

# Il pigmento nato sulle sponde del Nilo: sintesi e storia del blu egizio



*“La chimica, tra passato, presente e futuro”*

*2025 / 2026*

Emma Fantoni, 4A

Prof.ssa Roberta Taverna



*Nel blu egizio, l'anima del Nilo si riflette:  
un pigmento che cattura il cielo,  
l'acqua e la promessa di rinascita.*

*- Anonimo*

# INDICE

ABSTRACT .....	3
INTRODUZIONE .....	4
1. LA TEORIA DEL COLORE .....	6
1.1 Lo spettro elettromagnetico .....	6
1.2 La suddivisione della luce nel prisma .....	7
1.3 Il colore .....	8
1.4 Riflessione speculare o diffusa .....	9
1.5 Il lavoro del pittore .....	10
2. BLU EGIZIO $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$ .....	11
3. LA STRUTTURA MICROSCOPICA DEL PIGMENTO .....	12
3.1 Composizione chimica della cuprorivaite .....	12
3.2 La luminescenza .....	12
4. IL BLU EGIZIO NELLA STORIA DELL'ARTE .....	16
4.1 Le origini .....	16
4.2 Formazione del vetro e somiglianza con il blu egizio .....	16
4.3 <i>Hsbd iryt</i> .....	17
4.3 Produzione ed esportazione dall'Egitto .....	19
4.4 Il $\kappa\alpha\nu\acute{o}\varsigma$ nel mondo miceneo .....	21
4.5 Il $\kappa\alpha\nu\acute{o}\varsigma$ nel mondo ellenistico .....	22
4.6 Il caeruleum nel mondo romano .....	23
4.7 Il caeruleum nel Medioevo e il Rinascimento Carolingio .....	25
4.8 La riscoperta durante il Rinascimento .....	26
5. SINTESI DEL BLU EGIZIO .....	28
5.1 Reagenti .....	28
5.2 Soluzione di cloruro d'idrogeno (1M) .....	29
5.3 Sintesi del pigmento .....	30
5.4 Confronto tra pigmenti .....	33
6. TECNICA DELLA STESURA CON AFFRESCO E GOMMA ARABICA .....	35
6.1 Teoria dell'affresco .....	35
6.2 Stesura ad affresco del blu egizio .....	36
6.3 La carbonatazione .....	37
6.4 Unità di tempo .....	38
6.5 Gomma Arabica .....	40

6.6 Stesura del blu egizio con gomma arabica presso il laboratorio .....	40
7.FLUORESCENZA A RAGGI X (XRF) E RIFLETTANZA TOTALE ATTENUATA (ATR) .....	42
7.1 Analisi tramite la spettrofotometria di fluorescenza a raggi X .....	42
7.2 Risultati delle analisi delle tavelle.....	43
7.3 Analisi delle tavelle con affresco e gomma arabica.....	44
7.4 Analisi riflettanza totale attenuata (ATR), associata alla spettroscopia FTIR .....	46
7.5 Funzionamento.....	46
7.6 Analisi e dati raccolti sulle polveri .....	47
7.7 Analisi tavelle con gomma arabica e affresco.....	48
8. ANALISI FIBER OPTICS REFLECTANCE SPECTROSCOPY (FORS) .....	50
8.1 Finalità .....	50
8.2 La luce riflessa .....	51
8.3 Materiale .....	51
8.4 Procedimento .....	52
8.5 Interpretazione del grafico .....	53
9. FOTOGRAFIA MULTISPETTRALE.....	56
9.1 Tecnica .....	56
9.2 Fotografia nel vicino infrarosso (IR).....	56
9.3 Fotografia in fluorescenza ultravioletta (UV).....	57
9.4 Fotografica infrarossa e luce visibile (VIL) .....	58
CONCLUSIONE .....	60
BIBLIOGRAFIA .....	61
ALLEGATO 1.....	64

## ABSTRACT

Il blu egizio, pigmento nato oltre 5000 anni fa sulle sponde del Nilo, affascina i chimici da oltre un secolo. Molti ricercatori per decenni hanno lavorato per determinare la sua composizione e fatto vari tentativi per sintetizzarlo.

In questo lavoro il pigmento è stato ottenuto seguendo un metodo molto simile a quello utilizzato dagli antichi. Nella mia sintesi sono partita dai reagenti a disposizione al Liceo Lugano 1, in particolare dalla malachite prodotta in laboratorio dagli studenti del secondo anno di chimica.

Il pigmento ottenuto è stato utilizzato per effettuare delle stesure ad affresco e con la gomma arabica. Sono state poi utilizzate delle moderne tecniche non invasive per studiarlo e comprenderlo, comparando il pigmento da me sintetizzato con quello acquistato dalla Kremer. Dai risultati di queste analisi possiamo concludere che la sintesi effettuata da me è riuscita perfettamente.

Parallelamente alla parte sperimentale, ho ripercorso anche la sua storia nell'arte attraverso tutti i secoli fino a giungere a noi.

L'obbiettivo del mio lavoro di maturità è stato quello di sintetizzare correttamente il blu egizio e sperimentare tecniche pittoriche e di analisi con esso.

## INTRODUZIONE

L'idea per il mio lavoro di maturità ha preso forma dopo aver ascoltato una conferenza sul blu egizio tenuta dal professore Marco Nicola, ricercatore e studioso di questo pigmento. Dopo aver sentito una sua conferenza ad aprile 2025, mi sono appassionata a questo pigmento e ho deciso di approfondire meglio questo tema.

Discutendo con diversi professori è emersa la possibilità di tentare di sintetizzare il pigmento. Grazie alla disponibilità presso il dipartimento Conservazione e Restauro della SUPSI di Mendrisio dell'utilizzo della muffola, ho sintetizzato un campione di blu egizio sull'arco di diverse settimane. In seguito, dopo aver ottenuto, con stupore di tutti, un buon risultato, su richiesta dei docenti e dei ricercatori ne ho sintetizzato un secondo campione. Una volta conclusa la sintesi, al fine di sperimentare differenti tecniche pittoriche, ho effettuato delle stesure con la tecnica dell'affresco e utilizzando la gomma arabica come legante, sia con il pigmento sintetizzato da me che con quello che invece avevo acquistato dalla ditta Kremer.

Da quel momento ho applicato molte tecniche di analisi sulle polveri dei pigmenti con lo scopo di compararle: la fluorescenza a raggi x (XRF), la riflettanza totale attenuata (ATR), la fiber optics reflectance spectroscopy (FORS) e la fotografia multispettrale. Queste sono analisi moderne non invasive che vengono utilizzate dai ricercatori per lo studio di opere d'arte. Parallelamente alla parte sperimentale, mi sono informata sulla storia del pigmento appassionandomi sempre di più.

Ci tengo a ringraziare di cuore tutti gli specialisti che hanno reso possibile la maggior parte del mio lavoro di maturità: il professore e ricercatore Marco Nicola per avermi fatto scoprire il blu egizio e per aver condiviso con me consigli e indicazioni per la sintesi. I professori e ricercatori della SUPSI di Mendrisio Jacopo Gilardi, Camilla Mauri, Patrizia Moretti e Marta Caroselli, Maurizio Aceto che tra giugno e luglio 2025 mi hanno aiutato a sintetizzare il pigmento e tra luglio e ottobre 2025 mi hanno aiutato a svolgere numerose analisi che sono servite per confermare la buona riuscita della sintesi e per arricchire il mio studio sul blu egizio.

Per quanto riguarda il metodo di ricerca, per la sintesi del pigmento ho impostato il mio lavoro partendo dalla corrispondenza via e-mail con professore Nicola e la lettura di articoli scientifici. Una volta sintetizzato il pigmento ho iniziato la ricerca online di articoli riguardanti le diverse tecniche di analisi che avrei utilizzato, supportata dai ricercatori della SUPSI di Mendrisio e

Emma Fantoni

dalla docente di riferimento per il mio lavoro di maturità, la Prof.ssa Roberta Taverna. Per gli aspetti più legati alla storia dell'arte, ho trovato dei testi interessanti nella biblioteca del Liceo e in quella della SUPSI grazie ai preziosi consigli del professore Jacopo Gilardi.

# 1. LA TEORIA DEL COLORE

## 1.1 Lo spettro elettromagnetico

Fin dall'inizio del '900, gli scienziati concordarono che la luce potesse essere modellizzata sia come un'onda elettromagnetica che un insieme di pacchetti di energia detti fotoni. Grazie a queste nuove conoscenze, si riuscì ad arrivare a creare uno spettro elettromagnetico completo, di cui la parte visibile all'occhio umano è molto piccola<sup>3</sup>.

Le onde o radiazioni elettromagnetiche sono descritte con tre grandezze:

- la prima è la frequenza (misurata in Hz), cioè il numero delle oscillazioni di un'onda in un secondo,
- la seconda è la lunghezza d'onda ( $\lambda$ ), quindi la distanza tra i 2 punti omologhi consecutivi,
- e la terza è la velocità di propagazione, nonché il prodotto tra la frequenza e la lunghezza d'onda che nel vuoto è uguale per tutte le radiazioni elettromagnetiche<sup>2</sup>.

Qui di seguito è rappresentato lo spettro della luce:

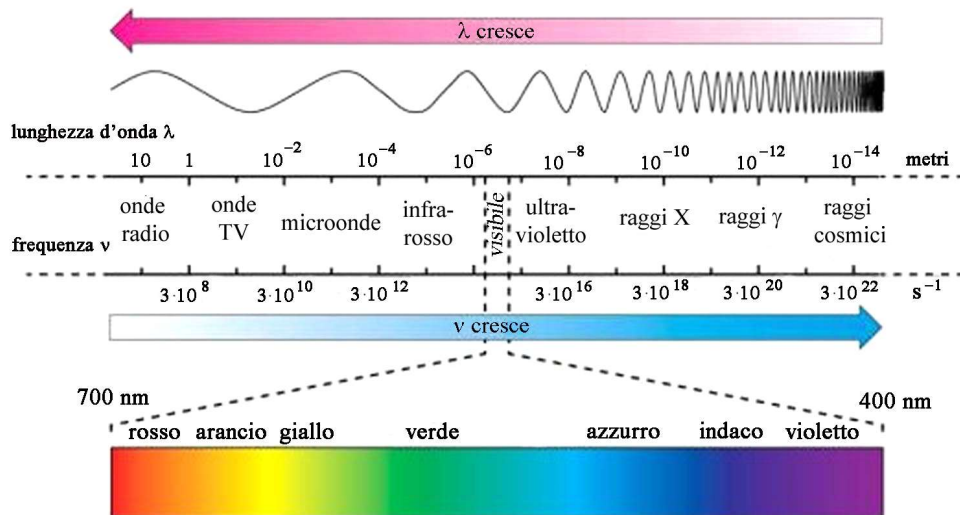


Figura 1.1 <sup>27</sup>: Spettro della luce

Ogni onda elettromagnetica trasmette una determinata energia in base alla sua lunghezza d'onda e alla sua frequenza. Le onde elettromagnetiche possono essere classificate in diverse sottocategorie: radiazioni con la lunghezza d'onda maggiore (dunque con una frequenza minore) identificate come infrarossi, onde del microonde e onde radio. Quelle invece con la

lunghezza d'onda minore (e con la frequenza maggiore) sono identificate come raggi X e raggi gamma <sup>7</sup>.

La parte dello spettro elettromagnetico visibile all'occhio umano è pertanto piccola, rappresenta la parte centrale con la lunghezza d'onda tra 700 nm e 400nm.

L'insieme delle lunghezze d'onda visibili a noi è chiamata "finestra ottica", cioè una parte dello spettro elettromagnetico che grazie alle sue frequenze può essere visibile all'occhio umano. Esistono anche "finestre" per l'infrarosso (vicino, medio e lontano), ma l'occhio umano non può percepirle poiché hanno una lunghezza d'onda minore da quella a noi visibile<sup>7</sup>.

Non tutti gli esseri viventi però riescono a vedere lo stesso spettro di colori. Le api, per esempio, riescono a percepire solo la regione dell'ultravioletto, poiché il nettare dei fiori a sua volta emette una luminescenza che le attira<sup>7</sup>. Un altro esempio può essere quello dei gatti, che a differenza dell'uomo hanno solo due coni ottici: infatti, i colori che riescono a riconoscere sono quelli con la lunghezza d'onda compresa tra il violetto e il verde. Non riescono invece a distinguere i colori con toni più caldi<sup>9</sup>.

## 1.2 La suddivisione della luce nel prisma

La luce del sole, che alla vista sembra essere bianca, in realtà è un insieme di radiazioni elettromagnetiche di cui ognuna ha una propria lunghezza d'onda. Quando la luce solare colpisce un materiale, le diverse radiazioni che hanno una lunghezza d'onda diversa vengono deviate in direzioni differenti.

Sulla base di questa teoria si creò in seguito lo schema del prisma, in cui si può vedere la luce bianca del sole che attraversa il prisma (da sinistra) e le diverse radiazioni che vengono rifratte in modo differente (a destra). Esse, in base alla loro lunghezza d'onda, risultano di diversi colori.



Figura 1.2 <sup>27</sup>: Rifrazione della luce

L'unico caso in cui possiamo osservare il fenomeno della frammentazione della luce ad occhio nudo è quando compare l'arcobaleno: infatti la luce bianca del sole, quando passa attraverso le gocce d'acqua piovana, viene divisa nelle sue diverse composizioni riflettendo così tutte le radiazioni dello specchio<sup>2</sup>.

### 1.3 Il colore

La definizione di colore non è un concetto preciso, bensì un insieme di diverse componenti:

*“sensazione fisiologica che si prova sotto l'effetto di luci di diversa composizione spettrale (colore soggettivo) e la luce stessa (colore oggettivo), costituita da radiazioni elettromagnetiche di determinate lunghezze d'onda”<sup>6</sup>*

Il colore è dunque un insieme di componenti fisiche e sensoriali. Dal punto di vista fisico, il colore è semplicemente una proprietà della materia, un fenomeno complesso che dipende dalla quantità e dalla qualità della luce che colpisce un oggetto<sup>7</sup>.

Per avere una definizione più precisa, però, serve aggiungere la componente sensoriale: infatti nessuno percepisce lo stesso colore in ugual modo. Ciò dipende da diversi fattori anche psicologici che possono modificare cromaticamente il colore in base alla propria cultura o alle esperienze, che potrebbero variare il grado di saturazione o la purezza e renderlo in questo modo diverso<sup>8</sup>.

Il colore, dunque, fa parte di quelle qualità della sensazione visiva delle varie radiazioni elettromagnetiche comprese nello spettro visibile: è una proprietà soggettiva e non misurabile<sup>7</sup>.

Il motivo per cui vediamo un oggetto con un determinato colore è dovuto all'assorbimento di tutte le radiazioni elettromagnetiche, tranne quella del colore opposto alla radiazione che andrà a dare il colore all'oggetto. Infatti, se un corpo assorbe la luce blu, il colore risultante è l'insieme di tutti gli altri tranne il blu, che dunque rende l'oggetto arancione<sup>3</sup>.

Basandosi su queste teorie si creò “il cerchio cromatico”, al centro si possono vedere i tre colori primari (giallo, blu e rosso) e subito intorno ad essi sono presenti i tre colori secondari (verde, blu scuro e arancione). Nel cerchio dei colori della fascia esterna, si trovano invece i colori composti da quelli secondari. La loro posizione non è casuale, infatti sono opposti al colore che compare se tutte le radiazioni elettromagnetiche vengono assorbite<sup>3</sup>.

I colori vengono classificati in colori primari, secondari e terziari. I colori primari (rosso, blu e giallo) sono quelli di base dai quali si ottengono tutti gli altri attraverso la loro combinazione per sintesi additiva o sottrattiva<sup>7</sup>.



Figura 1.3 <sup>29</sup>: Il cerchio cromatico

#### 1.4 Riflessione speculare o diffusa

Il motivo per cui una tela “trattiene un colore” mentre uno specchio riflette la luce è che la tela è una superficie rugosa, e quando un raggio del sole la colpisce un colore viene assorbito mentre gli altri si diffondono dando vita ad una infinità di raggi di luce colorati.

Lo specchio invece è una superficie liscia e levigata, quindi quando il raggio di sole si riflette in un punto preciso la luce non viene assorbita ma totalmente riflessa<sup>2</sup>.

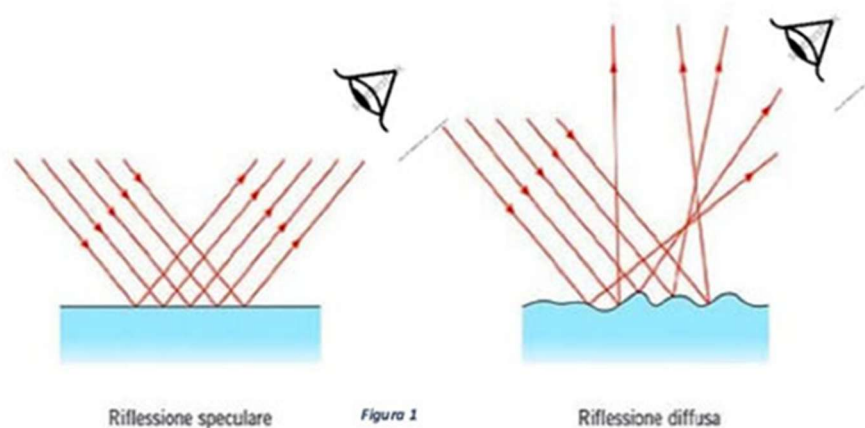


Figura 1.4 <sup>30</sup>: Riflessione della luce

## 1.5 Il lavoro del pittore

Il lavoro del pittore è “manipolare” la luce bianca del sole sulla tela. Essi per colorare le superfici, usano sostanze che assorbono le diverse radiazioni dello spettro visibile e il colore che l'occhio umano vede è corrispondente alle radiazioni riflesse (il colore complementare)<sup>2</sup>.

Il colore (inteso come pittura) è composto da un pigmento, che è a sua volta formato da particelle di dimensioni micrometriche (millesimo di millimetro) che, se disperse senza sciogliersi in un legante, formano il colore. Una volta che il pigmento riceve la luce del sole la diffonde in tutte le direzioni. Il legante invece è il mezzo disperdente che esalta i colori e crea sfumature<sup>3</sup>.

## 2. BLU EGIZIO $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$

Il blu egizio è considerato il pigmento sintetico più antico al mondo. Esso è considerato una “sostanziosa alchimia” tra la silice, la calce, il rame e il fondente alcalino, cotta ad alte temperature in forni antichi. Il suo colore, un azzurro profondo e brillante, ha decorato statue, affreschi, tombe e mosaici dall’Egitto faraonico fino al mondo romano ed oltre, con l’obiettivo di sostituire pietre preziose come l’azzurrite e il lapislazzuli.

Ne esistevano più varianti cromatiche che dipendevano dal metodo e dalle diverse temperature di cottura e le materie prime utilizzate.

I ricercatori sperimentano da tempo diverse sintesi e condizioni di produzione poiché esse ne influenzano il colore e la sua composizione.

### 3. LA STRUTTURA MICROSCOPICA DEL PIGMENTO

#### 3.1 Composizione chimica della cuprorivaite

Il colore blu del pigmento è dovuto al tetra-silicato di rame e calcio  $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$ , che corrisponde alla struttura del rarissimo minerale cuprorivaite. Si tratta di un silicato di rame e calcio che ha una struttura a lamine, costituita da silicati anidri disposti ad anello in ogni singolo piano, con una simmetria tipica dei composti dal silicio. Nella sua struttura sono presenti dei cationi di calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e di rame ( $\text{Cu}^{2+}$ ) che interagiscono con un silicato complesso  $[\text{Si}_4\text{O}_{10}]^{4-}$  generato dai tetraedri  $\text{SiO}_4$  che si legano condividendo gli ossigeni<sup>46</sup>.

Ciò che caratterizza questo specifico colore e delle sue interessanti proprietà, che approfondiremo qui di seguito, è lo ione  $\text{Cu}^{2+}$  coordinato equatorialmente con quattro ossigeni dei tetraedri  $\text{SiO}_4$  che vanno a formare delle strutture quadrate planari  $[\text{CuO}_4]^{6-}$ .

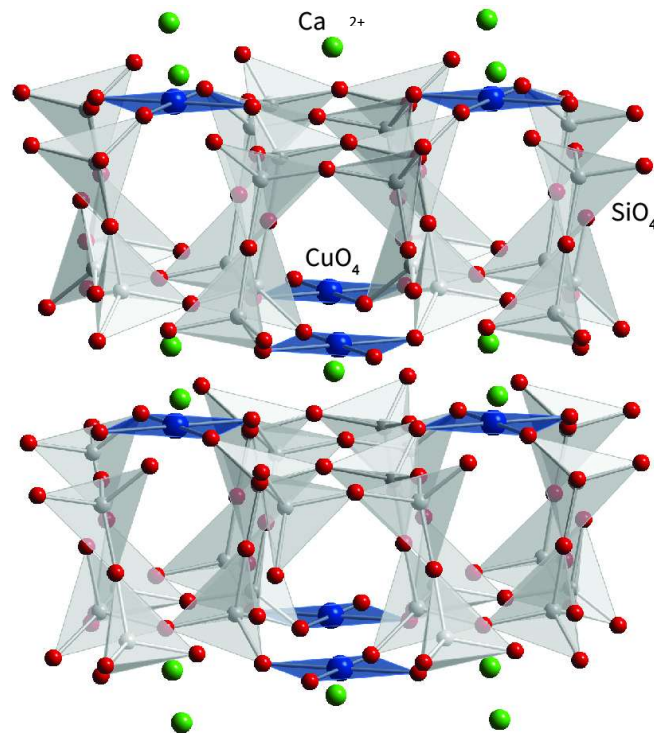


Figura 3.1<sup>68</sup> : Struttura del pigmento

#### 3.2 La luminescenza

La cuprorivaite ha una proprietà molto particolare che la rende interessante ancora per le sue applicazioni nel mondo moderno: possiede una emissione molto intensa nel vicino infrarosso quando irradiato ed eccitato con la luce visibile. Questo fenomeno si chiama luminescenza indotta nel visibile.

La luminescenza consiste nel fenomeno di emissioni di radiazioni elettromagnetiche dovuto a delle transizioni elettroniche nella sostanza emettitrice, che passa da uno stato di elevata energia ad uno stato di minore energia<sup>69</sup>.

Questa emissione nell'infrarosso indotta da luce visibile rende il blu egizio immediatamente riconoscibile e consente ai restauratori di identificarlo facilmente nei reperti antichi anche quando ormai il colore visibile è scomparso, alterato dal tempo o presente in piccolissime quantità e miscelato con altri pigmenti<sup>46</sup>.



*Figura 3.2 <sup>49</sup>: Visto ad occhio umano Visto con il visore IR*

Infatti, se irraggiato con la luce visibile in un luogo scuro con una telecamera sensibile alla radiazione infrarossa o con un visore IR, il blu egizio è luminescente, ossia spicca in modo evidente nel buio, come si può notare nella figura 3.2, questo lo distingue da altri pigmenti blu.

Dal punto di vista spettroscopico, il blu egizio mostra una banda di assorbimento da 560 a 630 nm e una banda minore centrata intorno a 790 nm ed emette radiazioni con la lunghezza d'onda a circa 910 nm.

Il fenomeno che causa la luminescenza avviene quando la luce visibile colpisce gli elettroni degli ioni  $\text{Cu}^{2+}$  del rame (contenuto nel silicato di rame), i quali assorbono l'energia della radiazione diventando in questo modo eccitati. Essi hanno tre differenti transizioni elettroniche possibili e quando tornano al loro stato stabile riemettono l'energia sotto forma di luce nel range del vicino infrarosso<sup>46</sup>.

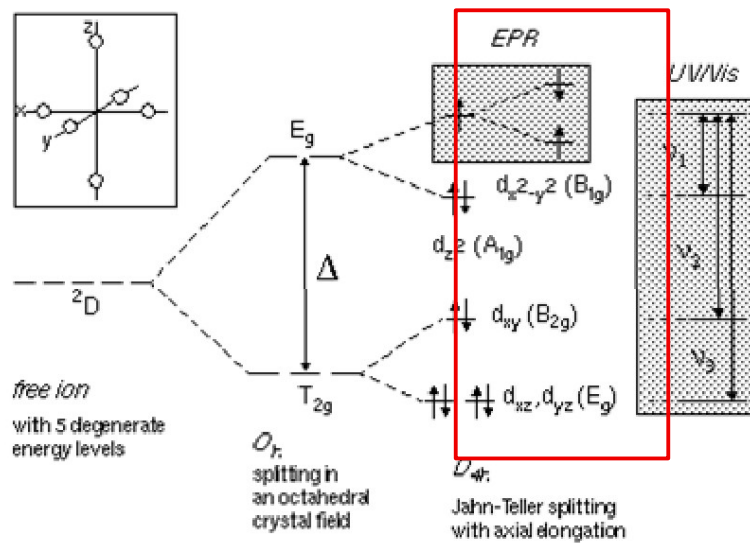


Figura 3.3<sup>46</sup> : schema delle transazioni elettroniche

Come possiamo notare dall'immagine, ci sono tre diversi stati che gli elettroni degli ioni  $\text{Cu}^{2+}$  possono raggiungere se eccitati. Se uno degli elettroni viene eccitato, si sposta dal suo stadio iniziale in cui è stabile a uno a più alta energia e instabile. Quando torna ad un livello più stabile rilascia energia che si manifesta sotto forma di luminescenza<sup>46</sup>.

L'emissione nell'infrarosso della cuprorivaite è eccezionalmente intensa e la durata della luminescenza è notevole. Questa proprietà scoperta recentemente non solo aiuta a definire facilmente la presenza o meno del blu egizio, ma può essere utilizzata anche in altri ambiti come nella costruzione di pannelli fotovoltaici, la produzione di laser, nell'ambito della biomedicina o per inchiostri di sicurezza.

Ciò rende la cuproivaite un materiale molto interessante per le applicazioni moderne anche perché è un materiale molto stabile che dunque perdura nel tempo mantenendo sempre la caratteristica della luminescenza.

Dallo studio e l'analisi di campioni di blu egizio antico, esso si può identificare come un materiale eterogeneo multifasico in cui la cuprorivaite è sicuramente il cromoforo principale. Oltre alla cuprorivaite, sono presenti vetri silicei dopati con rame, wollaston e quarzo. L'unione tra queste componenti e la presenza di fondenti differenti determinano la tonalità e la saturazione del colore.

## 4. IL BLU EGIZIO NELLA STORIA DELL'ARTE

Non sappiamo con esattezza né quando né dove il blu egizio è stato sintetizzato per la prima volta, ma possiamo affermare che è stato uno tra i pochi pigmenti ad essere usato per secoli da tutte le civiltà del Mediterraneo e non solo.

### 4.1 Le origini

La natura del pigmento evidenzia una somiglianza con il vetro, un materiale datato nello stesso periodo e nella stessa area geografica. Per questo motivo è chiamato anche “materiale vetroso antico” dagli studiosi. Il paragone avviene poiché sono prodotti a partire da materiali molto simili (sabbia, carbonato di sodio e carbonato di calcio) e necessitano entrambi di cuocere a temperature elevate per molto tempo. Infatti, si ipotizza che la sintesi del blu egizio sia avvenuta inizialmente nello stesso luogo e con la stessa tecnica con cui si produceva il vetro<sup>12</sup>.

Il dubbio sul luogo d'origine del blu egizio è dovuto a due possibili ipotesi: la prima è che fosse stato creato in Egitto e che quindi nelle botteghe dove fabbricavano il vetro creavano anche il blu egizio, la seconda ipotesi è che il pigmento sia stato concepito in Mesopotamia. Infatti, a Tell Asmar è stato trovato un cilindro di vetro risalente al 2500 a.C. circa e, dato che per essere trasparente deve essere stato cotto ad una temperatura elevata, si ipotizza che in Mesopotamia avessero già affinato delle tecniche per cuocere ad alte temperature, come quelle necessarie per il vetro e quindi anche per la sintesi del blu egizio<sup>12</sup>.

Ad oggi non sappiamo quale delle due tesi sia corretta, poiché i materiali provenienti dalla Mesopotamia sono molti meno di quelli egiziani a causa del clima umido che non permette la preservazione di alcuni oggetti<sup>12</sup>.

Ciò che invece possiamo affermare è che sia nella civiltà egiziana che mesopotamica esistevano tre tipi di vetri blu: il vetro blu scuro, per la presenza dell'ossido di cobalto, il vetro turchese, per la presenza di ossido di rame e una pasta di vetro, nonché il blu egizio, che gli egiziani chiamano *lapislazzuli fabbricato* e i mesopotamici *uknû merku*<sup>12</sup>.

### 4.2 Formazione del vetro e somiglianza con il blu egizio

Il vetro è un materiale amorfo creato sin dall'antichità, e si ritiene essere il primo materiale sintetizzato. Le origini sono riconducibili all'antico Egitto: infatti, i reperti più antichi sono delle perline di vetro utilizzate per la produzione di gioielli. Nei secoli successivi, come il blu egizio, il vetro ha continuato ad avere successo fino ai giorni nostri<sup>66</sup>.

Nell'immaginario comune, il vetro è un materiale trasparente di cui molti oggetti quotidiani sono composti. In realtà ha una accezione molto più estesa: è un solido che non possiede a livello microscopico un ordine atomico a lungo raggio e che, se riscaldato, rammollisce progressivamente fino a giungere allo stato fuso. Essendo a livello microscopico ordinato a breve distanza, il vetro non ha una temperatura di fusione alta e specifica e dunque diventa più malleabile per temperature anche più basse con un alto tasso di viscosità <sup>66</sup>.

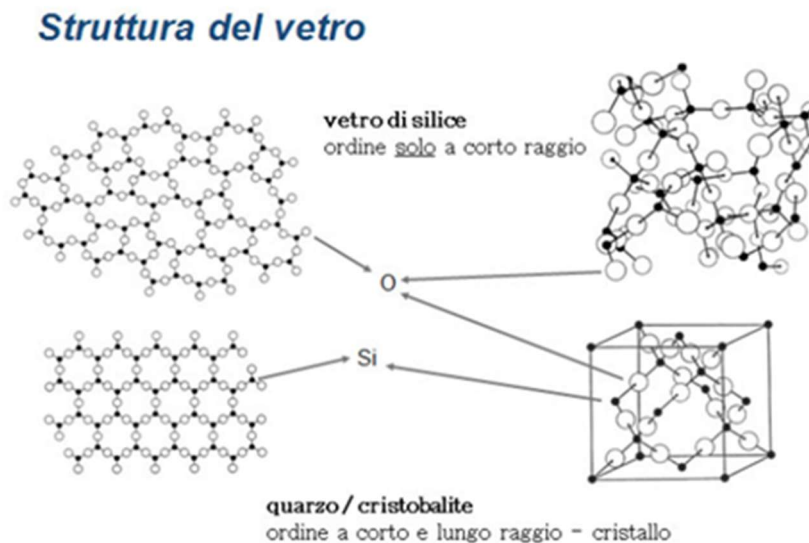


Figura 4.1 <sup>65</sup>: Struttura del vetro

### 4.3 *Hsbd iryt*

L'*hsbd* (lapislazzuli) *iryt* (fabbricato), o blu egizio, è il primo pigmento sintetizzato dall'uomo in sostituzione al lapislazzuli afgano, che era molto costoso. Inizialmente era utilizzato per la creazione di perle, oggetti di corredi funebri e gioielli lussuosi. Pur essendo meno costoso del lapislazzuli afgano e non fosse una pietra naturale raffinata, ma un pigmento sintetizzato dall'uomo, il suo utilizzo era simbolo di grande lusso<sup>12</sup>.

Il pigmento per gli egizi aveva inoltre una valenza divina: il blu egizio era il colore del cielo, dell'acqua, più nello specifico del Nilo, e quindi era simbolo anche di fertilità e di rinascita, era considerato un colore protettivo.

Oltre ad essere utilizzato come pigmento per pitture, esso veniva modellato per la creazione di piccoli oggetti per gioielli, decorazioni di mobili, vasi o piccoli animali: il pigmento veniva inserito in stampi e cotto ad alte temperature<sup>12</sup>.

Non si conosce con precisione chi fosse il principale produttore di blu egizio, ma si ipotizza che fosse un'autorità che voleva nascondere la ricetta per mantenere il monopolio della conoscenza del pigmento e della sua produzione. L'utilizzo del blu egizio si attesta per diversi millenni grazie alla sua presenza nei corredi funebri<sup>12</sup>.



Figura 4.2 <sup>37</sup>: Ippopotamo, MET NYC



Figura 4.3 <sup>38</sup>: Parte del corredo funebre Tutankhamon 1326 a.C

Non si sa il motivo per cui gli egizi continuassero a sintetizzare questo pigmento benché disponessero anche altri pigmenti blu come l'azzurrite o l'oltremare (che verrà utilizzata molto dai pittori europei). Il blu egizio e l'azzurrite sono molto simili per le loro caratteristiche fisiche: entrambi sono pigmenti poco coprenti, e per questo motivo si utilizzano con una granulometria elevata che rende difficile la loro stesura. I due pigmenti si differenziano unicamente dal punto di vista chimico si differenziano<sup>12</sup>.

Una delle prime testimonianze del largo utilizzo del blu egizio è la stele di Mehu di Saqqara, riconducibile alla quarta dinastia (2620 a.C.-2500 a.C.). Dalle analisi, risulta che il pigmento fosse stato sintetizzato molto bene (con delle proporzioni molto equilibrate), e per questo si può dedurre che la tecnica fosse già stata affinata<sup>12</sup>.

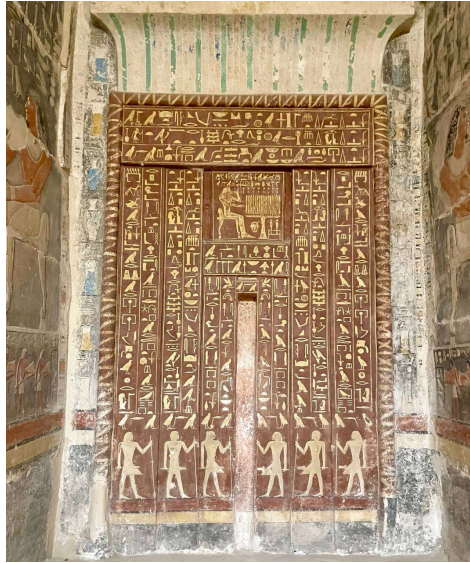


Figura 4.4 <sup>51</sup>: Stele di Mehu, Saqqara

A partire dalla sesta dinastia (2340 a.C.- 2160 a.C.) si incominciò ad utilizzare il pigmento per decorare le tombe. Nel corso dei secoli si notano delle interruzioni del suo utilizzo, dovute probabilmente a problemi politici o meteorologici che ne impedivano la sua produzione e la commissione di altre grandi opere.

### 4.3 Produzione ed esportazione dall'Egitto

Poiché non ci sono molte fonti che lo attestano, si ipotizza che la preparazione del pigmento fosse una tradizione tramandata oralmente<sup>12</sup>.

Dallo studio di diversi campioni, risulta che i materiali utilizzati erano tre: uno contenente calcio, uno rame e una silice. Per quando riguarda la silice e il calcio, gli egizi tendevano ad utilizzare la sabbia poiché ne avevano in grande quantità e comprendeva entrambi i materiali. Oltre ai tre principali materiali, era necessario un *fondente*, ossia un materiale contenente metallo alcalino (sodio o potassio) per abbassare la temperatura di cottura. Dalle analisi sono emerse anche delle tracce di arsenico, zinco e piombo. Per ottenere l'elemento Cu (rame) nell'antico Egitto erano soliti usare per produrre il blu egizio dei rottami di rame metallico o malachite.

Questo è un indizio fondamentale per la datazione degli oggetti, poiché a seconda dell'epoca a cui risale la creazione, c'era un determinato tipo di metallo contenente rame. Fino al regno di Thoutmosis (1504 a.C.- 1492 a.C.) si tendeva ad utilizzare un metallo contenente arsenico; in seguito, fino al XIX secolo a.C., si utilizzarono leghe di bronzo o di stagno, e infine metalli contenenti piombo fino all'epoca romana<sup>12</sup>.

Quando salì al trono Thoutmosis III della XVIII dinastia (1504 a.C.), iniziò ad espandere il regno annettendo altri terreni intorno all'Egitto. Questo allargamento del regno portò un aumento di costruzioni, decorazioni di templi e corredi funebri.



Figura 4.5 <sup>39</sup>: Pettorale di Sesotris II, Museo del Cairo

In questo periodo di grandi ricchezze, si verifica una innovazione delle tecniche di produzione e si dividono le fabbriche di vetro da quelle di *hsbd iryt*. Un fattore che aiutò ad aumentare la produzione del blu egizio rispetto a quella dell'azzurrite è la sua invariabilità nel tempo: quest'ultima, a contatto con l'umidità, diventa malachite verde. Il *hsbd iryt* divenne il pigmento più esportato dall'età del bronzo e continuerà a venir usato in diverse pitture murali di tutte le civiltà che si affacciano al Mar Mediterraneo<sup>12</sup>.

Si iniziò a commerciare in modo massiccio il blu egizio vendendolo sotto forma di blocchetti cilindrici di diametro di circa 18cm e altezza 3cm del peso di circa un chilo. La sua forma variò nel corso dei secoli: inizialmente si trattava di blocchetti cilindrici, in seguito di palline o dischi piatti fino ad arrivare a delle palline molto piccole per favorire le lavorazioni successive che richiedevano delle ricotture.

È importante ricordare che il blu egizio fino all'epoca romana continuerà ad essere prodotto sempre con la stessa tecnica. L'unica cosa che cambia è il nome che lo designa come vedremo nei seguenti paragrafi.



Figura 4.6 <sup>40</sup>: Raffigurazione del libro dei morti, British Museum

#### 4.4 Il κυανός nel mondo miceneo

Nel mondo miceneo il pigmento *hsbd iryt* è attestato come κυανός (kuanos). Inizialmente era usato per decorare intarsi di mobili come tavoli e poltrone di lusso, gli artigiani che lo fabbricavano si chiamavano *kuwanowokoi* ed erano molto rinomati. Le prime attestazioni dell'utilizzo del kuanos (*hsbd iryt*) come pigmento risalgono al 3000-2100 a.C. in una casa a Cnosso, in seguito il suo utilizzo si espanse in tutta la Grecia<sup>12</sup>.



Figura 4.7 <sup>41</sup>: Il pescatore, Akrotiri, Santorini

Oltre a molte pitture murali, la civiltà di Micene ci ha lasciato tavolette incise e i poemi omerici. In questi ultimi, Omero con il termine kuanos intende il blu egizio (poiché era l'unico blu che conoscevano).

*ἢ σφωῖν πρῶτον μὲν ἐπιπροΐηλε τράπεζαν καλὴν κυανόπεζαν ἑύξοον,*

*Prima la donna apparecchiò loro la tavola bella, ben levigata, con i piedi di colore azzurro cupo*<sup>24</sup>

Un'osservazione interessante è l'assenza di una parola per definire il blu nella Grecia antica. Infatti, con il termine *kuanos* si definisce il blu, il grigio, il nero, ma anche il colore del mare e del cielo. Dopo la caduta di Micene abbiamo sei secoli di assenza di qualsiasi attestazione dell'utilizzo di *kuanos*. Questo è dovuto al periodo storico di degrado della società egiziana e alla distruzione di Micene, sommersa dalla lava. A causa del periodo instabile, quindi, il commercio internazionale fu quasi del tutto assente<sup>12</sup>.

#### 4.5 Il *kuavós* nel mondo ellenistico

Dal VI secolo a.C. ritroviamo traccia del pigmento *hsbd iryt* nelle decorazioni del tempio di Aphaia a Egine (580-500 a.C.) e nelle decorazioni delle tombe regali macedoni.

Con il tempo, l'uso del blu egizio divenne molto più frequente grazie ad una maggiore facilità di reperirlo, e di conseguenza il suo prezzo si abbassò diventando un bene quasi comune non più di lusso. Si incominciò ad utilizzarlo per dipingere intere scene su pareti, vasi per oggetti modesti<sup>12</sup>.

Oltre che su suolo egiziano e greco, il suo utilizzo si espanse anche nella Magna Grecia. Al porto di Gravisca (vicino a Tarquinia, nel Lazio), presso un tempio in cui i viandanti portavano offerte e celebravano le loro divinità protettrici, tra le offerte trovate sono stati rinvenuti dei blocchi di blu egizio.

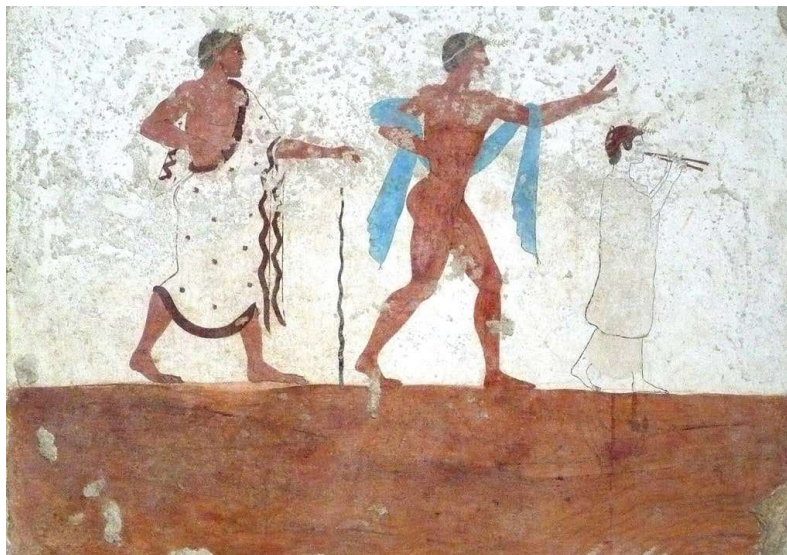


Figura 4.8 <sup>42</sup>: I Danzatori, Peastum

Il *kuwano*, benché fosse molto venduto in tutto il Mediterraneo, continuava ad essere prodotto in Egitto e Mesopotamia. Solo nel IV sec a. C. si costruì il primo porto ad Alessandria, e molte

fabbriche si svilupparono attorno ad esso. Gli artigiani divennero molto rinomati e questa città divenne il centro di produzione principale del pigmento<sup>12</sup>.

#### 4.6 Il caeruleum nel mondo romano

Nel mondo romano il pigmento *hsbd iryt* si chiamava *coeruleum*. Non sappiamo con precisione quando si iniziò ad utilizzarlo, ma siamo a conoscenza della sua esistenza grazie agli scritti di Vitruvio, l'unico antico scrittore che lo cita. Nella Roma antica il blu egizio rappresentava un lusso riservato ai personaggi più prestigiosi, e veniva utilizzato per ottenere varietà cromatiche ed effetti di luminosità<sup>26</sup>.

*Caerulei temperationes Alexandriae primum sunt inventae, postea item Vestorius Puteolis instituit faciundum.*<sup>25</sup>

*La fabbricazione di caeruleum è stata inventata per prima ad Alessandria, in seguito nello stesso modo Vestorio ha fondato una fabbrica a Pozzuoli.*

Fino al I sec a.C. il *caeruleum* veniva importato da Alessandria e giungeva a nord di Napoli, a Pozzuoli, finché un uomo d'affari chiamato Vestorio decise di fare concorrenza ad Alessandria e di creare sul suolo italiano una fabbrica di *de coeruleum*. Caio Vestorio, amico di Cicerone e di Attico, era un banchiere ricco e acculturato che aveva investito le sue fortune nel commercio. Il suo nome sopravviverà anche dopo la sua morte: da quel momento il blu *coeruleum* viene anche chiamato *cyanus vestorianus*<sup>12</sup>.

La fabbrica di Vestorio crebbe ed ebbe molto successo: questo è attestato da fatto che dopo la sua nascita si verificò un aumento dell'utilizzo del *coeruleum* (50-40 a. C.). In questo periodo se ne concepì anche un nuovo utilizzo del *coeruleum*: come *opus musium*, ossia i tasselli per mosaici.



Figura 4.9<sup>52</sup>: Mosaico al Palatino, Roma

La produzione del blu di Vestorio si espanse a Roma e nei suoi dintorni, e il pigmento iniziò anche ad essere esportato via mare. Questo nuovo commercio è testimoniato dal relitto della nave Planier, che trasportava carichi di blu coeruleum ed è affondata nel Mediterraneo antistante Marsiglia. Era una nave carica di anfore, vino e pigmenti tra cui 40 kilogrammi di caeruleum vestoriano<sup>12</sup>.

Come ho già accennato uno dei pochi scrittori che descrive la preparazione del pigmento è Vitruvio. La sua sintesi è approssimativa e incompleta. Vitruvio per definire se il pigmento è pronto o meno, non si basa sull'utilizzo di specifici materiali o alla temperatura elevata, ma solo sulla brillantezza del colore. Dalla sintesi che lui descrive non si produce il coeruleum ma un'altra qualità di blu, poiché manca il reagente fonte di calcio<sup>12</sup>.

*Ratio autem eius e quibus est inventa satis habet admirationis. Harena enim cum nitri flore conteritur adeo subtiliter ut efficiatur quemadmodum farina, ea aes cyprium limis crassis uti scobis fractum ista conspargitur ut conglomeretur. Deinde pilae manibus versando efficiuntur et ita conligantur ut inarescant. Aridae componuntur in urceo fictili, urcei in fornace. Simul autem aes et ea harena ab ignis vehementia confervescendo coaluerint, inter se dando et accipiendo sudores a proprietatibus discedunt suisque rebus per ignis vehementiam confectis caeruleo rediguntur colore.<sup>16</sup>*

*Il metodo per comporlo dalle sostanze di cui si è scoperto che consiste è abbastanza sorprendente. Si pestano, cioè, insieme sabbia e fiori di nitro tanto finemente da ottenere una specie di farina, e su questa si cosparge rame ciprio, ridotto a limatura con lime spesse, fino a formare un impasto. Poi mediante manipolazioni si ricavano delle palline e si legano insieme in maniera tale che si asciughino. Una volta asciutte si dispongono in una brocca di terracotta e le brocche si mettono in forno. Non appena il rame e la sabbia scaldandosi sotto l'azione della forza del fuoco si fondono, scambiandosi reciprocamente gli umori trasudati cedono le loro peculiarità e una volta che i loro elementi essenziali sono stati consumati per affetto dell'intensità del fuoco, assumono un colore azzurro.*

La principale differenza tra il coeruleum e il hbds iryt è la quantità di fondente. Infatti, i romani utilizzavano meno materiale contenente sodio come fondente rispetto agli egizi.

Recentemente durante degli scavi a Roma nella Domus Aurea, è stato rinvenuto un lingotto di blu egizio molto raro poiché ancora intero e pronto per essere macinato. Oltre alla scoperta del pigmento, sono venuti alla luce anche gli strumenti utilizzati dalle botteghe che si occupavano della decorazione murale della residenza di Nerone. Erano presenti due vasche destinate alla lavorazione della calce e dei pigmenti colorati<sup>26</sup>.

Anche a Pompei si sono trovate tracce di coeruleum. Gli scavi hanno portato alla luce una villa che nel 79 a.C., al momento dell'eruzione del Vesuvio, era in ristrutturazione. L'archeologo Augusti, quindi, trovò grandissime quantità e varietà di pigmenti per pittura murale, rimasti seppelliti per secoli, tra cui diversi tipi di coeruleum caratterizzati da tipi differenti di fondenti<sup>12</sup>.



Figura 4.10 <sup>43</sup>: Affresco di una villa a Pompei

Nel II secolo a.C. la sua sintesi non si effettuava più solo a Pozzuoli, ma anche in tutto l'Impero romano e in tutta la Gallia. Aumentando gli artigiani che lo fabbricavano, crescevano anche le diverse sintesi modificate dello stesso pigmento.

Roma, quindi, espandendosi sempre di più e utilizzando su grande scala il blu coeruleum, ne abbassò il prezzo. Da questo momento, il pigmento caratteristico della nobiltà e utilizzato con parsimonia, divenne più comune ed utilizzato in modo massiccio. Nel secolo seguente il commercio si espanse anche fuori dall'Impero romano: venne utilizzato anche in Libia, in Norvegia e in Uzbekistan<sup>12</sup>.

Possiamo concludere che tutte le analisi di pigmenti e dipinti indichino come gli artigiani delle diverse civiltà ed ere, sebbene variando la quantità e la purezza della silice, hanno sempre rispettato il rapporto tra gli elementi calcio e rame. Bisognava saper pesare i due materiali separatamente e conoscere la loro composizione, che variava a seconda della zona di provenienza. Inoltre, era necessario sapere il tenore (quantità di elemento rame) presente nei bronzi utilizzati.

#### 4.7 Il caeruleum nel Medioevo e il Rinascimento Carolingio

Nel Medioevo l'utilizzo del pigmento coeruleum divenne quasi nullo, ad eccezione delle pitture murali nelle catacombe di Napoli.

Non è nato il motivo per cui si è smesso di produrlo, probabilmente è legato al momento storico. La sintesi di Vitruvio non era stata dimenticata, ma quel periodo del Medioevo non favoriva il commercio internazionale, non era presente un forte potere politico o culturale che commissionasse delle opere importanti<sup>12</sup>.

Nel periodo successivo, con il rifiorire della cultura e della politica di ricostruzione di edifici, si riscoprì anche l'utilizzo del coeruleum e la sua fabbricazione. Si ipotizza che le zone in cui si ricominciò a fabbricare il coeruleum fossero sul suolo italiano, data la frequenza del suo utilizzo.



Figura 4.11<sup>53</sup> : Villa Farnesina, Roma, Raffaello

I libri tecnici del XII secolo riscrivono la sintesi di Vitruvio, e trascrivendola non chiamano più il pigmento coeruleum ma cerussa. Con il tempo venne dimenticato, poiché si iniziarono ad utilizzare altri tipi di blu più facili da reperire, come per esempio il blu oltremare<sup>12</sup>.

#### 4.8 La riscoperta durante il Rinascimento

Durante il periodo della riscoperta della classicità, torna l'interesse per il coeruleum. Nel 1547 Jean Martin pubblica un'edizione del *De Architectura* di Vitruvio tradotta da lui e dal suo circolo di umanisti. Da questa traduzione in poi molti scrittori e artisti si interessarono al pigmento<sup>12</sup>.

L'interesse per il pigmento è dovuto anche dalle scoperte archeologiche che nei decenni a venire si fecero. A metà del '500 si scoprì la città di Pompei sommersa dalle ceneri, solo nel 1748 però si incominciarono gli scavi per riportarla alla luce voluti da re Carlo III di Borbone. Grazie ai reperti trovati, si venne a conoscenza dei pigmenti antichi, tra cui il blu egizio.

Anche durante le spedizioni in Egitto tra il 1798- 1801 vennero trovati molti oggetti d'arte decorati con il blu egizio, grazie alla maestosità delle scoperte venute alla luce, ci si iniziò ad interessare alle civiltà antiche e ai pigmenti da esse utilizzati<sup>12</sup>.

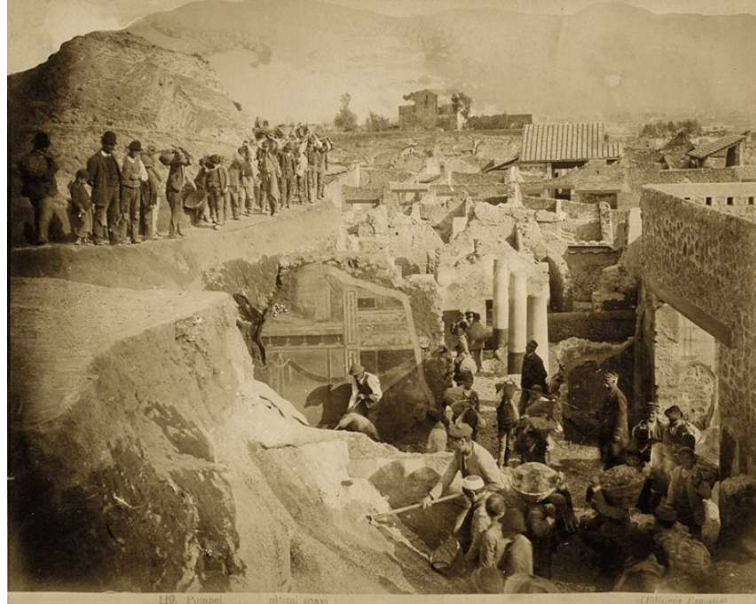


Figura 4.12 <sup>44</sup>: Primi scavi a Pompei

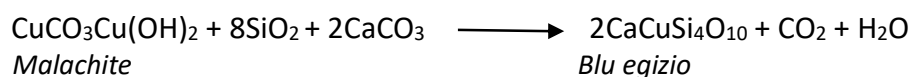
Nei secoli più recenti crebbe il desiderio di determinare la composizione dell'antico *hsbd iryt* e la sua formula chimica precisa. Infatti, dato che non si poteva fare affidamento sulla sintesi di Vitruvio poiché era incompleta, molti chimici e scienziati tentarono per decenni di sintetizzarlo. Spesso i risultati non erano precisamente il *hsdb iryt*, ma altri tipi di blu già esistenti o inediti. Solo nel 1987 l'italiano G. Onoratini definì la sua formula chimica originale e la sua sintesi.

## 5. SINTESI DEL BLU EGIZIO

### 5.1 Reagenti

Per sintetizzare il blu egizio ( $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$ ) mi sono appoggiata al laboratorio della SUPSI di Mendrisio poiché il laboratorio del liceo Lugano 1 non dispone di una muffola necessaria per la cottura a  $900^\circ\text{C}$ .

- La reazione che ho usato per sintetizzare il blu egizio è la seguente:



#### Reagenti:

- $\text{CuCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$ : malachite
- $\text{SiO}_2$ : silice gel 60 (0,015 – 0,040 mm)
- $\text{CaCO}_3$ : carbonato di calcio
- $\text{Na}_2\text{CO}_3$ : carbonato di sodio utilizzato come fondente

Prima di utilizzare la malachite a mia disposizione è stato necessario purificarla, in quanto essa era stata sintetizzata da noi allievi durante i laboratori di chimica del secondo anno, e presentava delle contaminazioni.

#### Procedimento

1. Ho inserito due cucchiari di malachite in un becher con dell'acqua deionizzata e lasciato a riposo coperto per un giorno
2. Ho filtrato la malachite con un filtro a pieghe e lasciato essiccare per un giorno
3. Ho ripetuto l'operazione ancora due volte

Prima di effettuare la filtrazione, è stato necessario fare anche delle misure di conducibilità elettrica specifica ( $\chi$ ) con delle sonde Pasco del liquido surnatante.

Campione	Conducibilità elettrica specifica ( $\chi$ )
Acqua deionizzata	0,08 $\mu\text{s}/\text{cm}$
Liquido dopo un lavaggio	40 $\mu\text{s}/\text{cm}$
Liquido dopo due lavaggi	2,93 $\mu\text{s}/\text{cm}$
Liquido dopo tre lavaggi	0,81 $\mu\text{s}/\text{cm}$

Prima di misurare la conducibilità dei liquidi ho misurato la conducibilità elettrica dell'acqua deionizzata. La conducibilità elettrica specifica di una soluzione è proporzionale alla quantità di sali disciolti in essi, e di conseguenza quella dell'acqua deionizzata è molto bassa e vicina allo zero. La diminuzione di  $\chi$  evidenzia il fatto di aver eliminato i sali solubili presenti inizialmente nella malachite e quindi di aver eliminato le impurità.

Per sintetizzare 10g di blu egizio ( $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$ ) ho determinato le seguenti masse necessarie dei vari reagenti<sup>10</sup>:

	MM (g/mol)	n (mol)	m (g)
$\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$	375,99	$2,66 \cdot 10^{-2}$	10
$\text{CaCO}_3$	100,09	$2,66 \cdot 10^{-2}$	2,662
$\text{CuCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$	221,12	$2,66 \cdot 10^{-2}/2$	2,945
$\text{SiO}_2$	60,08	$2,66 \cdot 10^{-2} \times 4$	6,390

- La massa di fondente ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) l'ho invece calcolata considerando che ne serve 5% della massa di pigmento da preparare.

$$5\% \text{ di } 10\text{g} = 0,500 \text{ g}$$

## 5.2 Soluzione di cloruro d'idrogeno (1M)

Ho preparato un litro di soluzione di acido cloridrico a concentrazione 1,0M ed ho utilizzato una soluzione di acido cloridrico in concentrazione 37%, cioè circa 12M:

- $c_1 \cdot V_1 = c_2 \cdot V_2$   
 $12\text{M} \cdot V_1 = 1\text{M} \cdot 1000 \text{ mL}$   
 $V_1 = 83.0 \text{ mL}$

*Procedimento:*

1. ho versato in un cilindro graduato 83.0 ml di acido cloridrico 12M
2. ho trasferito il tutto in un matraccio da 1L
3. ho aggiunto dell'acqua deionizzata fino ad ottenere un litro di soluzione
4. ho tappato il matraccio e mescolato bene

### 5.3 Sintesi del pigmento

Tra fine giugno e inizio luglio ho fatto la sintesi del pigmento presso il laboratorio della SUPSI di Mendrisio. Ho iniziato pesando tutti i reagenti in delle capsule di Petri di plastica con una bilancia analitica METTLER 300. Ho inserito tutti i reagenti e il fondente in un mortaio e li ho pestati per 5 minuti. In seguito, ho trasferito il tutto in una capsula di porcellana e l'ho messa nella muffola per 16 ore a 900°.

	Massa calcolata	Massa pesata
$\text{CuCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$	2,94 g	2,945 g
$\text{CaCO}_3$	2,662 g	2,664 g
$\text{SiO}_2$	6,392g	6,392 g
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	0,500 g	0,500 g



Figura 5.1<sup>31</sup>: Reagenti nel mortaio

Il giorno seguente ho estratto la capsula dalla muffola ed ho potuto constatare il risultato positivo. L'aspetto del contenuto sembrava roccia friabile vetrosa di colore blu scuro quasi grigio. Dopo aver tolto il contenuto dalla capsula l'ho pestato in un mortaio e l'ho inserito in 100 mL di una soluzione 1M di acido cloridrico per una notte coprendolo con la pellicola parafilm.



Figura 5.2 <sup>31</sup>: Campione dopo la cottura in muffola



Figura 5.3 <sup>31</sup>: Campione nel mortaio dopo la macinazione

Il giorno seguente ho filtrato e sciacquato più volte il campione con acqua deionizzata, controllando il pH ad ogni lavaggio con una cartina tornasole fino ad avere il pH circa 7.

Si poteva notare che il suo aspetto, dopo essere stato nella soluzione di acido cloridrico, sembrava più scuro di prima. In seguito, ho inserito nuovamente il campione in una capsula di porcellana dividendolo in piccole palline, in modo da estrarlo più facilmente dopo la cottura. Ho poi inserito la capsula nella muffola 900°C di nuovo per 16 ore.



Figura 5.4 <sup>31</sup>: Campione pronto per la seconda cottura

L'indomani ho estratto il campione dalla muffola dopo la seconda cottura. A questo punto il colore risultava molto più chiaro della prima cottura ed è stato anche più difficile staccarlo dal

crogiolo a causa della sua natura vetrosa, che lo rendeva molto duro e attaccato al crogiolo. Una volta macinato nel mortaio per cinque minuti, l'ho reinserto nella soluzione da 100 mL di acido cloridrico per una notte.



Figura 5.5 <sup>31</sup>: Uscito dalla muffola dopo seconda cottura



Figura 5.6 <sup>31</sup>: Campione pronto per la terza cottura

Il giorno seguente ho filtrato per la seconda volta il campione e sciacquato con acqua deionizzata, facendo le misurazioni del pH dell'acqua ad ogni lavaggio fino ad arrivare con il pH a circa 7. Una volta fatto ciò, il campione risultava ancora più blu chiaro e brillante. Una volta finito di filtrarlo, ho di nuovo creato delle pallottole in una nuova capsula di porcellana per staccarlo poi più facilmente dopo la cottura e l'ho reinserto nella muffola per la terza e ultima cottura a 900° per 16 ore.

Il giorno successivo ho estratto il campione dalla muffola. Il suo aspetto dopo la terza cottura era decisamente più vivido e più simile ad un azzurro luminoso. Ho macinato il campione nel mortaio e poi l'ho reinserto nella soluzione acido cloridrico per la terza e ultima volta.



Figura 5.7<sup>31</sup>: Campione appena dopo la terza cottura

Come ultimo passaggio, il giorno successivo ho filtrato il campione e sciacquato con dell'acqua deionizzata (controllando sempre ad ogni sciacquo il suo pH). A questo punto, dopo averlo macinato un'ultima volta per cinque minuti, la sintesi è finita e il pigmento è pronto per essere utilizzato.

#### 5.4 Confronto tra pigmenti



Figura 5.8<sup>31</sup>: Pigmento sintetizzato



Figura 5.9<sup>71</sup>: Pigmento della ditta Kremer

Come si vede dalle due immagini, si possono notare delle differenze tra il blu egizio sintetizzato alla SUPSI e quello acquistato dalla ditta Kremer. Infatti, il mio campione risulta di colore più brillante mentre quello acquistato dalla Kremer è più chiaro.

Questa diversità è dovuta al differente grado di macinazione: il blu della ditta Kremer, è più fine e risulta dunque più chiaro.

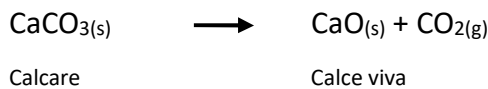
Ho sintetizzato un secondo campione di blu egizio in parallelo al primo, e il suo aspetto dopo ogni cottura non è stato identico a quello registrato per il primo campione. La differenza, nonostante abbiamo usato gli stessi reagenti con le stesse quantità, pensiamo sia dovuto a due fattori: il primo fattore è la variabilità del pigmento; infatti, il risultato durante il processo può essere molto diverso da campione a campione, il secondo fattore invece è la velocità di raffreddamento: più è lenta la velocità di raffreddamento più il colore del pigmento è brillante e acceso. Per questo motivo il secondo campione dopo le prime due cotture risultava meno acceso del primo, a causa del veloce cambio di temperatura a cui lo abbiamo sottoposto estraendolo dalla muffola con ancora una temperatura elevata. Dopo la terza cottura invece, essendosi raffreddato lentamente fino a raggiungere la temperatura ambiente, il suo aspetto era uguale a quello del primo campione.

## 6. TECNICA DELLA STESURA CON AFFRESCO E GOMMA ARABICA

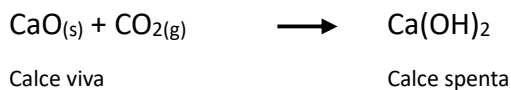
### 6.1 Teoria dell'affresco

L'affresco è una tecnica inorganica per dipingere su muro in cui la pittura, diventando parte integrante della parete, non si rovina con il tempo.

Il principio chimico che sta alla base di questa tecnica è la reazione chimica di carbonatazione. La calce si ottiene da un minerale calcareo ricco di carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Per avere la calce chiamata *viva*, nonché ossido di calcio ( $\text{CaO}$ ), si sottopone il minerale a temperature molto alte (sopra gli  $800^\circ\text{C}$ ), scatenando la seguente reazione che libera diossido di carbonio<sup>14</sup>.



In questo stato, la calce è molto reattiva e tende a reagire fortemente con altre sostanze. Per ottenere la calce spenta (idrossido di calcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) serve aggiungere a poco a poco dell'acqua facendo molta attenzione poiché la reazione è molto forte e violenta.



La calce, in questo modo, è detta *spenta* e si può quindi utilizzare per realizzare i tre strati dell'affresco.

In questa tecnica viene usata come base un supporto, quale ad esempio una mattonella, a cui si sovrappongono i seguenti strati, la base con tutti gli strati è detta *tavella*.<sup>21</sup>

- **arriccio**: primo strato composto da calce spenta e sabbia silicea (con il rapporto 1-3 in volume)
- **intonachino (intonaco)**: secondo strato composto da idrossido di calcio [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] e sabbia silicea, in rapporto 1-1 in volume
- **pigmento**: il pigmento stemperato in acqua

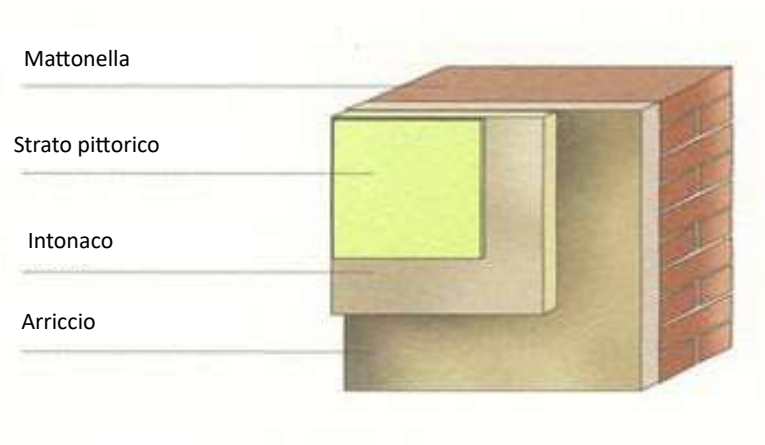


Figura 6.1<sup>32</sup>: I diversi strati

## 6.2 Stesura ad affresco del blu egizio

A luglio 2025, un mese dopo la sintesi del pigmento, sempre presso il laboratorio della SUPSI di Mendrisio ho applicato la tecnica dell'affresco. Come base ho utilizzato una mattonella su cui l'arriccio era stato steso due anni prima poiché deve essere lasciato a carbonatare per molto tempo prima di poter essere utilizzata, prima di applicare ogni strato, la tavella deve essere inumidita con dell'acqua.



Figura 6.2<sup>35</sup>: Tavella con arriccio

Una volta che la tavella ha carbonatato, si stende l'intonaco, chiamato anche malta (sabbia silicea e idrossido di calcio). Il suo scopo è rendere uniforme la superficie affinché sia più liscia possibile e per questo motivo si liscia con la cazzuola e poi con un frattazzo per livellare la superficie. Sopra l'intonachino è ora possibile pitturare e lasciare asciugare.

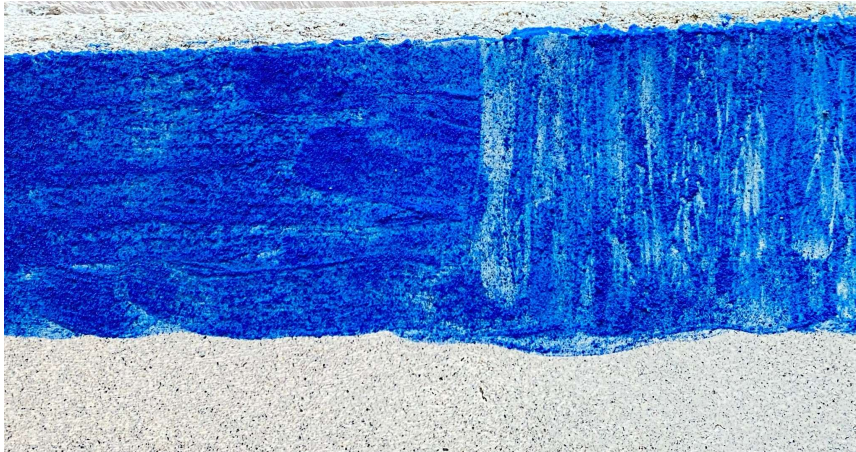
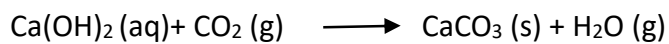


Figura 6.3 <sup>35</sup>: Affresco appena fatto

### 6.3 La carbonatazione

Una volta stesi l'intonaco fresco e la pittura, avviene un processo chimico chiamato carbonatazione che la tavella con il primo strato aveva già compiuto. Quando il pigmento viene steso e la superficie si secca, si crea una pellicola pittorica. La carbonatazione consiste nella reazione chimica dell'idrossido di calcio che tende a giungere in superficie trasportato dalle molecole d'acqua e che, a contatto con l'aria, reagisce con il diossido di carbonio ( $\text{CO}_2$ ), formando così il carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e acqua che in seguito evapora<sup>21</sup>.



Per completare questo processo in tutta la profondità della struttura dell'affresco sono necessari degli anni. Il processo con il passare del tempo rallenta grazie alla formazione di carbonati che creano una crosta sulla superficie. Più questa operazione è lenta, più l'affresco è stabile e resistente<sup>14, 21</sup>.

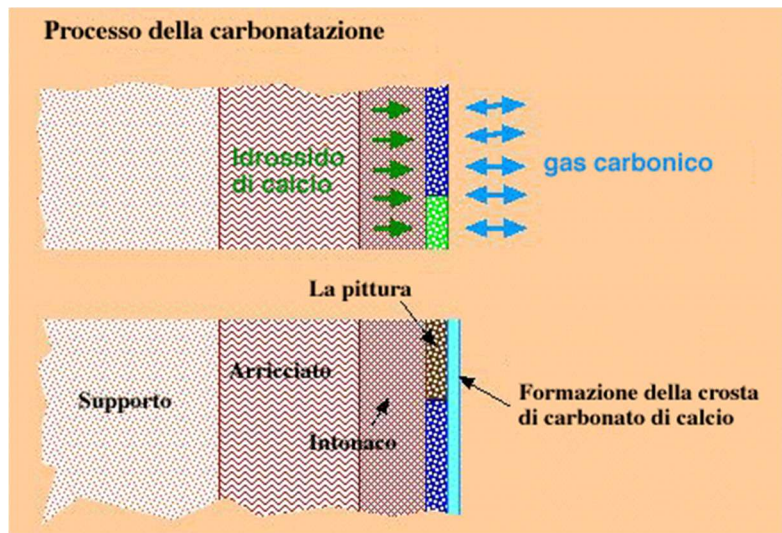


Figura 6.4 <sup>33</sup>: La carbonatazione

## 6.4 Unità di tempo

La tecnica dell'affresco è caratteristica della pittura murale di grandi dimensioni (come, per esempio, la Cappella Sistina di Michelangelo o la Cappella Brancacci di Masaccio), per realizzarla servivano dei grossi ponteggi con più piani.

Per eseguire questa tecnica, l'intonaco va steso gradualmente poiché quando si passa sopra il colore l'intonaco deve essere ancora umido, in modo tale che non si sia già formata una crosta di carbonato di calcio, ma allo stesso tempo non deve essere bagnato, altrimenti il colore si mescolerà all'intonaco.

È importante quindi preparare la sezione che si pensa di portare a termine entro una giornata (se si riesce in un giorno a fare un intero piano di ponteggi, la sezione si chiamerà *pontata*), in modo che non ci siano diverse stratificazioni in un unico dipinto. Anche le condizioni meteorologiche possono influire sulla stesura dell'intonaco: infatti, a dipendenza del tempo (più secco, più umido, più freddo o caldo) potrebbero avvenire variazioni causate dalla velocità di carbonatazione differente<sup>14,21</sup>.

Una volta stesi sulla tavella ad affresco sia il blu egizio sintetizzato alla SUPSI che quello acquistato dalla Kremer, si è notata subito una differenza tra i due: quello della Kremer risultava più scuro di quello sintetizzato alla SUPSI.



Figura 6.5 <sup>33</sup>: Kremer



Figura 6.6 <sup>33</sup>: sintetizzato alla SUPSI

A distanza di tre mesi, la tavella con i due affreschi evidenzia un rischiarimento per entrambe le stesure. Inoltre, la stesura fatta con il blu egizio sintetizzato alla SUPSI risulta quasi identica a quella fatta con il pigmento acquistato dalla Kremer.

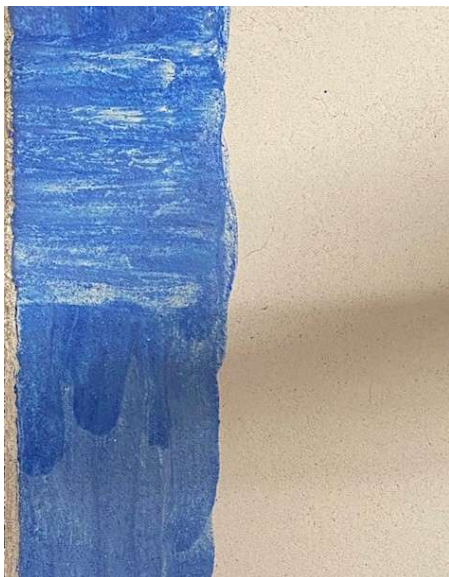


Figura 6.7 <sup>33</sup>: Kremer



Figura 6.8 <sup>33</sup>: sintetizzato alla SUPSI

## 6.5 Gomma Arabica

Oltre ad aver utilizzato la tecnica dell'affresco, ho sperimentato anche la stesura con la gomma arabica. Questo legante organico è utilizzato principalmente per la preparazione di acquarelli o come additivo per migliorare la brillantezza dei colori.

Si tratta della resina dell'albero d'acacia, utilizzata anche in cucina come addensante. Infatti, essa si scioglie facilmente in acqua, formando soluzioni più o meno viscosi a seconda del pH e dalla quantità in percentuale del volume<sup>14</sup>.

## 6.6 Stesura del blu egizio con gomma arabica presso il laboratorio

Sempre presso il laboratorio della SUPSI di Mendrisio, a luglio 2025, ho sperimentato la stesura con la gomma arabica. Come legante ho utilizzato una soluzione di 200mL di acqua deionizzata con 35% in volume di gomma arabica. Come prima cosa ho messo poca di questa soluzione su una tavella già preparata e ho steso sopra il pigmento sciolto nella soluzione di gomma arabica.



Figura 6.9 <sup>34</sup>: La gomma arabica

Una volta steso il pigmento, il risultato era il seguente (vedi foto). Si può notare come le stesure ottenute con i due pigmenti siano molto simili, a differenza di quelle ottenute con la tecnica dell'affresco.



Figura 6.10 <sup>35</sup>: Pigmento della Kremer Pigmento sintetizzato alla SUPSI

Anche a distanza di tre mesi le stesure hanno un aspetto simile tra di loro.

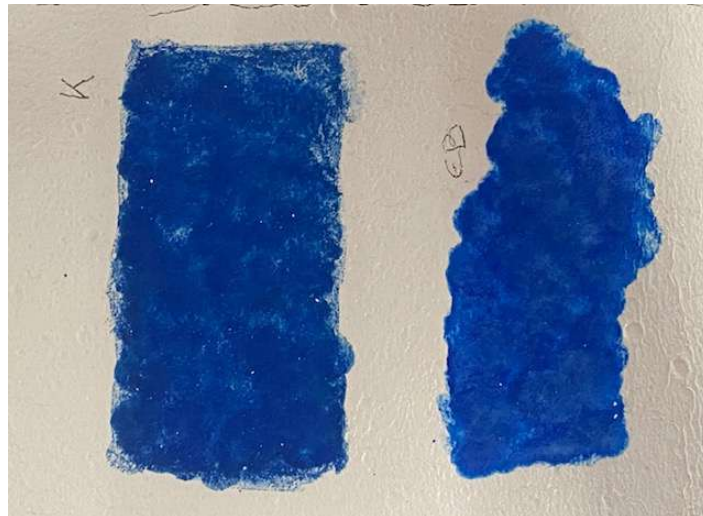


Figura 6.11 <sup>35</sup>: Pigmento della Kremer Pigmento sintetizzato alla SUPSI

## 7.FLUORESCENZA A RAGGI X (XRF) E RIFLETTANZA TOTALE ATTENUATA (ATR)

### 7.1 Analisi tramite la spettrofotometria di fluorescenza a raggi X

Grazie all'aiuto di Patrizia Moretti, docente universitaria alla SUPSI di Mendrisio, tramite un apparecchio portatile sono riuscite a fare delle analisi XRF sulle polveri del blu egizio sintetizzato e su quello acquistato dalla Kremer.

La spettroscopia di fluorescenza a raggi X è un'analisi elementare (cioè degli elementi) sulle polveri, grazie alla quale si verifica la presenza o meno di elementi dopo il sedicesimo elemento della tavola periodica. Questo metodo d'indagine sfrutta i raggi x che interagiscono con gli atomi del campione, che a loro volta emettono la loro fluorescenza caratteristica<sup>62</sup>.

I raggi x sono caratterizzati da fotoni ad alta energia e sono così forti che, quando colpiscono un atomo, fanno espellere un elettrone che si trova in un guscio tra i più vicini al nucleo, lasciando il posto vacante. Per colmare la lacuna un elettrone di un guscio più esterno si sposta, rilasciando energia sotto forma di un nuovo raggio x. La radiazione emessa è detta fluorescenza, ed è specifica per ogni elemento poiché rilascia una determinata luce diversa (una diversa per ogni elemento) e per questo motivo permette il riconoscimento di questi<sup>63</sup>.

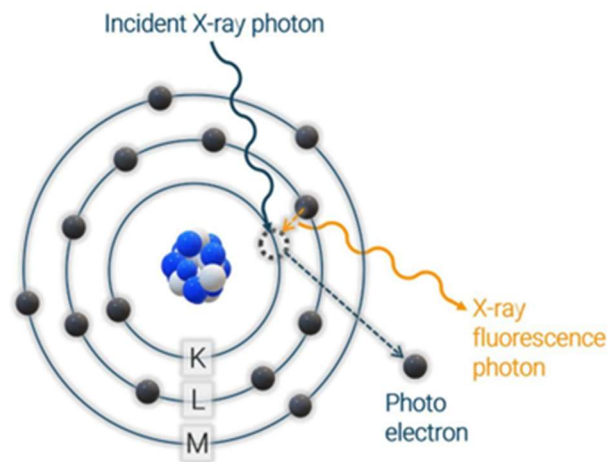


Figura .5.1<sup>72</sup>: Lo spostamento degli elettroni

Per fare queste analisi basta puntare il misuratore contro il campione del materiale che si vuole analizzare facendo attenzione a non avvicinarsi troppo, poiché le radiazioni emesse sono molto nocive. Ciò che viene poi studiato sono i picchi più significativi che confermano la presenza di determinati elementi<sup>63</sup>.

## 7.2 Risultati delle analisi delle tavelle

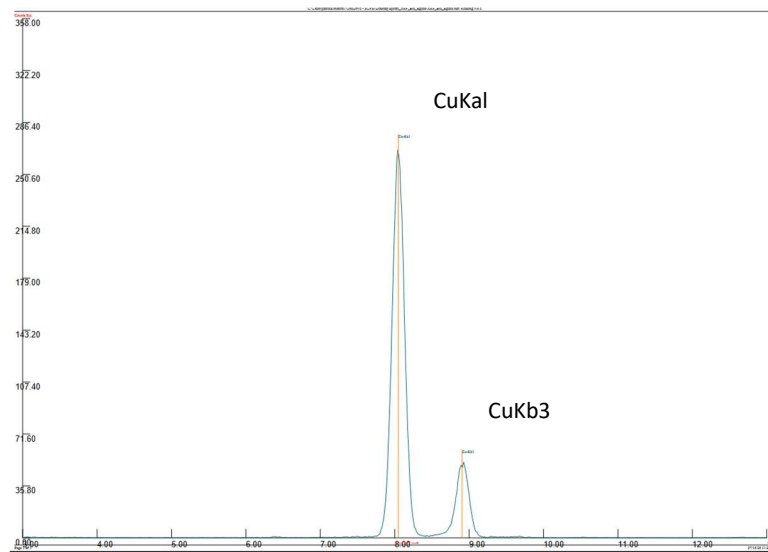


Figura 5.2<sup>57</sup>: Analisi di polveri campione acquistato alla Kremer

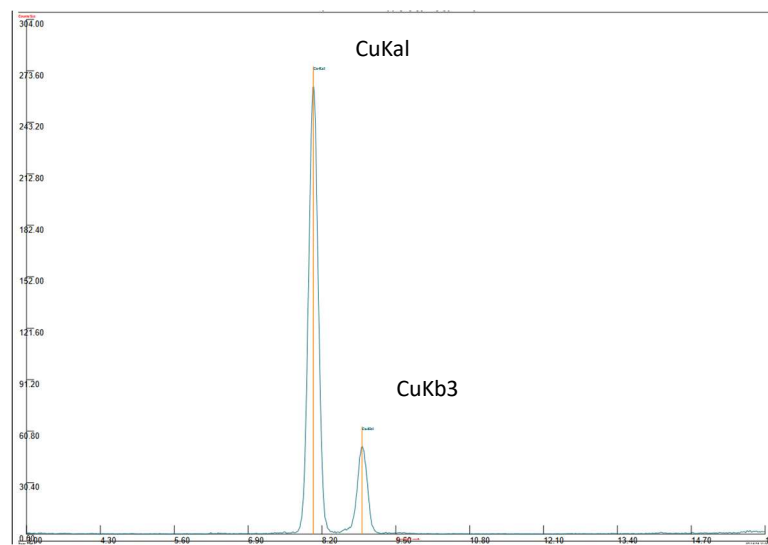


Figura 5.3<sup>57</sup>: Analisi delle polveri del campione sintetizzato

Come previsto, le analisi mostrano una buona riuscita della sintesi poiché sia il campione di blu egizio sintetizzato alla SUPSI che quello comprato dalla Kremer sono composti maggiormente da rame (Cu), come le comuni analisi del blu egizio. Possiamo notare sul grafico la presenza di due picchi principali nella regione del rame (Cu).

### 7.3 Analisi delle tavelle con affresco e gomma arabica

Ad ottobre 2025 sono tornata alla SUPSI ed ho effettuato delle analisi XRF anche sulle tavelle preparate sia con la gomma arabica che con la tecnica dell'affresco, utilizzate sia con il blu egizio sintetizzato alla SUPSI che con quello acquistato alla Kremer.

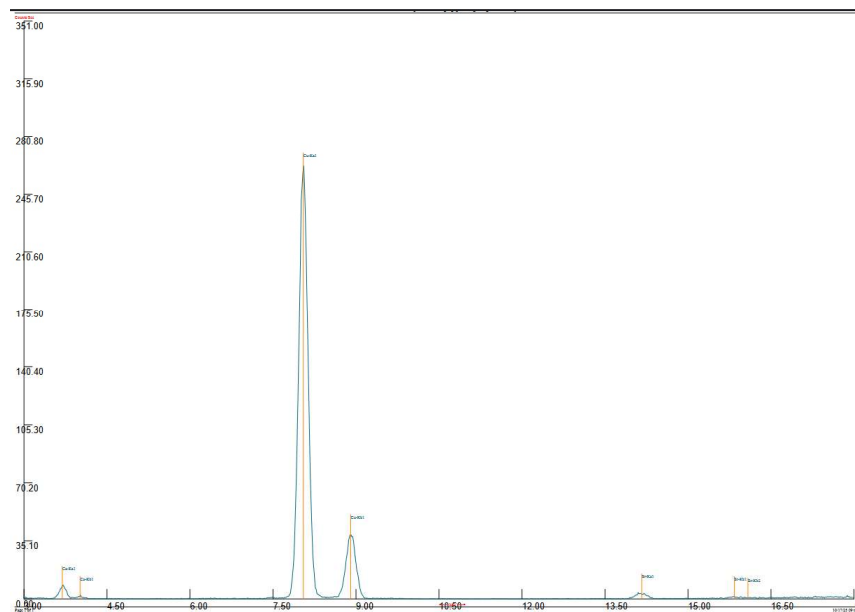


Figura 5.4<sup>57</sup>: Analisi gomma arabica blu SUPSI

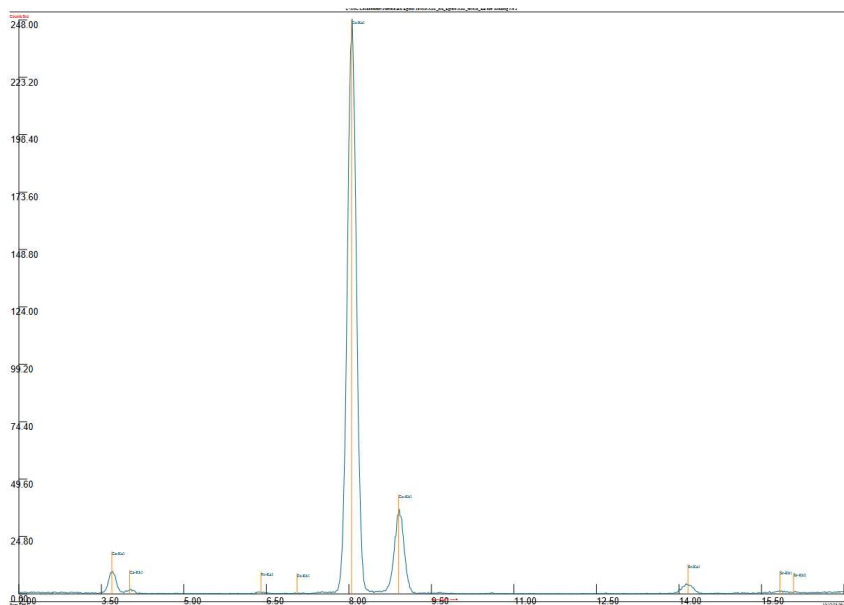


Figura 5.5<sup>57</sup>: Analisi gomma arabica blu della Kremer

Osservando i grafici possiamo notare come anche qui i picchi principali siano gli stessi (identificano l'elemento rame Cu). I picchi più piccoli presenti in entrambe le analisi identificano gli elementi che compongono maggiormente la tavella: il calcio e lo stronzio.

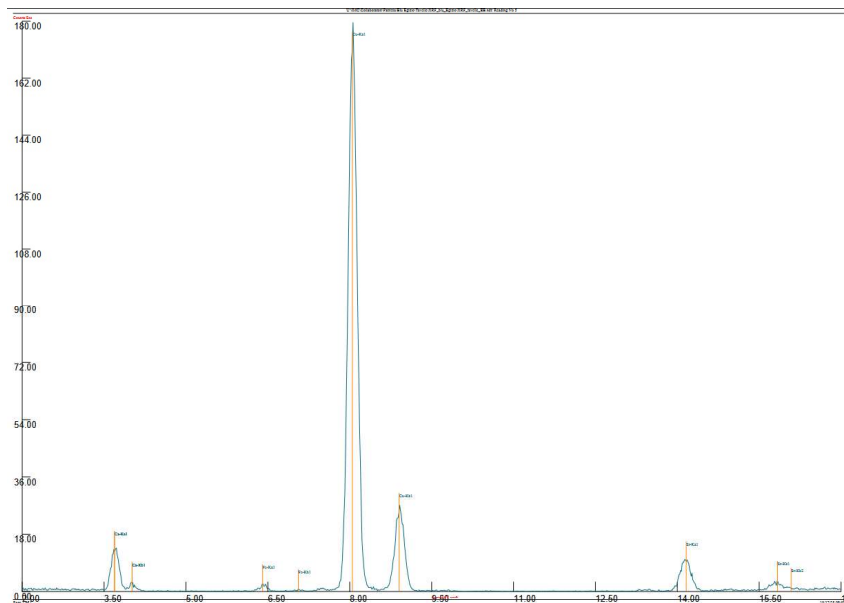


Figura 5.6<sup>57</sup>: Analisi affresco blu SUPSI

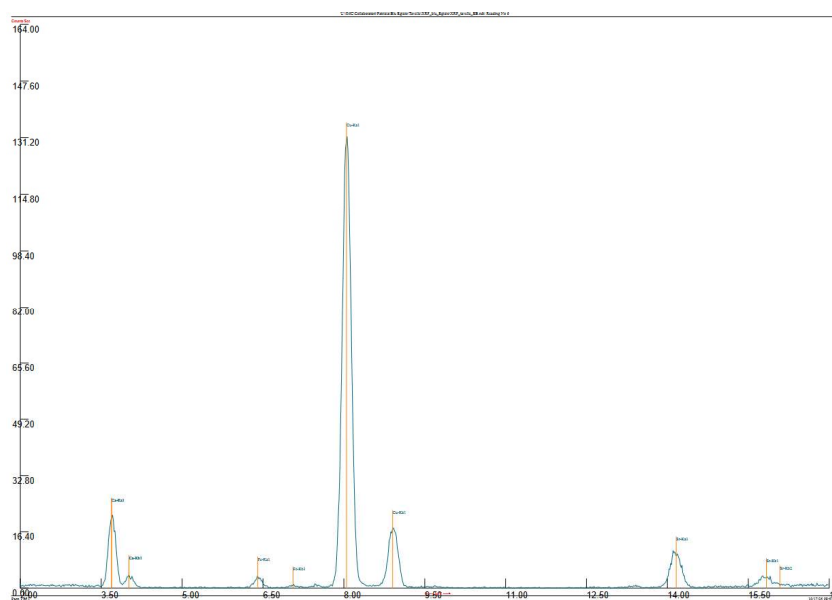


Figura 5.7<sup>57</sup>: Analisi affresco blu della Kremer

Dai due grafici soprastanti possiamo notare che anche le analisi delle tavole con affresco confermano la buona riuscita della sintesi. Infatti, il picco più importante è in corrispondenza con l'elemento rame (Cu) caratteristico del blu egizio. I picchi minori invece, come per la gomma arabica, sono caratteristici della composizione della tavella e per la tecnica dell'affresco (il calcio e lo stronzio).

## 7.4 Analisi riflettanza totale attenuata (ATR), associata alla spettroscopia FTIR

La riflettanza totale attenuata (ATR) è una analisi che fornisce informazioni a livello molecolare di campioni di diversi materiali. Il suo funzionamento si basa sulla penetrazione della luce nel campione al fine di acquisire dati sulla sua struttura e sulla sua composizione.

L'ATR è una tecnica di analisi che utilizza le radiazioni nella regione dell'infrarosso e sfrutta la riflessione interna della luce dentro ad un cristallo (come per esempio un diamante). Quando il campione è a contatto con la superficie del cristallo, una piccola parte della radiazione infrarossa penetra nel materiale per pochi micron: questo fenomeno è chiamato *profondità di penetrazione*<sup>59</sup>.

## 7.5 Funzionamento

Il funzionamento di questo metodo di analisi prevede l'invio di una radiazione infrarossa attraverso un materiale ottico detto sensore, che deve avere un indice di rifrazione molto alto in modo da non ostacolare la radiazione, come per esempio il diamante che si utilizza molto spesso come sensore. Il campione da analizzare è posizionato sulla superficie del diamante<sup>59</sup>.

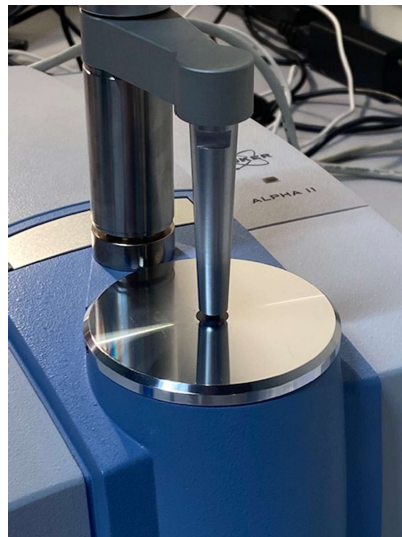


Figura 5.8<sup>60</sup>: Macchinario per analisi ATR

La radiazione infrarossa entra nel cristallo del diamante e genera un'onda evanescente che entra in pochi micron nel campione da analizzare. Interagendo con esso, la radiazione riflessa è analizzata per identificare il campione<sup>59</sup>.

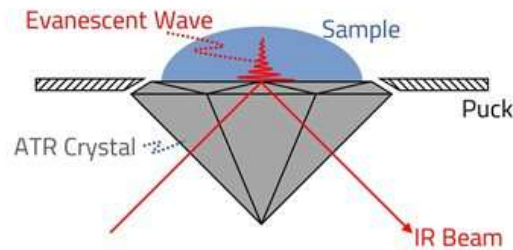


Figura 5.9<sup>58</sup> : Penetrazione della radiazione

## 7.6 Analisi e dati raccolti sulle polveri

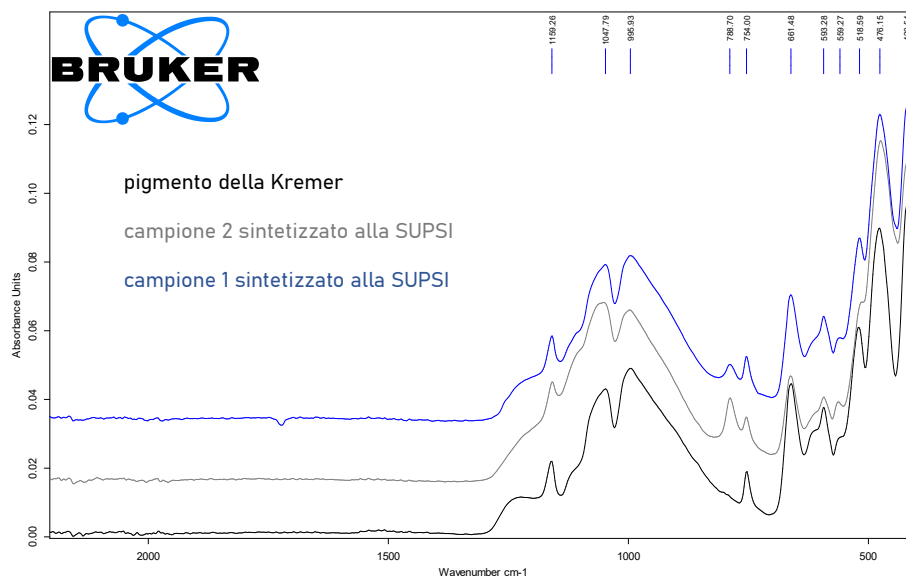


Figura 5.10<sup>61</sup>: Grafico delle analisi delle polveri

Osservando il grafico ottenuto con quest'analisi possiamo notare come gli spettri coprano la regione tipica del medio infrarosso (circa 400–4000  $\text{cm}^{-1}$ ). I picchi corrispondono ai moti vibrazionali dei leganti nella struttura dei campioni e permettono il riconoscimento di tali legami.

Possiamo notare a colpo d'occhio come nella regione 800–500  $\text{cm}^{-1}$  ci siano picchi dovuti ai leganti tra Si–O–Si. Le curve dei tre spettri presentano gli stessi picchi caratteristici del blu egizio e anche queste analisi testimoniano la perfetta riuscita della mia sintesi. Il motivo per

cui le tre curve mostrano delle altezze dei picchi leggermente diversi è dovuto dalla la quantità di materiale posizionata sul cristallo che poteva essere leggermente differente, e dal fatto che la granulometria dei campioni potrebbe non essere stata molto precisa.

Un'ultima osservazione che possiamo fare è l'assenza quasi totale di picchi nella regione tra i 2000 e i 1500  $\text{cm}^{-1}$ . Il motivo è legato al fatto che il blu egizio non è una sostanza organica, e dunque non si osservano picchi riconducibili ai leganti C-H, O-H o N-H.

## 7.7 Analisi tavelle con gomma arabica e affresco

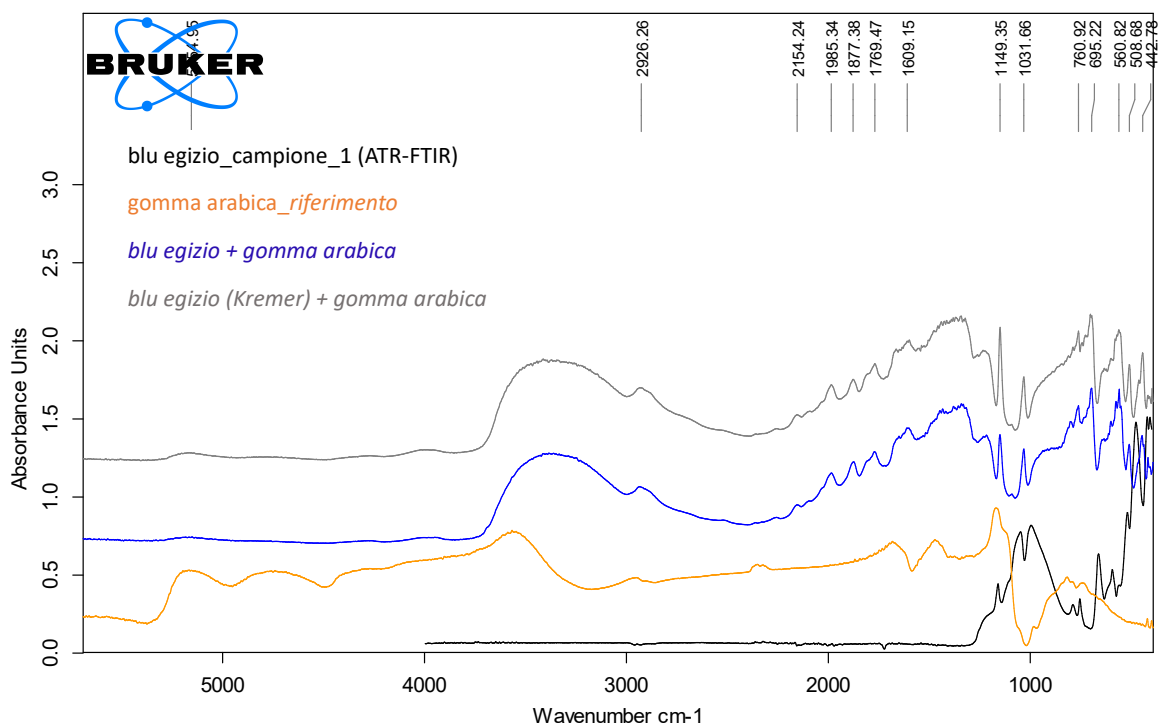


Figura 5.11 <sup>61</sup>: Analisi ATR su tavella con gomma arabica

Osservando questo grafico possiamo affermare che i dati nella regione tra 1200-800  $\text{cm}^{-1}$  sono simili a quelli delle analisi delle polveri. Questa uguaglianza è dovuta alla presenza del pigmento blu egizio. La zona degli spettri tra 1250- 1000  $\text{cm}^{-1}$  è critica poiché si sovrappongono la regione dei silicati (molto forte) che va a coprire i polisaccaridi (la parte organica della gomma arabica) C-O, che rimane coperta.

Dal grafico delle analisi sulla tavella di affresco mostrato qui di seguito, possiamo osservare che anche in questo caso la banda tra 800- 1200  $\text{cm}^{-1}$  è invariata come nelle altre analisi, poiché rappresenta gli elementi che compongono il blu egizio. La banda invece a circa 3692  $\text{cm}^{-1}$  indica

la presenza di legami di idrossido O-H probabilmente dell'idrossido di calcio  $\text{Ca(OH)}_2$  e, dunque, una carbonatazione non ancora completa dell'intonaco.

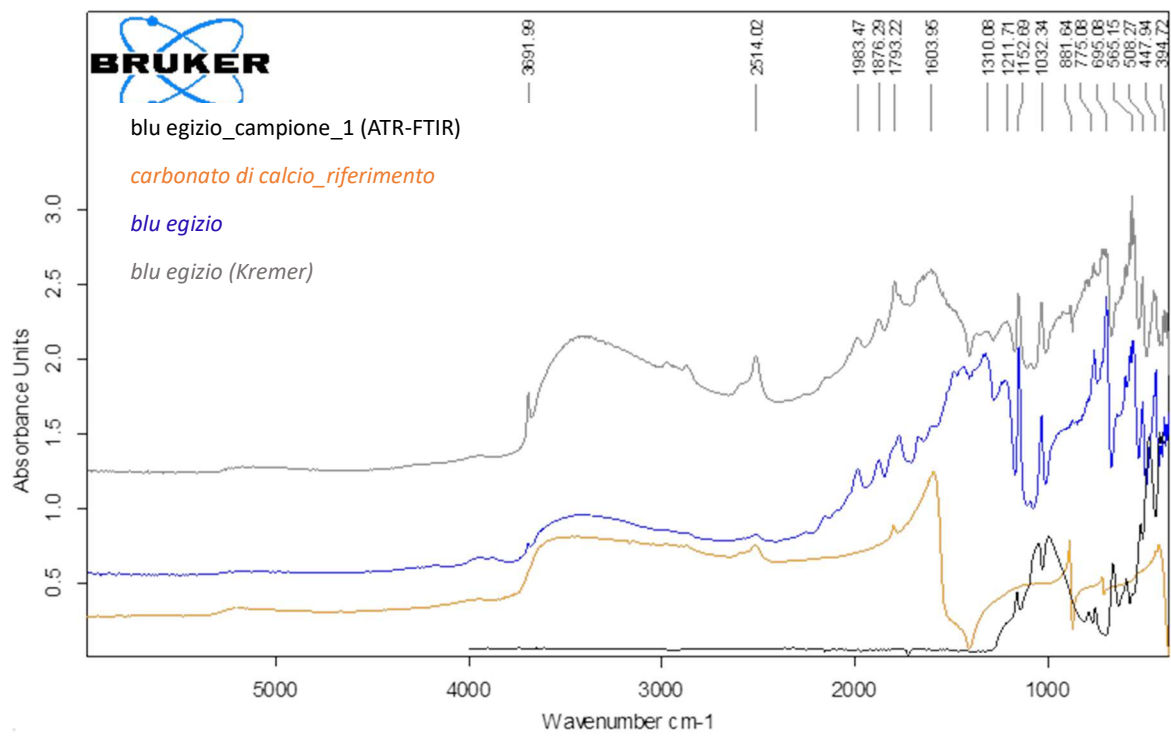


Figura 5.12<sup>61</sup>: Analisi tavella affresco

## 8. ANALISI FIBER OPTICS REFLECTANCE SPECTROSCOPY (FORS)

La spettrofotometria ultravioletta-visibile (UV-Vis) in riflettanza diffusa con fibre ottiche è una tecnica non invasiva che nasce intorno al 1930 a Londra e viene perfezionata fino ai primi del 1980. La FORS è una tecnica che studia, attraverso gli spettri di riflettanza, i materiali e i pigmenti dei patrimoni culturali, poiché la luce che colpisce la superficie viene assorbita in base alla composizione chimica della superficie analizzata<sup>17</sup>.

L'effetto dell'assorbimento selettivo di una radiazione nell'intervallo spettrale considerato per la regione UV-VIS è determinato dalle transizioni elettroniche. Ciò significa che una superficie assorbe determinate lunghezze d'onda in base alle transizioni compiute dagli elettroni<sup>18</sup>.

Poiché non necessita il prelevamento di un campione, questa è un'analisi ancora frequentemente usata da restauratori e storici d'arte., Nel 1997, ad esempio, sono state effettuate delle analisi FORS sugli affreschi della cappella Brancacci a Firenze.

Questa tecnica si focalizza sulle interazioni tra la radiazione elettromagnetica e la materia nella regione ultravioletta (10-380 nm) e visibile (380-750 nm).<sup>18</sup> L'obiettivo nel mio lavoro di ricerca è verificare se tramite la tecnica FORS è possibile confermare la buona riuscita della sintesi del blu egizio.

### 8.1 Finalità

Lo scopo dell'analisi FORS è quello di restituire una risposta spettrale del colore da analizzare. Questa tecnica risulta molto efficace perché permette di acquisire facilmente gli spettri in riflettanza dell'opera identificando i materiali utilizzati.

Inoltre, l'analisi FORS è in grado di definire il gruppo cromoforo di uno specifico colore. In altre parole, questa tecnica stabilisce la struttura chimica responsabile dell'assorbimento del colore basandosi sull'analisi delle caratteristiche spettroscopiche<sup>18</sup>.

Un limite che presenta questa tecnica è l'incapacità di indentificare i materiali che non riflettono alcuna luce perché trasmessa completamente. Per questo motivo l'analisi di un vetro trasparente risulta essere uguale a quello di un diamante.

Un vantaggio a favore di questa tecnica è la strumentazione economica.

## 8.2 La luce riflessa

Una superficie liscia di un corpo che viene colpita da un raggio luminoso, chiamato incidente, rilascia un altro raggio, detto riflesso, che si trova sullo stesso piano di quello incidente.

L'angolo che si forma tra il raggio incidente e la normale, una retta perpendicolare alla superficie, sarà uguale all'angolo tra la normale e il raggio riflesso: l'angolo di incidenza ( $\theta_i$ ) è uguale a quello di riflessione ( $\theta_r$ )<sup>18</sup>.

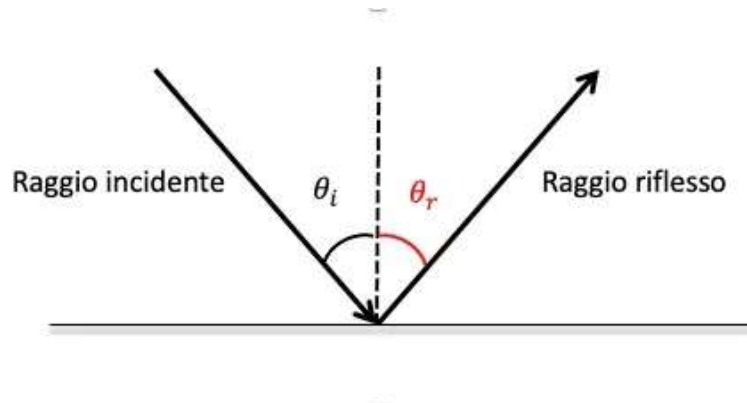


Figura 8.1 <sup>45</sup>: Riflessione della luce

## 8.3 Materiale

Per svolgere questa attività sono stata aiutata da Maurizio Aceto, professore di chimica presso Università del Piemonte, il quale mi ha fornito la strumentazione per svolgere l'attività. Essa consiste in un dispositivo portatile formato da una sorgente di luce, fibre ottiche, una sonda e uno spettrofotometro collegato ad un computer.

L'invio della radiazione emessa da una sorgente luminosa alla superficie in esame e la raccolta della luce riflessa verso la sorgente sono ottenuti tramite fasci di fibre ottiche in quarzo.

Il dispositivo portatile presenta una sorgente di luce con lunghezza d'onda compresa tra i 350 e i 1100 nm. La sorgente di luce è collegata tramite una fibra ottica ad una sonda.

La sonda è composta a sua volta da sette fibre ottiche di cui sei sono a corona e una è centrale. Quest'ultima ha lo scopo di captare la luce riflessa dalla superficie dell'oggetto che viene portata allo spettrofotometro. Questo strumento analizza la luce ricevuta dalla sonda e successivamente la riproduce sotto forma di grafico (spettro) sullo schermo del computer. L'asse delle x rappresenta la lunghezza d'onda espressa in nanometri; l'asse y la riflettanza in percentuale. Quest'ultima consiste in un rapporto misurato in percentuale tra l'intensità della

radiazione riflessa dalla superficie analizzata e quella della luce diffusa da una superficie bianca di riferimento<sup>18</sup>.

## 8.4 Procedimento

Inizialmente ho calibrato lo strumento appoggiando la sonda su una superficie bianca in modo da far riflettere tutta la luce: il grafico rappresentato equivale ad una linea orizzontale alta con 100% di riflettanza.

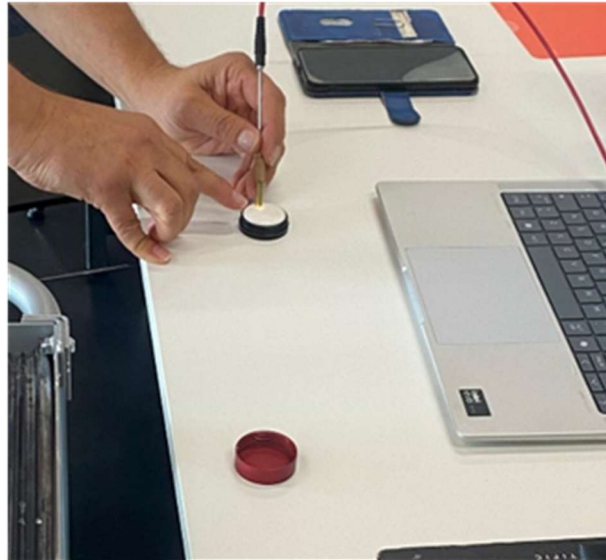


Figura 8.2 <sup>36</sup>: Calibrazione del bianco

In seguito, ho appoggiato la sonda su un punto omogeneo della superficie da analizzare. La luce riflessa dalla superficie viene trasmessa allo spettrofotometro che la analizza e tramite il computer si ha la visualizzazione dello spettro in riflettanza.

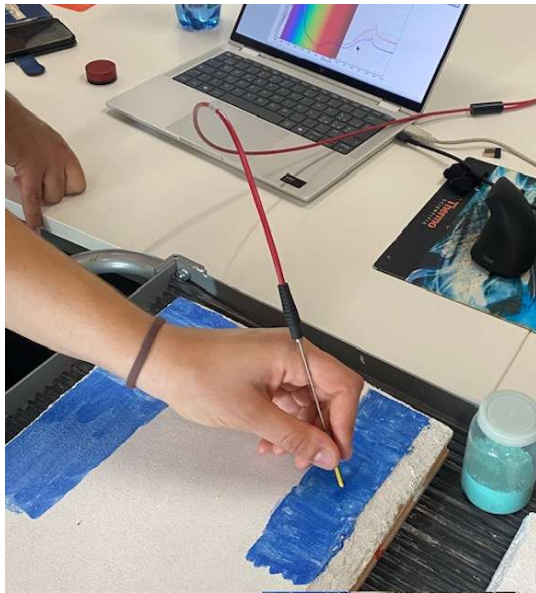


Figura 8.3 <sup>36</sup>: Analisi su affresco

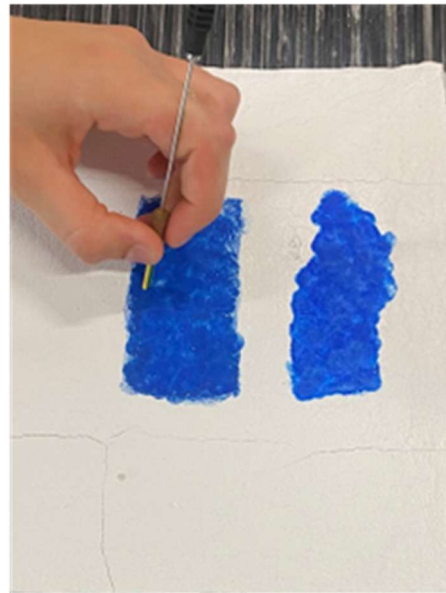


Figura 8.4 <sup>36</sup>: Analisi su gomma arabica

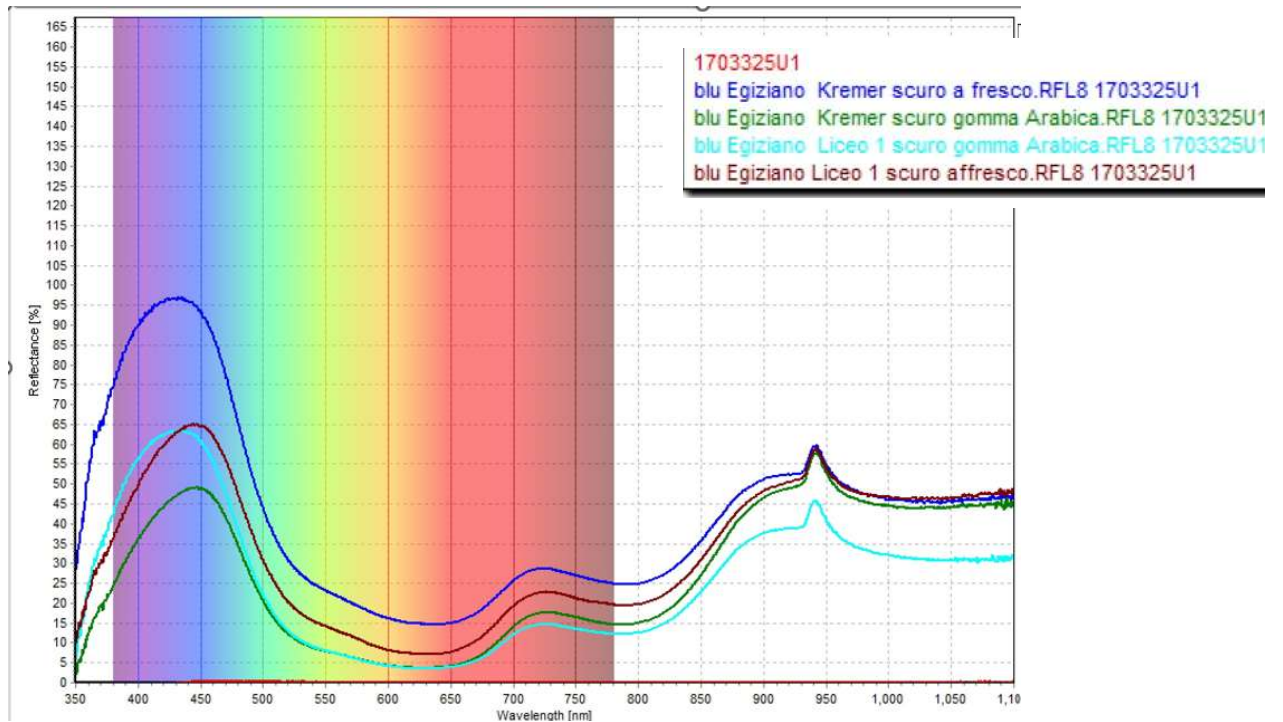
## 8.5 Interpretazione del grafico

Ho eseguito l'analisi FORS sulle due tavole che ho realizzato nel laboratorio e sulle polveri dei due pigmenti. Per eseguire queste misure ho lavorato principalmente nello spettro del visibile e in una piccola parte dello spettro infrarosso.

La riflettanza viene mostrata in percentuale in funzione della lunghezza d'onda in nanometri. Il grafico riporta la riflettanza in percentuale in funzione della lunghezza d'onda e dei valori massimi e minimi. Il massimo nel VIS coincide con il colore che percepiamo ad occhio nudo (il blu), mentre il minimo identifica le radiazioni assorbite che corrispondono a quelle tipiche del blu egizio con una banda di assorbimento tra 560- 650 nm e una banda minore a 790 nm<sup>17</sup>.

Per identificare il blu egizio il grafico dovrebbe avere un massimo nella zona caratteristica del blu e un minimo nella zona caratteristica dell'arancione, colore opposto al blu che, quando viene assorbito, emette luce blu.

Una riflettanza maggiore indica che la luce riflessa è maggiore rispetto a quella assorbita: il raggio luminoso non riuscirà ad andare troppo in profondità facendo apparire il colore più chiaro. Questo effetto è influenzato sia dallo spessore dello strato di pigmento che dalla dimensione delle particelle che lo compongono: maggiore è il numero di particelle (quando il pigmento è macinato più finemente) maggiore è la luce riflessa<sup>17</sup>.



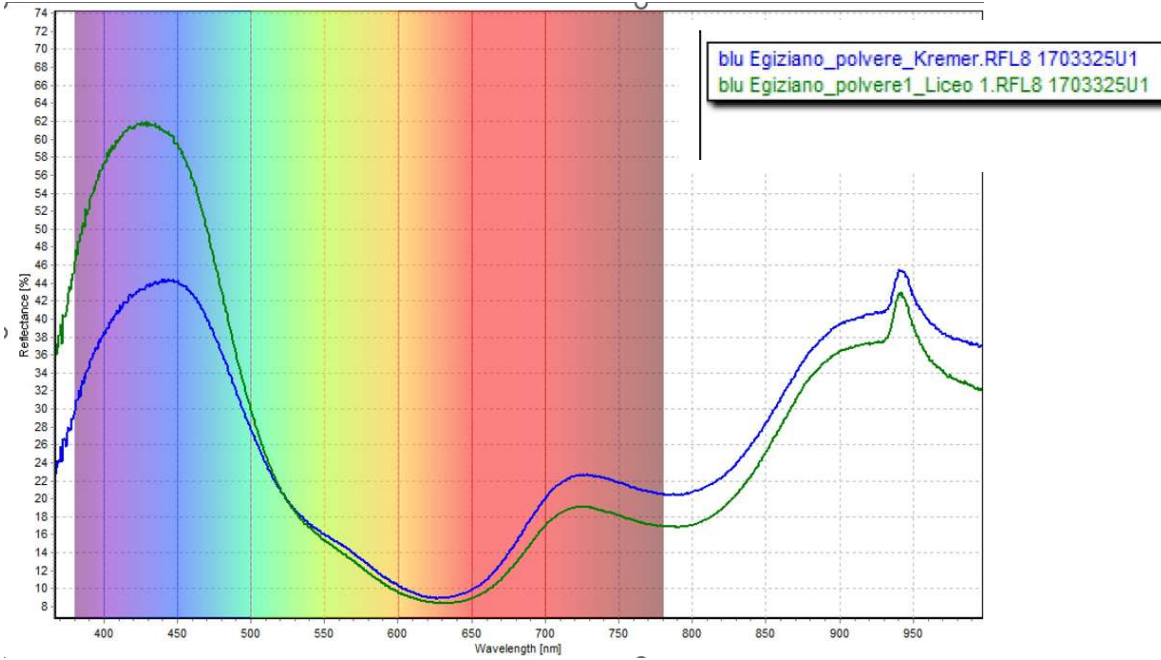
In questo primo grafico sono raffigurati i grafici delle analisi dell'affresco e della gomma arabica sia con il blu sintetizzato alla SUPSI sia con quello acquistato dalla Kremer.

Possiamo notare che le curve sono molto simili: si presenta un picco massimo di riflettanza nel blu-violetto (~430–460 nm) e un minimo nel visibile medio (560–650 nm). La conferma però della buona riuscita della sintesi e quindi l'identificazione del blu egizio è il picco netto intorno a 940–960 nm, che caratterizza la proprietà di luminescenza del blu egizio indotto nel VIS.

L'unica differenza che possiamo notare dal grafico è l'altezza dei massimi e dei minimi nelle diverse curve. Ciò è dovuto a diversi fattori quali la granulometria dei grani dei pigmenti stessi, lo spessore dello strato pittorico nel punto misurato o eventuali fasi vetrose residue.

In questo secondo grafico, sono rappresentate le analisi fatte sulle polveri dei pigmenti. Possiamo notare la perfetta coincidenza delle due curve in termini di forma, sia nello spettro visibile per l'occhio umano che in quello IR. La diversa granulometria è responsabile invece della diversa riflettanza in percentuale per ciascuna lunghezza d'onda. Anche in questo caso è visibile il picco di emissione nell'IR a 940 nm.

L'analisi FORS mi permette di concludere di aver ottenuto la sintesi di un perfetto blu egizio.



## 9. FOTOGRAFIA MULTISPETTRALE

### 9.1 Tecnica

La tecnica della fotografia multispettrale, chiamata anche Imaging, viene utilizzata per identificare i diversi materiali che compongono un'opera e riuscire a mappare la loro presenza. Questa tecnica consiste nell'utilizzo di una macchina fotografica con la funzione di analizzatore. Infatti, a dipendenza del filtro inserito nella macchina fotografica, si possono indagare diverse zone dello spettro elettromagnetico ottenendo informazioni diverse<sup>46</sup>.

Per eseguire questa tecnica è necessario avere una stanza completamente buia ed utilizzare una macchina fotografica senza filtri al suo interno, in modo da comprendere tutti i range di lunghezza d'onda. In seguito, è necessario porre la macchina fotografica su un treppiede collegato ad un computer e avere una lampada alogena, la quale emette radiazioni che si riflettono sulle tabelle, che illumini. La fotografia tecnica viene utilizzata per indagare la natura dei materiali in osservazione<sup>48</sup>.

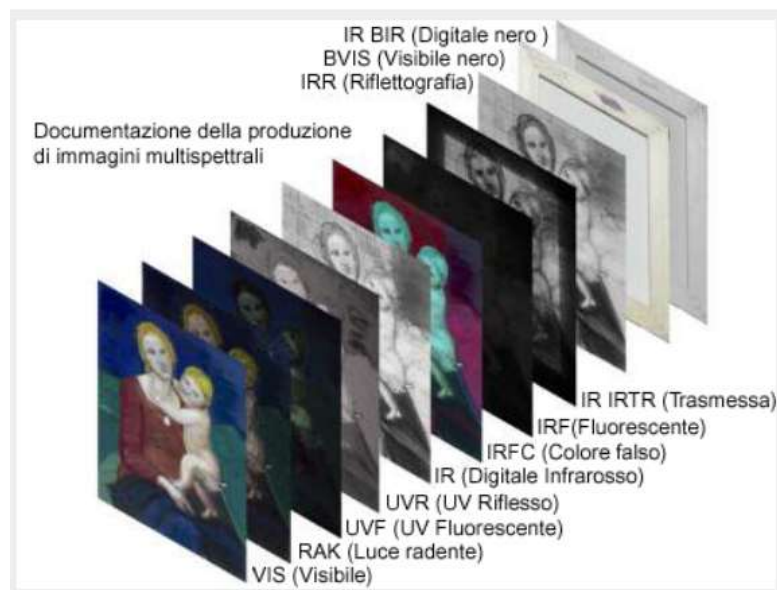


Figura 7.1 <sup>64</sup>: Filtri per foto multispettrale

### 9.2 Fotografia nel vicino infrarosso (IR)

Questa tecnica fotografica è utilizzata nell'esame delle superfici dipinte, e grazie a queste analisi si possono identificare i metodi utilizzati per pitturare e gli eventuali strati pittorici. Si basa sul fenomeno della diffusione della luce (scattering) delle particelle. Il filtro IR, dunque, identifica le radiazioni invisibili all'occhio umano poiché sono nel range dell'infrarosso (cioè, circa con la lunghezza d'onda  $\lambda > 700$  nm).

Nell'immagine sottostante possiamo notare come il pigmento da me sintetizzato alla SUPSI, utilizzato sia con la tecnica dell'affresco che con la gomma arabica, risulti più chiaro rispetto al pigmento acquistato dalla Kremer. Ciò è dovuto probabilmente alla diversa granulometria dei due pigmenti: infatti, il pigmento della Kremer ha una granulometria minore e dunque risulta più semplice da stendere e sarà più coprente.

Il motivo per cui le immagini risultano di tonalità tendenti al rosso è dovuto dal fatto che la macchina fotografica con il filtro IR è molto reattiva alla banda del rosso e del vicino infrarosso. In questo caso l'immagine non è bilanciata con il bianco e dunque risulta rossa, se lo fosse stata, l'immagine risulterebbe sui toni del grigio.



Figura 7.1 <sup>47</sup>

### 9.3 Fotografia in fluorescenza ultravioletta (UV)

Questa tecnica, che fa uso del filtro UV, si basa sul fenomeno fisico della fluorescenza, ovvero l'emissione di radiazioni con lunghezze d'onda maggiore di quella incidente (che in questo caso è UV). La radiazione ultravioletta viene assorbita dai materiali sulla superficie e, grazie al fenomeno della fluorescenza, il materiale riemette radiazioni nella regione del visibile, con una lunghezza d'onda maggiore, nella regione del visibile<sup>46</sup>.

L'analisi con questo metodo di fluorescenza ultravioletta può differenziare materiali che, a causa della loro trasparenza, non risultano visibili all'occhio umano permettendo di localizzare la loro distribuzione sulla superficie. Per esempio, lo strato di lacca su un dipinto o una cera trasparente<sup>46</sup>.

Dall'immagine riprodotta sotto, possiamo notare come le stesure del pigmento non siano fluorescenti ma al contrario risaltino per il loro colore scuro. Il blu egizio, in realtà assorbe la luce ultravioletta e visibile e, eccitandosi, emette fluorescenza. Il motivo per cui non possiamo vedere questo fenomeno è che le radiazioni vengono emesse nell'infrarosso e il filtro UV quindi le blocca. Osservando le stesure con la gomma arabica, possiamo notare la presenza di fluorescenza concentrata sui bordi delle due stesure data dalla gomma arabica stessa.

L'utilizzo della fotografia in fluorescenza ultravioletta è molto complesso riguardo alla restituzione fedele dell'immagine acquisita. I risultati ottenuti con questa tecnica dipendono da molti fattori, tra cui la sorgente di luce, il tipo di macchina fotografica e il metodo usato dall'operatore.

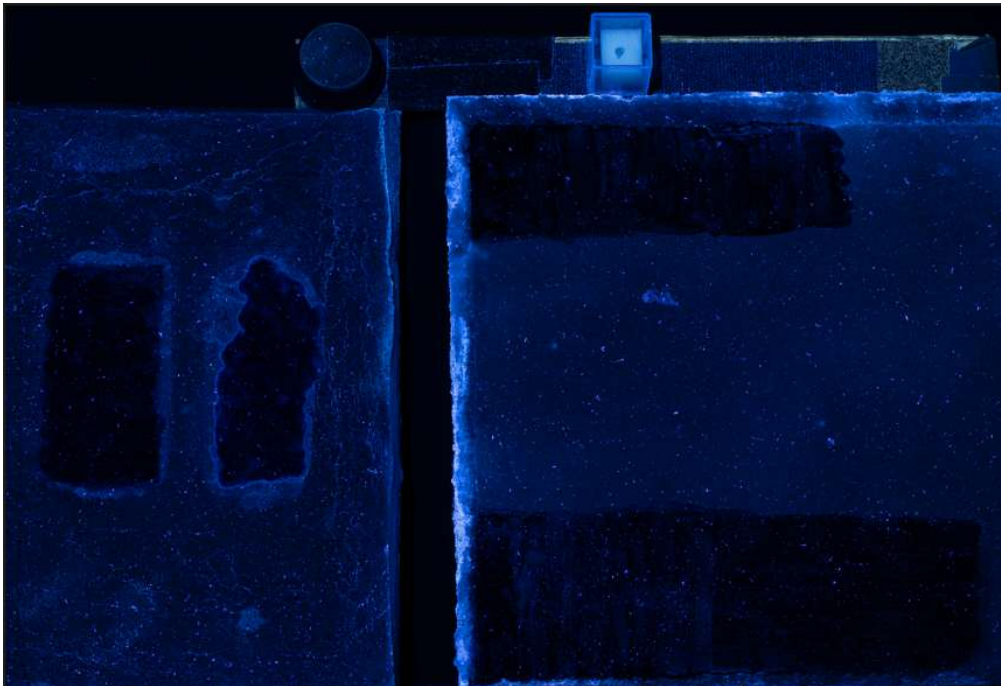


Figura 7.2 <sup>47</sup>: *Fotografia UV, gomma arabica*    *Fotografia UV, affresco*

#### 9.4 Fotografia infrarossa e luce visibile (VIL)

Per effettuare questa tecnica ho inserito nella macchina fotografica il filtro IDAS, che permette di vedere la luminescenza IR indotta dalla luce visibile. Infatti, rende sensibile la macchina fotografica alle radiazioni nel range degli infrarossi e quindi evidenzia la presenza o meno ad esempio di leganti naturali nello strato pittorico<sup>49</sup>.

L'esempio più importante di pigmento che presenta la luminescenza indotta nel visibile è il blu egizio. Infatti, è una delle sue caratteristiche principali che ho già trattato nel capitolo 3 che lo contraddistingue dagli altri pigmenti blu. La luminescenza è un fenomeno molto intenso ed è possibile osservarlo anche in presenza di piccole quantità di pigmento<sup>46</sup>.

Per questa tecnica le radiazioni di tutto lo spettro visibile (400-700 nm) vengono mandate sulla superficie, e dopo essere state catturate dal filtro della macchina fotografica, vengono analizzate quelle con emissioni di fluorescenza infrarossa, registrando la luminescenza emessa a lunghezze d'onda maggiori nella zona del vicino infrarosso.

Dall'immagine sottostante possiamo notare che, a differenza della fotografia IR, sia il blu sintetizzato alla SUPSI che quello acquistato dalla Kremer con entrambe le tecniche risultano molto simili. Ciò ci porta a confermare ciò che avevano già notato con le analisi con la tecnica della FORS: la sintesi del pigmento è avvenuta molto bene, poiché il blu sintetizzato non è solo molto simile a quello acquistato, ma rispetta anche le sue proprietà.



Figura 7.3 <sup>47</sup>: Fotografia VIL, affresco

## CONCLUSIONE

Per concludere possiamo dunque dire che il blu egizio non è soltanto un pigmento: è una testimonianza tangibile dell'ingegno umano, capace di attraversare millenni fino a giungere a noi. Infatti, come ho citato nel titolo, è "nato sulle sponde del Nilo" come imitazione di una pietra preziosa e rara, ed è il protagonista di una storia di conoscenza, sperimentazione e dialogo continuo tra arte e scienza.

Nel corso di questo lavoro ho potuto osservare come un sapere antico, apparentemente lontano, sia in realtà sorprendentemente vicino alla chimica moderna. Infatti, lo studio da me eseguito con tecniche di ricerca moderne, ha permesso di comprendere come le sue proprietà cromatiche e fisiche siano strettamente legate alla struttura cristallina del pigmento risalente al 3000 a.C. Le analisi strumentali effettuate, come la fluorescenza a raggi X, la riflettanza totale attenuata e la spettroscopia FORS, hanno confermato la corretta composizione e struttura del pigmento sintetizzato, e messo in evidenza la sua luminescenza nel vicino infrarosso.

Personalmente questo percorso mi ha dato anche la possibilità di vivere delle esperienze che non avrei mai avuto modo di provare, come la sintesi di un pigmento in un laboratorio, la pratica di tecniche pittoriche o di tecniche specifiche per lo studio di opere d'arte. Infatti, credo che oltre al risultato finale anche il processo sia stato molto edificante e mi ha offerto un'esperienza nuova e molto interessante da cui ho imparato tanto.

Parallelamente alla parte sperimentale, la storia dell'arte ha mostrato come questo pigmento abbia accompagnato civiltà diverse e di epoche differenti, assumendo svariati significati simbolici, estetici e culturali, fino a essere riscoperto oggi non solo come materiale artistico, ma anche come oggetto di ricerca scientifica, tecnologica e innovativa.

Questo percorso ha confermato come la chimica non sia una disciplina isolata, ma un collegamento tra passato, presente e futuro: uno strumento capace di spiegare la bellezza e di preservarla. Il blu egizio rimane così un esempio straordinario di come la materia, se compresa e trasformata dall'uomo, possa diventare memoria e conoscenza del passato ma anche del futuro.

## BIBLIOGRAFIA

1. M. Pastoureau, *Blu storia di un colore*, Ponte alle grazie, 2002
2. A. Zecchina, *Alchimie nell'arte*, Zanichelli, 2012
3. C. Bucati, P. Casali, A. Lanari, *Chimica per l'arte*, Rizzoli, 2001
4. P. Ball, *Il colore una biografia*, Rizzoli, 2012
5. Sintesi del prof. Marco Nicola per il museo egizio di Torino, consultata il 30.03.2025 e 2.05.2025  
<https://www.youtube.com/watch?v=uwslHqS7QQ4>
6. Dizionario Treccani, definizione di colore. Consultata il 3.05.2025  
<https://www.treccani.it/enciclopedia/colore/>
7. M. Squillacciotti, *Colore&Colori*, 2022  
[file:///C:/Users/Pronto%20all'uso/Documents/scuola/LAM/Colore\\_and\\_Colori.pdf](file:///C:/Users/Pronto%20all'uso/Documents/scuola/LAM/Colore_and_Colori.pdf)
8. Consultato 2.05.2025, [https://it.wikipedia.org/wiki/Spettro\\_visibile](https://it.wikipedia.org/wiki/Spettro_visibile)
9. Consultato 2.05.2025, <https://www.my-personaltrainer.it/mypet/gatti-possono-vedere-i-colori.html>
10. Consultato 15.05.2025, <https://www.jove.com/t/51686/exfoliation-egyptian-blue-han-blue-two-alkali-earth-copper-silicate>
11. Consultato 16. 05. 2025 <https://hal.science/hal-04112482/document>
12. F. Delamare, *Bleus en poudre, De l'arts à l'industrie*, Ecole des Mines de Paris, 2007
13. C. Bucari, P. Casali, A. Lanari, *Chimica per l'arte*, Rizzoli education,
14. Per la teoria dell'affresco e della gomma arabica ho parlato con Jacopo Gilardi, insegnante della SUPSI
15. M. Picollo, M. Aceto, T. Vitorino, *UV-Vis spectroscopy*, Physical Sciences Reviews, 2018
16. F. Davidovits, *Vitruvio e la sua ricetta di fabbricazione del pigmento blu egiziano*, Hal open science
17. A. Aldrovandi, E. Buzzegoli, A. Keller, D. Kunzelman, *Investigation of painted surface with a reflection UV false color technique*, OPD, Firenze
18. G. Wiseman, S. Barnes, K. Helwig, *Investigation of egyptian blue on a Fragmentary Egyptian head using ER-FTIR spectroscopy and VIL imaging*, Heritage 2023
19. C. Paolini, *VISIBLE INDUCED LUMINESCENCE (VIL)*, power point lezione Università Teramo
20. J. Gilardi, *storia dei pigmenti*, power point lezione 2013

21. J. Gilardi, i pigmenti e le loro caratteristiche, power point lezione
22. M. Guiso, *chimica dei pigmenti*, appunti
23. Consultato 2.07.2025  
[file:///C:/Users/Pronto%20all'uso/Downloads/IL%20BLU\\_laboratorio.pdf](file:///C:/Users/Pronto%20all'uso/Downloads/IL%20BLU_laboratorio.pdf)
24. Omero, *Iliade canto XI versi 628-629*, Bur Rizzoli, Milano, 2016
25. Consultato 2.12.2025  
[https://penelope.uchicago.edu/Thayer/L/Roman/Texts/Vitruvius/7\\*.html](https://penelope.uchicago.edu/Thayer/L/Roman/Texts/Vitruvius/7*.html)
26. Consultato 2.12.2025 <https://ilgiornaledellarte.com/Articolo/Quel-blu-egizio-pronto-per-essere-macinato->
27. Consultato 7.12.2025 [https://anniluce.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/05/spettro\\_luce12-copia.jpg](https://anniluce.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/05/spettro_luce12-copia.jpg)
28. Consultato 12.10.2025 [https://it.wikipedia.org/wiki/Spettro\\_visibile](https://it.wikipedia.org/wiki/Spettro_visibile)
29. Consultato 15.10.2025 <https://elbsbusinessschool.it/cerchio-cromatico-nel-design/>
30. Consultato 15.10.2025 <https://www.latinacittaaperta.info/2021/03/26/la-fisica-quotidiana-luci-e-immagini-riflessione-diffusa-parte-ii/>
31. sintesi del blu egizio
  - tutte le immagini sono state scattate da me o da Camilla Mauri (assistente alla SUPSI di Mendrisio)
32. Consultato 22.10.2025 <http://www.fermi.mo.it/progetti/progetto0304dc.php>
33. Consultato 23.10.2025 [https://www.atelier-standre.net/it/pagine/tecnica/tecnica\\_affresco/definizione\\_affresco.html](https://www.atelier-standre.net/it/pagine/tecnica/tecnica_affresco/definizione_affresco.html)
34. Consultato 19.05.2025 <https://www.kremer-pigmente.com/it/shop/medium-leganti-adesivi/63300-gomma-arabica-pezzi.html>
35. le foto invece le ho scattate io o Camilla Mauri per la tecnica dell'affresco e della gomma arabica
36. analisi FORS
  - tutte le immagini le ho scattate io durante le misurazioni
37. consultato 17.11.2025 <https://mediterraneoantico.it/articoli/dalla-caccia-all-ippopotamo-a-san-giorgio-e-il-drago/>
38. consultato 19.11.2025 <https://www.alibionline.it/corredo-nefertari-museo-egizio-torino/>

39. consultato 1.12.2025  
[https://it.wikipedia.org/wiki/Sithathoriunet#/media/File:Pectoral of Senusret II by John Campana.jpg](https://it.wikipedia.org/wiki/Sithathoriunet#/media/File:Pectoral_of_Senusret_II_by_John_Campana.jpg)
40. consultato 1.12.2025 <https://caffebook.it/2018/07/23/blu-egiziano-piu-antico-pigmento-artificiale-nella-storia-umana/>
41. consultato 22.11.2025 [https://it.wikipedia.org/wiki/File:Akrotiri - Fresco of a fisherman.jpg](https://it.wikipedia.org/wiki/File:Akrotiri_-_Fresco_of_a_fisherman.jpg)
42. consultato 20.11.2025 <https://www.artesvelata.it/wp-content/uploads/2021/04/Tomba-del-tuffatore-480-470-a.C.-Parete-ovest.-Paestum-Museo-Archeologico-Nazionale-arte-svelata.jpg>
43. Consultato 14.12.2025 <https://www.madeinpompei.it/2024/01/02/il-blu-egizio-nellantica-pompei/>
44. Consultato 2.12.2025 [https://www.storicang.it/a/scoperta-di-pompei\\_15770](https://www.storicang.it/a/scoperta-di-pompei_15770)
45. Consultato 4.12.2025 <https://wauniversity.it/riflessione-rifrazione/>
46. R. Iannaccone, *Dottorato in ricerca in scienza per la conservazione dei beni culturali, Tecniche di Imaging Innovative per la messa a punto di un protocollo integrato per la caratterizzazione dei pigmenti utilizzati nell'antichità*, Firenze 2012/2014
47. Le fotografie scattate durante gli studi con la fotografia tecnica con la professoressa P. Moretti
48. Informazioni raccolte durante gli studi della fotografia tecnica alla SUPSI di Mendrisio
49. C. Paolini, *Diagnostica per beni culturali*, Teramo
50. Consultato 2.12.2025 <https://www.archeomatica.it/documentazione/il-pigmento-ritrovato-il-blu-egizio-negli-affreschi-di-raffaello-a-villa-farnesina>
51. Consultato 19.11.2025 <https://www.dire.it/12-12-2023/992262-corallo-e-blu-egizio-al-palatino-scoperto-il-mosaico-delle-meraviglie/>
52. <https://mediterraneoantico.it/articoli/egitto-vicino-orient/aperta-a-saqqara-una-delle-piu-belle-sepolture-della-necropoli-la-tomba-di-mehu/>
53. Consultato 20.11.2025 <https://www.fondazioneperugia.it/mostre/il-mistero-del-blu-di-raffaello/>
54. P. Kelter, *La scienza della vita*, Edises
55. Consultato 18.11.2025 <https://it.linkedin.com/pulse/pigmenti-artificiali-nel-iii-millennio-ac-storia-e-della-biscioti>

56. Consultato 18.12.2025 <https://www.bruker.com/de/products-and-solu>
57. I grafici delle analisi XRF sono stati salvati da Patrizia Moretti che me le ha gentilmente mandate
58. Consultato 19.12.2025 <https://specac.com/theory-articles/introduction-to-ATR-FTIR-spectroscopy-part-1-the-basics/>
59. Consultato 17.12.2025 [https://www.mt.com/ch/it/home/applications/L1\\_AutoChem\\_Applications/FTIR-spectroscopy/attenuated-total-reflectance-ATR.html](https://www.mt.com/ch/it/home/applications/L1_AutoChem_Applications/FTIR-spectroscopy/attenuated-total-reflectance-ATR.html)
60. L'immagine l'ho scattata io durante le analisi ATR presso la SUPSI
61. I grafici delle analisi ATR mi sono stati mandati da Patrizia Moretti
62. M. Nicola, *Tecniche diagnostiche non invasive nell'autenticazione e studio dei reperti egizi: XRF e VIL*, Congresso Nazionale IGCI, Torino, 2015
63. Spiegazione della Profs. Moretti a luglio 2025 sia per tecnica ATR che XRF
64. Consultato 16.12.2025 <https://www.scientificarttests.com/it/immagini-multispettrali.html>
65. Consultato 20.12.2025 <http://www.sbai.uniroma1.it/~mauro.pasquali/page2/page9/page10/files/06-02.pdf>
66. S. Fuso, *Il segreto delle cose*, Carocci editore, Roma 2021
67. Consultato 15.12.2025 <https://www.finestresullarte.info/archeologia/un-gruppo-di-scienziati-ha-ricreato-il-blu-egizio>
68. Consultato 23.11.2025 <https://www.chemtube3d.com/ss-cacusi4o10-2/>
69. Consultato 4.01.2026 <https://www.chimica-online.it/download/luminescenza.htm>
70. Consultato 19.12.2025 <https://napoli.repubblica.it/cronaca/2021/12/11/news/pompei-scavi-archeologia-blu-egizio-scoperta-329763131/>
71. Consultato 18.11.2025 <https://www.kremer-pigmente.com/it/shop/pigmenti/10060-blu-egiziano.html>
72. Consultato 03.01.2026 <https://archivio.asimmetrie.it/analizzare-senza-distruggere.html>

**Lavoro di maturità - Dichiarazione di autenticità**

Io, EMMA FANTONI, classe 4<sup>QA</sup>, confermo che ho redatto il presente Lavoro di maturità nel rispetto di tutti i criteri riportati nelle Indicazioni operative concernenti il

lavoro di maturità del Consiglio di direzione (gennaio 2025) e nelle Indicazioni per gli studenti riguardo

all'uso di AI Chatbot (AIC) della Sezione dell'insegnamento medio superiore (24 gennaio 2025).

In particolare, dichiaro che il lavoro presentato è il risultato di un progetto condotto individualmente,

che non è stato commissionato a terzi e che non configura nessuna forma di plagio.

oppure

Qualora il progetto di ricerca sia stato condotto in un piccolo gruppo, i cui componenti sono indicati in

calce, dichiaro che il lavoro presentato documenta la parte da me svolta, che l'intero lavoro non è stato

commissionato a terzi e che non configura nessuna forma di plagio.

Dichiaro infine di essere consapevole che omettere di indicare in generale le fonti di idee, concetti, formulazioni altrui costituisce un'azione contraria allo spirito e agli scopi del lavoro e può portare alla

sua non accettazione

In fede.

Luogo e data:

Lugano 12.02.2026

Firma:

Emma Fantoni