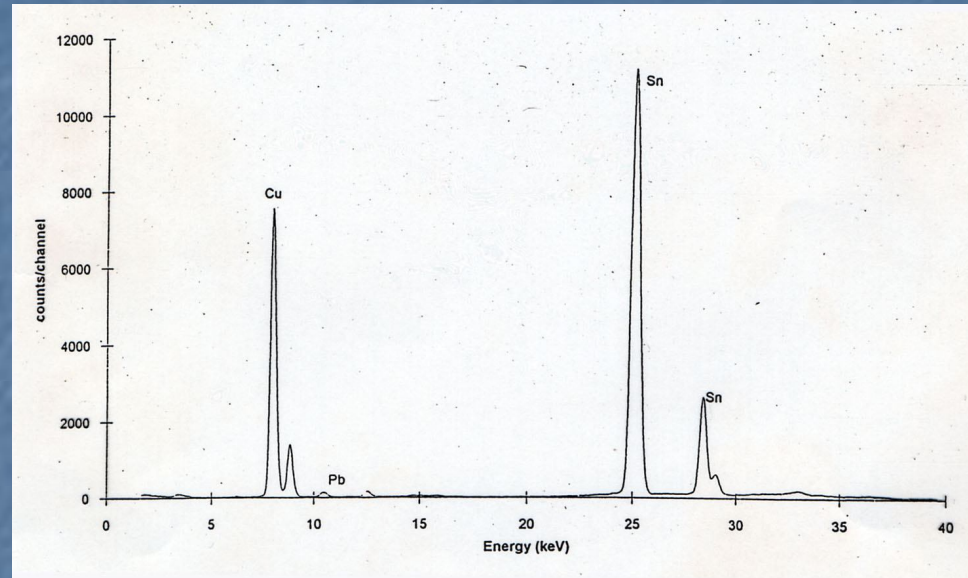
Misura dell'efficacia di un solvente nella rimozione dello Zolfo



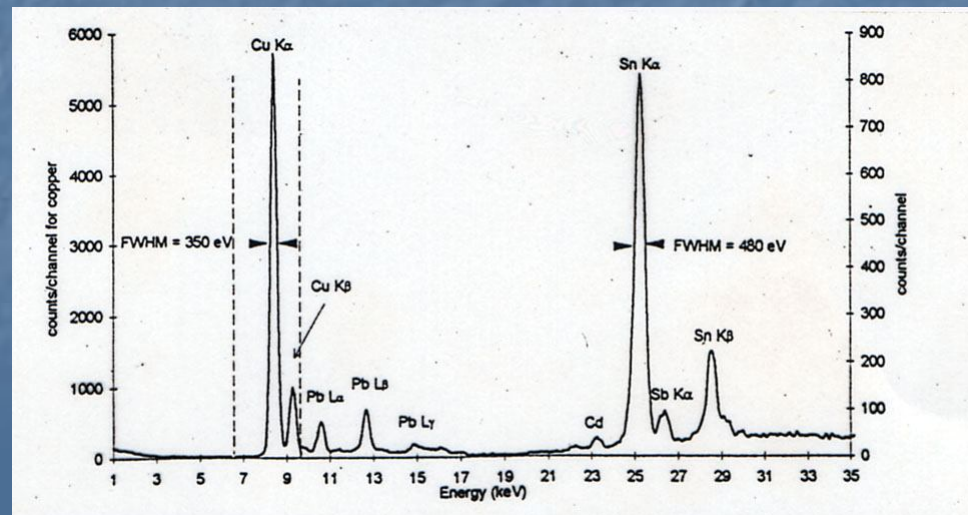
XRF bronzi

Differenti composizioni della lega

Tipico spettro di un bronzo nuragico (presenza di Pb < 1%)

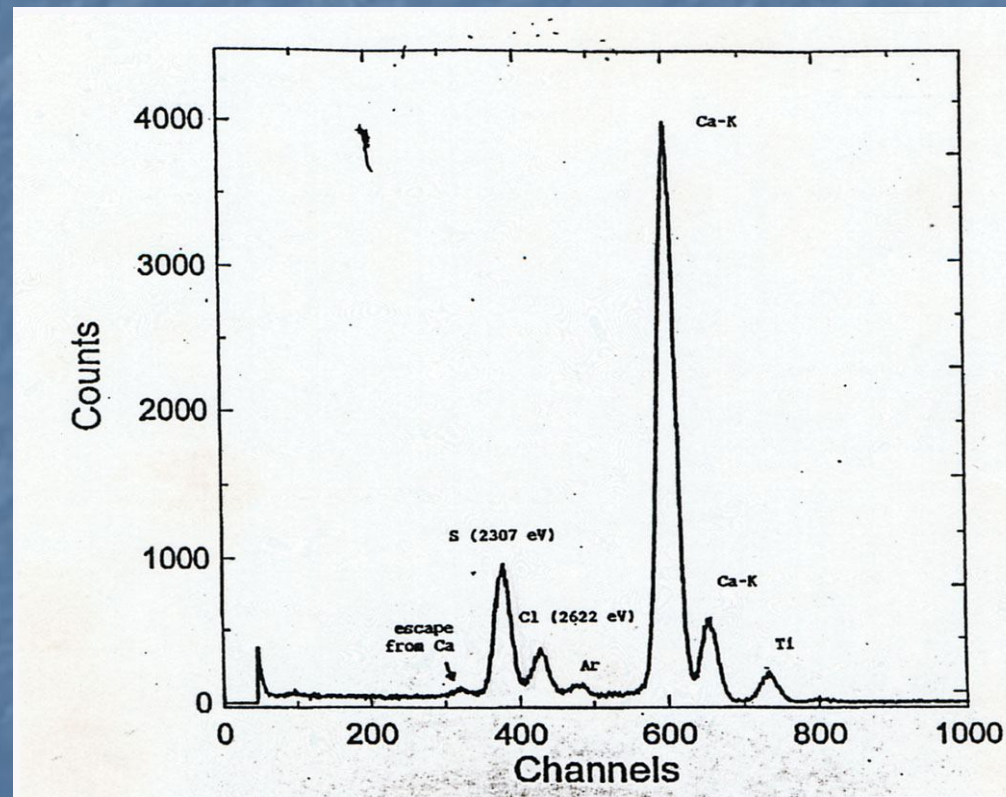


Oggetto di bronzo trovato nell'isola di Vivara (Na)



XRF affresco

studio del deposito di S e Cl, prodotti degli inquinanti atmosferici



Limiti (XRF)

- Non sono individuabili materiali con Z piccolo (elementi organici)
- Non sono individuabili elementi in tracce (frazione di percento)
- Risoluzione del rivelatore (>100 eV)