



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI BENI CULTURALI: ARCHEOLOGIA, STORIA DELL'ARTE,
DEL CINEMA E DELLA MUSICA

Corso di Laurea Magistrale in Scienze Archeologiche

Indagini non invasive per l'individuazione e la caratterizzazione del blu
egizio su alcuni oggetti nel Museo di Scienze Archeologiche e d'Arte
dell'Università di Padova

Relatrice: Prof.ssa Ing. Rita Deiana

Co-relatrice: Dott.ssa Alessandra Menegazzi

Laureanda: Giulia Bonaventura

Matricola: 2058285

ANNO ACCADEMICO 2023/24

*Ai miei genitori,
per avermi sempre supportata nelle mie scelte.
Siete la mia roccia e senza di voi non sarei chi sono oggi.*

Indice

Introduzione.....	1
Capitolo 1 – IL BLU EGIZIO: STORIA DI UN COLORE	3
1.1 La produzione del blu egizio.....	6
1.2 Definizione di blu egizio.....	10
1.3. L'uso del blu egizio dall'antichità ad oggi.....	11
1.3.1 Lo straordinario caso del blu egizio nella Galatea di Raffaello	15
1.3.2 Impieghi odierni e futuri del blu egizio.....	16
Capitolo 2 – LE PROPRIETÀ SPETTROSCOPICHE DEL BLU EGIZIO E LE MODALITÀ DI INDAGINE ADOTTATE IN QUESTO STUDIO PER LA SUA IDENTIFICAZIONE.....	19
2.1 VIL - <i>Visible Induced Luminescence</i>	20
2.1.1 La luminescenza foto-indotta.....	20
2.1.2 Esame visivo della luminescenza	23
2.1.3 <i>Imaging</i> della luminescenza indotta da luce visibile.....	23
2.1.4 Strumentazione.....	23
2.2 Spettroscopia Raman	27
2.2.1 Le principali caratteristiche della Spettroscopia Raman.....	27
2.2.2 Le basi della Spettroscopia Raman	27
2.2.3 Strumentazione.....	30
2.2.4 Librerie spettrali	35
2.3. FORS – Fiber Optics Reflectance Spectroscopy	35
2.3.1 Principi fisici alla base della FORS.....	36
2.3.2 Strumentazione.....	38
Capitolo 3 – I REPERTI OGGETTO DI INDAGINE DEL MUSEO DI SCIENZE ARCHEOLOGICHE E D'ARTE DELL'UNIVERSITÀ DI PADOVA	43

3.1 Il museo di Scienze Archeologiche e d'Arte.....	43
3.1.1 Collezione Mantova Benavides.....	46
3.1.2 Le salette archeologiche	46
3.1.3 La gipsoteca.....	47
3.2 I manufatti presi in esame	48
3.2.1 Frammento egizio (E48).....	50
3.2.2 Lacerto di affresco romano (AR12)	51
3.2.3 Statuetta femminile di danzatrice bacchica (Merlin124)	54
3.2.4 Statuetta femminile stante (Merlin123).....	57
Capitolo 4 – ANALISI E RISULTATI DEGLI OGGETTI PRESI IN ESAME.....	61
4.1 L'acquisizione delle immagini VIL	62
4.2 L'acquisizione degli spettri FORS	63
4.3 Il frammento egizio (E48).....	66
4.4 Il lacerto di affresco romano (AR12).....	69
4.5 La statuetta di danzatrice bacchica (Merlin124).....	73
4.6 La statuetta stante (Merlin123)	76
4.7 Discussione dei risultati	79
Conclusioni.....	83
Bibliografia e sitografia	85
Ringraziamenti	93

Introduzione

Il blu egizio è il più antico pigmento artificiale prodotto dall'uomo, databile, secondo recenti studi, addirittura al 3300 a.C. Tale pigmento non è però solo il più antico pigmento artificiale, ma anche uno dei più longevi. Il suo impiego, infatti, non sembra essersi interrotto con il declino della civiltà egizia, ma ha continuato ad essere adoperato nel mondo greco, romano e, ancora, in epoca moderna. Seppur sembri esserci stato un arresto nell'uso del blu egizio in epoca medievale, esso ricomparirà nel Rinascimento: recenti indagini ne hanno individuato traccia nella *Galatea* di Raffaello, nella *Santa Margherita* dell'Ortolano e nell'*Adorazione dei Magi* del Garofalo.

La storia del blu egizio è una storia lunga e complessa, che attraversa i secoli e, proprio per questa sua longevità, si può immaginare una possibile variazione nella sua composizione e nel suo utilizzo in relazione ai diversi contesti geografici e storici. Oggi indubbiamente risulta di interesse poter ricostruire l'evoluzione tecnologica di questo pigmento e studiarne le differenti rese cromatiche partendo dal suo utilizzo nelle miscele. Del blu egizio, come si vedrà, non esiste in realtà una "ricetta" vera e propria, ma abbiamo alcune fonti che ce ne parlano, tra cui una delle più autorevoli certamente è quella di Vitruvio, benché, pur descrivendo le fasi della produzione del blu egizio, neppure lui ci riporti con esattezza il processo di produzione: mancano ad esempio informazioni sulle quantità utilizzate e sui tempi di cottura.

Partendo da questi presupposti, con questo lavoro di tesi si è così deciso di prendere in esame alcuni manufatti di interesse archeologico che presentano tracce di blu egizio, custoditi presso il Museo di Scienze Archeologiche e d'Arte dell'Università degli Studi di Padova. Sono stati selezionati quattro oggetti, che differiscono tra loro per tipologia, materiale, epoca e forma: un frammento egizio datato al Nuovo Regno, un lacerto di affresco romano (I sec. d.C.) e due statuette di produzione italiota datate al IV sec. a.C.

Lo studio si è basato esclusivamente sull'impiego di tecniche di indagine non invasiva: una prima identificazione della reale presenza del blu egizio utilizzando la luminescenza indotta nel visibile (VIL) e per selezionare opportunamente i punti di misura più appropriati ai fini dell'analisi puntuale, una successiva analisi spettroscopica per punti con le tecniche FORS e RAMAN portatili, allo scopo di caratterizzare la risposta spettrale delle diverse superfici contenenti blu egizio, identificandone le differenze.

In realtà, in questo contesto, l'applicazione del RAMAN portatile con la linea laser a disposizione non si è rivelata fruttuosa, essendo il blu egizio un pigmento a base di rame, non facilmente individuabile senza l'effettiva adeguata strumentazione¹. Ciò nonostante, l'indagine FORS ha invece permesso di ottenere ottimi risultati, mettendo in evidenza evidenti differenze nell'impiego del pigmento nei diversi oggetti presi in esame, avvalorando la tesi che l'uso protratto nei secoli di questo pigmento, sia anche legato a tecnologie e miscele diverse, risultate identificabili, anche solo qualitativamente, in via preliminare e non invasiva, attraverso l'approccio qui adottato.

¹¹ Si è utilizzato un RAMAN portatile che lavora a 785 nm. Sarebbe stato però necessario l'impiego di un microRAMAN nel verde, che permettesse di puntare i granelli di blu egizio.

Capitolo 1

IL BLU EGIZIO: STORIA DI UN COLORE

I colori hanno indubbiamente affascinato l'uomo sin dalla Preistoria, prova ne sono le pitture rupestri in grotta (es. Lascaux), in cui neri, bruni, rossi e gialli, in diverse sfumature, sono stati utilizzati per rappresentare in modo ricercato e realistico quello che l'uomo vedeva, con ciò che la natura gli metteva a disposizione. Coloranti e pigmenti erano molto apprezzati e molto ricercati sin dall'antichità per le realizzazioni artistiche.

Nella Preistoria e successivamente in tutte le epoche storiche, la disponibilità di queste sostanze costituiva il problema chiave. I colori della terra, come quelli utilizzati nelle pitture rupestri già dalla Preistoria, erano facilmente disponibili in ogni momento poiché potevano essere presi direttamente dal terreno (es. ossidi di ferro²). Altri colori, invece, tra cui in particolare il blu³, sono invece assenti nelle pitture più antiche

Il blu, infatti, è un colore che è stato introdotto molto tardi rispetto ai pigmenti di origine naturale e pur essendo un colore molto presente in natura, l'uomo è riuscito a riprodurlo, realizzarlo e padroneggiarlo solo molto tardi e in generale con notevoli difficoltà.

L'utilizzo del blu è stato abbastanza marginale nell'Occidente antico, tanto che alcuni studiosi nell'800 hanno addirittura cominciato a chiedersi se gli antichi vedessero il blu, o almeno se lo percepissero come noi oggi. Questi dati sono ormai stati smentiti e, infatti, se è vero che Greci e Romani non fanno ampio uso del blu, rispetto ad altri colori (es. il rosso), lo stesso non si può dire ad esempio per Celti e Germani o, ancora, per i popoli del Vicino Oriente, i quali importavano dall'Asia e dall'Africa una materia colorante a lungo sconosciuta in Occidente: l'indaco⁴.

Possiamo però affermare che nell'antichità i rari pigmenti minerali blu potevano essere estratti per la maggior parte solo da giacimenti difficilmente accessibili, quindi verosimilmente il loro scarso utilizzo è legato semplicemente alla difficoltà di approvvigionamento e al loro conseguente probabile eccessivo costo, oltre alla loro frequente instabilità dal punto di vista chimico. Questa situazione non cambiò fino al XIX

² Zecchina 2012

³ Berke 2002

⁴ Pastoreau 2001

sec., quando l'industrializzazione portò alla produzione chimica di massa di coloranti e pigmenti.

Il primo pigmento minerale blu accessibile per l'uomo e veramente stabile chimicamente è stato molto probabilmente il lapislazzuli $(\text{Na,Ca})_8(\text{SO}_4,\text{S,Cl})_2(\text{AlSiO}_4)_6$. Come l'indaco, il lapislazzuli proviene dall'Oriente⁵: i principali giacimenti erano situati in Siberia, Cina, Tibet, Iran e Afghanistan. Questi ultimi due Paesi, in particolare, costituivano le principali fonti di approvvigionamento per l'Occidente in antichità e nel Medioevo. Il lapislazzuli è una pietra molto dura, oggi considerata "semipreziosa", che allo stato naturale si presenta di un intenso colore blu, con venature gialle dovute alla pirite e macchie biancastre leggermente dorate. Gli antichi scambiavano queste venature per oro, fatto che aumentava il pregio – e di conseguenza il costo – di tale pietra. Questa pietra era costosissima non solo perché difficile da reperire e generalmente proveniente da lontano, ma anche perché la sua estrazione richiedeva un lavoro estremamente lungo. Inoltre, le operazioni di frantumazione e purificazione – che permettono di trasformare il minerale in un pigmento – sono lente e complesse. Il *lapis*, in particolare, contiene un gran numero di impurità da eliminare per conservare solo le particelle blu, che rappresentano la parte minoritaria della pietra. I Greci e i Romani non eccellevano in tale lavorazione e spesso si limitavano a frantumare la pietra nel suo insieme. Questo spiegherebbe perché a parità di utilizzo del *lapis*, il blu greco e romano è meno puro e intenso di quello che si riscontra in Asia o, successivamente, nel mondo musulmano e nell'Occidente cristiano. Nel Medioevo si idearono dei procedimenti – a base di cera e di liscivie diluite – che permetteranno di liberare il lapislazzuli dalle sue impurità. Come pigmento, il lapislazzuli produce dei toni blu di una grande varietà e di una bella intensità. È stabile alla luce, tuttavia il suo colore coprente è debole; motivo per cui veniva utilizzato soprattutto su piccole superfici e, a causa del suo elevato costo, per le sole zone da valorizzare⁶.

La richiesta di pigmenti blu venne quindi soddisfatta utilizzando un minerale più abbondante e meno costoso: l'azzurrite $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$, un carbonato basico di rame⁷. L'azzurrite essendo meno costosa divenne il principale pigmento blu utilizzato nell'antichità classica e nel Medioevo, nonostante anche questo minerale presenti i suoi

⁵ Berke 2002

⁶ Pastoreau 2001

⁷ Zecchina 2012

problemi: seppur molto diffuso è infatti chimicamente instabile⁸. A seconda dell'ambiente, col tempo infatti questo si trasformerà in malachite, un pigmento verde. L'azzurrite non si prestava perciò all'uso in esterno. Un ulteriore problema legato all'uso di questo minerale era dato anche dalla difficoltà di frantumazione: se frantumato troppo finemente, perdeva colore e diventava un azzurro pallido; frantumato troppo grossolanamente si mescolava difficilmente con il legante e restituiva una pittura granulosa. I Greci e i Romani lo facevano arrivare dall'Armenia (*lapis armenus*), da Cipro (*caeruleum cyprium*) e dal monte Sinai; nel Medioevo si estraeva invece dai monti della Germania e della Boemia, da cui il nome "blu di montagna".

Proprio la difficoltà di reperire minerali per produrre il blu e il loro costo spingerà gli antichi a realizzare dei pigmenti blu artificiali, a base di limatura di rame mescolata a sabbia e a potassa⁹.

Secondo gli antichi storici greci e romani (Teofrasto, Vitruvio e Plinio il Vecchio), il primo pigmento blu artificiale fu inventato in Egitto, da qui il suo nome: blu egizio o blu egiziano¹⁰. Il pigmento sintetico chiamato blu egiziano ha la sua controparte nel minerale naturale cuprorivaite $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$. La cuprorivaite è estremamente rara in natura e, infatti, il blu egizio non veniva ricavato direttamente da sostanze naturali, come accadeva per altri pigmenti, ma da un processo di cottura di diversi ingredienti. Ciò nonostante, è ben noto agli egittologi e agli scienziati come il blu egizio fu prodotto per la prima volta nella IV dinastia (intorno al 2500 a.C.) e fu largamente utilizzato in Egitto e nel bacino del Mediterraneo fino alla fine del periodo romano e oltre (ca. 800 d.C.)¹¹. Nuove ricerche, frutto dell'analisi di un vasetto (MFA98-1011) conservato presso il Museum of Fine Art di Boston, hanno permesso di datare la nascita del pigmento non più al 2890 a.C.¹² ma al 3300 a.C. Tale vasetto, ritrovato nel 1902 nel c.d. "main deposit" di Hierakonpolis, presenta uno scorpione e il segno geroglifico *skhn* (geroglifico D32, raffigurante due

⁸ Berke 2006

⁹ Pastoreau 2001

¹⁰ Dariz, Schmid 2021

¹¹ Accorsi et al. 2009

¹² Nel 2006 erano state individuate tracce di blu egizio nella tb. 3121 della necropoli di Saqqara. Questo ritrovamento aveva consentito già un'ante-datazione dell'uso di tale pigmento al 2890 a.C., ben prima, quindi, della IV dinastia (cfr. Greco, *Il colore delle cose*, in AA.VV., *Il blu egizio dall'antichità al Rinascimento*. In ricordo di Mario Torelli, Atti dei Convegni Lincei, Bardi Edizioni, Roma 2022 e cfr. Hatton, Shortland, Tite, *The production technology of Egyptian blue and green frits from second millennium BC Egypt and Mesopotamia*, 2008.

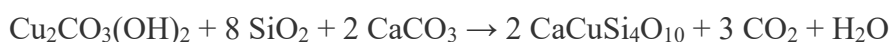
braccia rovesciate). L'analisi della scrittura, insieme ad una serie di confronti con altri ritrovamenti ceramici della stessa zona, hanno fatto quindi il primo impiego noto del blu egizio ad una fase anteriore all'unificazione dell'Egitto e anteriore alla dinastia zero¹³.

1.1 La produzione del blu egizio

La scoperta del blu egizio è piuttosto recente, risale per l'esattezza al 1802, quando il chimico francese Louis Jacques Thénard lo isolò per la prima volta da un frammento di ceramica egiziana. Il pigmento era composto principalmente da ossido di rame e silicato di alluminio, ed era noto per la sua stabilità e resistenza al deterioramento¹⁴.

Il processo di produzione del blu egizio era molto complesso e richiedeva una conoscenza avanzata di chimica e metallurgia. Il pigmento blu veniva sintetizzato mediante sinterizzazione o fusione di una miscela di materie prime: sabbia o ciottoli di quarzo, calcare, fondente sotto forma di soda o cenere proveniente da alofite (piante saline) e un composto di rame (minerale di rame o eventualmente anche lega)¹⁵. Secondo moderni esperimenti di laboratorio, le temperature che occorrevano per la produzione di tale pigmento erano comprese tra 850 °C e 1000 °C¹⁶ e il pigmento doveva essere cotto per circa 24-48 ore.

Se tra i minerali contenenti rame veniva utilizzata la malachite, la reazione che avveniva era la seguente:



Si otteneva un conglomerato solido, chiamato «fritta egizia», costituita da cristalli blu con la stessa composizione di un minerale raro come la cuprorivaite $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$, insieme a cristalli di quarzo e vetro. La cuprorivaite veniva poi finemente sminuzzata ottenendo così una polvere che veniva utilizzata come tinta pittorica. La cuprorivaite poteva anche essere nuovamente impastata per la fabbricazione di vasi e piccole statue¹⁷.

¹³ <https://youtu.be/THMTkYehwr8?si=6fhBXXqApPBRCo7D>

¹⁴ <https://pilloledichimica.it/2023/05/02/blu-egizio-la-chimica-dietro-uno-dei-pigmenti-piu-affascinanti-della-storia/>

¹⁵ Hatton, Shortland, Tite 2008

¹⁶ Dariz, Schmid 2021

¹⁷ <https://www.chem.uniroma1.it/museo-di-chimica-primolevi/un-viaggio-nel-blu>

Anche nel *De Architectura* di Vitruvio, I sec. a. C., troviamo la descrizione di una possibile preparazione del blu egiziano, senza tuttavia l'indicazione di quantità e temperature di preparazione:

Vitr. 7, 11, 1: *Caeruli temperationes Alexandriae primum sunt inventae, postea item Vestorius Puteolis instituit faciendum. 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.*

«Le tecniche per ottenere l'azzurro furono scoperte ad Alessandria; in seguito anche Vestorio a Pozzuoli ne intraprese la produzione. 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 effetto dell'intensità del fuoco, assumono un colore azzurro»¹⁸.

Nessun testo antico giunto fino a noi oggi, tranne quello di Vitruvio, descrive le fasi della realizzazione di questo pigmento artificiale, a base di ossido di rame e di alcali. Di questo pigmento, prodotto per circa due millenni ad una qualità costante dagli Egiziani, e impiegato fino in epoca romana, si può affermare quindi che si hanno ancora poche

¹⁸*De architectura*, VII, 11.1 – *De architectura*, tr. it. di L. Migotto (ESI, Pordenone 1990, p. 345). Tra gli antichi ne fanno cenno Teofrasto, *De lapidibus*, XXXIII, VIII, 55, 1-12 e Plinio il Vecchio, *Naturalis Historia*, XXXIII, 161-162.

informazioni. E, del resto, anche l'antica Stele di Irtysen, scultore vissuto durante il regno di Mentuhotep II (XI dinastia, 2160-1191 a.C.), attesta che le tecniche artistiche sono tramandate solo oralmente¹⁹.

Il primo documento archeologico utile a far luce su quanto descritto da Vitruvio fu restituito dall'Egitto, da scavi condotti tra XIX e XX sec. a Tell el-Amarna, a Menfi. Da tali evidenze fu possibile una prima ricostruzione del processo di cottura tramite *realia* archeologici, documenti sui quali si è più recentemente tornati criticamente: negli atelier si utilizzavano crogioli di terracotta di forme diverse, vasi globulari e cilindrici destinati ad essere inseriti, sovrapposti, nei forni e sigillati tra loro da strati di argilla. Un atelier per la fabbricazione di colori – e forse per il vetro – era quello rinvenuto in Egitto. Vasi simili sono poi stati identificati anche in Occidente e importanti documenti sono emersi di recente negli scavi dei Campi Flegrei, soprattutto su frammenti di crogioli in terracotta. I primi frammenti di tale produzione sono parsi a Literno (*Liternum*) e a Cuma.

Questi ultimi rinvenimenti hanno dato avvio ad un'approfondita ricerca condotta da Letizia Cavassa che ha attentamente studiato contenitori e processi di cottura, collegando fonti a testimonianze archeologiche e formulando una lucida lettura circa i processi di fabbricazione. Un esemplare integro, utilizzato nella necropoli di Literno, ha permesso di ricostruire una forma ideale di tali contenitori: profondi, a breve labbro distinto, grossolani per fattura, alti per lo più tra 40 e 50 cm, con un diametro alla bocca tra 30 e 40 cm. Si potrebbero forse identificare in essi gli *urcei* di Vitruvio, rinvenuti – tranne nel caso della necropoli di Literno – sempre in frammenti (perlopiù stracotti per l'esposizione al calore), ma che conservano sulle pareti incrostazioni di colore azzurro. Sono senza dubbio i vasi utilizzati per la cottura del colore, eventualmente in forma di pile. Negli scarichi cumani sono presenti anche forme globulari più simili ad olle, riproponendo così quanto documentato in Egitto. Per uno dei gruppi di ricerca che ha lavorato sui materiali, la distinzione tra i due vasi potrebbe corrispondere alla creazione di due tipi di colore: in un caso la creazione di blu e nell'altro del verde. Per realizzare quest'ultimo si richiedevano più alte temperature, ed è stato proposto di interpretare questa seconda forma più chiusa – le olle – come funzionale a cuocere proprio il verde. Ritrovare in più luoghi di Cuma e Literno frammenti di vasi incrostati di blu – soprattutto pareti di orci –

¹⁹ Bellini 2023

è sicuramente un dato significativo ed è stato più volte in letteratura richiamato il passo di Plinio il Vecchio, che ricorda che la sabbia tra Cuma e Literno, a sud della foce del Volturno, era particolarmente idonea a questa produzione. La notizia si collega a quella di Vitruvio che ricordava una variante del *caeruleum*, il *vestorianum*, che prendeva nome da Caio Vestorio, banchiere e commerciante puteolano dell'ultima repubblica, amico di Attico e quindi di Cicerone, che a Pozzuoli aveva le sue basi operative. Le fabbriche da lui impiantate, tramite le quali il sapere alessandrino si trasferisce in Occidente, furono tanto importanti da lasciare il nome a un gruppo di colori azzurri, anche quando la famiglia di Vestorio non appare più documentata a Pozzuoli e, ancora, il colore azzurro nell'Editto di *Maximum dei Prezzi*, compare con il nome di *cyaninum vestorianum*, quando ormai la famiglia non esisteva più. Il colore conserva quindi il ricordo di questa prima fabbrica e presentava inoltre un costo che oscillava tra gli 8 e i 150 denari alla libbra.

Tanti ritrovamenti cumani hanno fatto poi presumere una maggiore diffusione di fabbriche accanto alla produzione puteolana di Vestorio. Si è dunque ipotizzato a Cuma un centro produttore, una fabbrica presso le mura e una sul Monte Grillo; mentre si sono considerati in giacitura secondaria i rinvenimenti del foro. I frammenti di vasi sono quindi stati letti come indicatori di luogo di produzione. C'è però forse da poter dettagliare le importanti acquisizioni raggiunte in questi anni: la distribuzione dei frammenti di orci appare forse troppo fitta a Cuma per poter ipotizzare tanti luoghi di produzione diversa. I rinvenimenti dal foro, infine, non sono assolutamente di risulta.

C'è da chiedersi invece se la presenza di frammenti di vasi con traccia di blu – per quanto contorti dal fuoco – non sia da considerare solo indizio di utilizzo del colore, forse venduto – per alcune sue varianti – a blocco con il vaso da cui poteva essere tratto. Non per piccoli lavori, ma in caso di grandi cantieri, l'approvvigionamento di colore poteva avvenire all'ingrosso, in particolare per le varianti meno preziose e la materia prima poteva essere estratta in cantiere dal vaso, raschiando tutto il possibile contenuto dalle pareti. Non è forse un caso che i luoghi cumani siano prossimi a edifici decorati, che presuppongono un cantiere: i mausolei della necropoli cumani, i grandi edifici del foro e, forse, sulle pendici del Monte Grillo, una *domus* – o possibile santuario. Considerando il volume di un vaso medio tra quelli ritrovati in frammenti negli scarichi cumani, si è calcolato che esso poteva contenere circa 6 litri di liquido. Se compariamo il valore dei

denari in rapporto con il costo della vita (testimoniato dalla *Lista dei Prezzi* delle iscrizioni pompeiane), ricaviamo – con grande approssimazione – un valore in euro di un vaso colmo di colore: circa 1500 euro per il vestoriano, che Plinio ci dice costare 11 denari alla libbra, valore che si riduce ad appena 68 euro per la qualità invece più scadente *lomentum* valutato da Plinio appena 5 assi alla libbra. È da supporre che nei vasi venissero vendute le qualità più scadenti e che invece a blocchetti o pile venivano vendute quelle più preziose. Per quanto una fabbrica cumana di blu egizio sia plausibile essa va ancora definita nel suo spazio fisico e non è da escludere del tutto un monopolio di Pozzuoli e delle sue fabbriche, fra cui quella di Vestorio per il primo periodo imperiale²⁰.

1.2 Definizione di blu egizio

Dopo quanto detto, come possiamo però definire il blu egizio? Si tratta di un pigmento costoso che non è alterato dalla calce nella pittura su parete. Esso è modellato sotto forma di sfere blu o verdi chiamate *caerulea*. Si tratta di un prodotto artificiale: $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$, un disilicato calcosodico di rame. Per la fabbricazione, la ricetta teorica è la seguente: si mescola insieme la sabbia silicea, il carbonato di sodio, il carbonato di calcio e il rame. Ottenendo così un cristallo quadratico di disilicato calcosodico di rame, circondato di vetro verde di silicato sodico. Il carbonato di calcio CaCO_3 abbassa il punto di fusione della miscela, consentendo al blu di cristallizzare meglio²¹. È inoltre possibile che la sperimentazione di questa tecnica di fusione di sabbia con materiali diversi (per esempio il natron, carbonato di sodio idrato) abbia portato in tempi successivi alla scoperta del vetro²².

Ancora oggi, tuttavia, non sappiamo esattamente come gli Egizi siano riusciti a sintetizzare tale pigmento, certo è che avessero una conoscenza avanzata della chimica e della metallurgia, poiché mescolare tutti gli ingredienti e trovare le temperature adatte non era semplice per quei tempi. Molto probabilmente erano due le vie utilizzate: mescolando la silice con il carbonato di calcio e la limatura di rame, oppure utilizzando dei minerali come la malachite ed infine una sostanza contenente sodio. Il sodio costituiva un elemento indispensabile poiché abbassava il punto di fusione della silice.

²⁰ Osanna, Rescigno, *Il blu egizio in età classica: fonti e testimonianze* in AA.VV., *Il blu egizio dall'antichità al Rinascimento*. In ricordo di Mario Torelli (25 febbraio 2021), Atti dei Convegni Lincei, Bardi Edizioni, Roma 2022.

²¹ Davidovits 2001

²² Zecchina 2012

Quest'ultima, infatti, aveva temperature di fusione altissime. Durante il riscaldamento, gli atomi di rame si diffondono nella struttura di silicato di alluminio, creando il colore blu caratteristico del pigmento.

1.3. L'uso del blu egizio dall'antichità ad oggi

Il blu gli egizi lo associano al culto dei morti: di blu sono infatti dipinte le suppellettili che compongono il corredo funerario, come gioielli – in particolare perle – che adornano le mummie, amuleti, figurine e statuette, tra cui gli *ushebtj*, che rispondono alla chiamata del titolare della tomba per servirlo giornalmente nella sua nuova vita. Spesso questi oggetti vengono ricoperti da una vernice che conferisce loro un aspetto vetroso e prezioso. Da tutte queste accortezze, si evince come il blu assuma una valenza simbolica legata alla protezione del defunto, cacciando le forze del male grazie al potere magico ritenuto insito nella sua natura.

Il blu egizio risulta essere il primo pigmento sintetico noto della storia e fin dall'Antico Regno esso è presente nei geroglifici dei testi funerari che accompagnano il defunto nella sua metamorfosi necessaria per l'accesso all'aldilà, dato che al blu in genere sono associate le proprietà rigeneratrici di norma attribuite al sole. Ma la sua sopravvivenza si estende ben oltre il declino della civiltà faraonica²³.

Fin dalle origini il blu egizio non viene utilizzato solo come colore ma anche per produrre piccoli oggetti: migliaia sono le testimonianze che provengono dal mondo antico di tale uso. Il blu egizio viene ad esempio impiegato per la realizzazione di tessere di mosaici (ottenuto spaccando le piccole pile, esito del processo di cottura). Questo impiego non è però così diffuso, preferendo invece – forse anche per ragioni di economicità – tingere di blu egizio tessere di diversa materia, ottenendo però lo stesso effetto cromatico.

Come colore, invece, non viene usato solo per dipingere su parete o tavola, ma anche su terracotta, in una pittura che dovremmo chiamare a calce, eseguita stendendo sul supporto ormai cotto un bagno di calce a cui si aggrappa il colore messo in opera a freddo (non sopportando esso le alte temperature dei forni per ceramica).

Come precedentemente detto, tuttavia, l'impiego del blu egizio continuò anche dopo il declino della civiltà faraonica, sorge quindi spontaneo chiedersi come proseguì l'uso e la

²³ Bellini 2023

diffusione di questo pigmento nel bacino del Mediterraneo nei secoli dell'età classica. Venuta meno la rete di relazioni dell'Età del Bronzo – centrata sui Palazzi Micenei e sulle committenze palaziali – il blu egizio sembra sparire dalla collettività mediterranea per ricomparire poi, con evidenze chiare e frequenti, in età arcaica. Abbiamo detto “sembra” poiché molti indizi attestano già la presenza di un orizzonte più antico, per la precisione di VIII sec. a.C. (es. grumo di blu egizio dalla tb. 26/2005 dalla necropoli Lippi di Verrucchio²⁴; collana di perle in blu egizio da Cuma). Tutto questo rende manifesto che la circolazione non si è interrotta ma flette e segue le logiche della committenza: il blu egizio sparisce quando non è richiesto – per assenza di grandi cantieri e grandi committenti – e poi ricompare. Si può inoltre aggiungere che il blu egizio potrebbe essere stato più presente di quello pensiamo e non essere però oggi leggibile nei resti archeologici, solo perché adoperato su supporti fragili, non giunti fino a noi (es. tavole della pittura da cavalletto; pareti per la pittura a fresco in siti per lo più distrutti da eventi traumatici e repentini, come nel caso di Tera).

Il blu egizio non è un colore che può essere cotto e non rientra pertanto nella palette dei colori della ceramica e nemmeno tra i colori di base della prima pittura. Non un caso che esso ricompaia sulle pareti affrescate delle tombe etrusche, in un periodo in cui si amplia la tavolozza del pittore-decoratore. Siamo ormai nella seconda metà del VI sec. a.C. quando Mauro Cristofani spiegava l'ampliarsi delle possibilità cromatiche fino a comprendere anche il blu egiziano come riflesso della diaspora da Oriente verso Occidente dei maestri della Ionia, e dal versante orientale del mondo greco.

Il blu egizio comincia a comparire più frequentemente dal VI sec. a.C., a *Caere* – da alcune ciotole di bucchero provenienti dagli scavi di Vigna Parrocchiale – e in Etruria – come frammento grezzo da Gravisca. Di lì a poco, verso la fine del secolo, lo vedremo comparire anche in Magna Grecia e nella Grecia stessa. È però chiaro che esiste una storia invisibile – con cui dobbiamo fare i conti – di questo pigmento, poiché doveva essere utilizzato su stoffe e tavole di legno che quasi mai si conservano. Ciò lo sappiamo grazie a quei rarissimi documenti che ancora si sono conservati: è il caso delle tavole lignee, databili tra la fine del VI e l'inizio del V sec. a.C. venute alla luce nel Santuario in grotta

²⁴ Baraldi, Natalucci, Rossi 2017

dedicato alle ninfe a Pitsa. Si tratta di documenti straordinari perché rarissimi dato il loro supporto ligneo.

Dal VI sec. a.C. documentiamo con certezza l'impiego del blu egizio anche sulla terracotta, in particolare su quella utilizzata con funzione architettonica. Ancora una volta, e parallelamente per quanto avviene con le pitture funerarie, blu e verde compaiono presto su lastre dall'Etruria (es. da *Caere*), ovviamente come tinte aggiunte a freddo. In Magna Grecia il colore appare con un leggero ritardo ed è usato con molta parsimonia, quasi si potrebbe sospettare che – insieme ad un giallo – rientri tra le tinte aggiunte su rivestimenti già in opera, per rifinirli, o nel corso di operazioni di restauro.

Per poter vedere ampiamente utilizzato del blu egizio nelle terrecotte architettoniche dovremo aspettare l'Ellenismo, periodo nel quale la maggior parte dei colori è messa in opera a freddo, su mordente steso sulla terracotta a base di latte di calce.

Nella tecnica a fresco lo ritroviamo nel contesto straordinario della Tomba del Tuffatore a *Paestum* (inizio V sec. a.C.). Qui, in blu egizio sono realizzate le sfumature intense del colore, mentre i verdi sembrano ricavati da un colore naturale, a base di terre note a Verona, Cipro e Spagna. Diversamente, per il secolo successivo (nella fase lucana della città), il verde sembra – nei casi campionati – realizzato tramite una miscela che comprende di nuovo il blu egizio, anche se questo – puro – sembra poco presente nella palette di colori delle tombe pestane di età ellenistica.

In epoca classica il blu egizio ricorre, poggiato su di uno strato bianco di calce, come colore dei marmi. Lo troviamo ad esempio nel Partenone o, ancora, sui vasi attici in marmo e, ovviamente, ricorre nella pittura macedone (fino a diventare l'azzurro mediterraneo).

Come ampiamente osservato nella letteratura recente su manufatti che ne presentano traccia, il blu egizio risulta fluorescente nell'infrarosso se esposto a luce visibile a banda stretta (VIL). L'integrazione tra l'imaging VIL e le analisi spettroscopiche puntuali permette di riconoscere il blu egizio anche in piccoli grani, rendendolo tra i colori più facilmente identificabili, anche quando a occhio nudo la superficie non sembra conservarne traccia. A ben guardare la ricerca scientifica sul blu

alessandrino/pompeiano/puteolano²⁵ non è un fatto solo recente, essa è cominciata ben prima delle recentissime acquisizioni e il motivo dell'interesse per tale colore risiede nella presenza della ricetta nel testo di Vitruvio, che ha spinto fin dagli inizi dell'800 a ricrearlo in laboratorio per interpretare e spiegare le tante sfumature di azzurri restituiti dagli affreschi delle case pompeiane.

Esiste una grammatica non troppo serrata nell'utilizzo di questo colore: Aristotele asseriva che il *kyaneos* era il colore del cielo, in azzurro, in epoca classica, su rilievi e stele si coloravano i vuoti, un fondo astratto o la resa dell'atmosfera, il cielo e il mare²⁶. Il *kyaneos* ceruleo viene talvolta impiegato anche per suggerire i metalli, il ferro in modo particolare, e i tessuti – ricorrendo in particolare per la campitura delle vesti pesanti.

Esiste poi un utilizzo tecnico del blu egizio, come ingrediente per ottenere altri colori. È questo il caso di un economico finto porpora.

Il blu egizio viene inoltre utilizzato come fondo o coprente su colori più scuri, per attenuarne le tinte o per rafforzarne la profondità (per esempio nelle pieghe dei panneggi, aggiungendosi come colore principale).

Possiamo affermare che il blu egizio è uno strumento duttile, questo comporta anche che non sempre, quando si nota una certa fluorescenza, si tratta per forza di una campitura omogenea di blu egizio, potrebbe trattarsi semplicemente di un altro colore a cui era stato aggiunto del blu egizio per miscelarlo.

In epoca romana il blu egizio è ampiamente testimoniato a Pompei, negli affreschi ma anche in polveri, piccoli lingotti e palline conservate nei laboratori pompeiani ancora nei loro vasetti. Il colore puro è stato oggetto di numerosi interventi di analisi e il blu egizio pompeiano trova un esaustivo paragrafo nel volume dedicato ai colori pompeiani di Selim Augusti²⁷.

Cosa ne sarà del blu egizio dopo i fasti di epoca classica? Probabilmente più che la ricetta di Vitruvio, ciò che permette al blu artificiale di fare la sua comparsa sporadica ancora

²⁵ In passato ci si è riferiti al blu egizio con diversi termini

²⁶ Una ricerca condotta dal British Museum sui frammenti dei frontoni del Partenone: sulle onde marine, ai margini del frontone orientale, in corrispondenza della quadriga di Elios, il pigmento ha brillato in tutta la sua intensità nelle fotografie a luce indotta).

²⁷ Cfr. *I colori Pompeiani*, Selim Augusti, 1967

nel Medioevo e poi in età moderna, è il conservarsi di essa come pratica artigianale e il suo rarefarsi nel gioco delle committenze pubbliche mediterranee.

Quello che sembra di poter dire è che c'è stato un altro momento in cui il blu egizio è sembrato eclissarsi nella storia del Mediterraneo di epoca protostorica e classica ed è il momento del passaggio dal periodo miceneo al periodo arcaico, dove si è osservato che, in realtà, il colore non sparisce del tutto, sembra ancora resistere; quello che viene meno sono le grandi committenze che avevano sorretto la necessità della sua produzione in forme quasi industriali, che lo portano a comparire nei palazzi micenei e poi a scomparire. Probabilmente non a scomparire ma ad essere usato su altri *media* che non sono sopravvissuti. E quindi, forse, nella pratica di bottega – ma soprattutto nella pratica culturale – la ricetta non si era mai perduta.

Oltre ad immaginare che nel Medioevo – e soprattutto in epoca moderna – il colore si potesse recuperare tramite un fortunato rinvenimento di pile – come è successo oggi giorno nel foro di Cuma – o grattando il colore dalle pareti, bisogna prendere in considerazione anche la possibilità che siano sopravvissute in Oriente delle tracce (da ricercare nelle tradizioni locali) relative alla pratica di saper fare questo colore. Tale conoscenza è perciò probabile che ad un certo punto sia stata riportata in Occidente, dando vita ad una “riscoperta” del blu egizio²⁸.

1.3.1 Lo straordinario caso del blu egizio nella Galatea di Raffaello

Nuovo impulso allo studio del blu egizio è stato dato dalla scoperta della presenza di tale pigmento nel *Trionfo di Galatea* (1511-1512) di Raffaello. Analisi effettuate mediante la fluorescenza a raggi X hanno infatti evidenziato la presenza diffusa di blu egizio nell'opera: oltre che nel cielo e nel mare, esso è mescolato anche in tutte le parti bianche degli occhi il cui sguardo è rivolto verso l'osservatore, secondo un'usanza romana dell'età antica e imperiale. Quella di Raffaello non sarebbe dunque un'invenzione, ma la ripresa di una tecnica propria della ritrattistica e della statuaria classiche. Una ripresa che, da un lato, conferma l'interesse di Raffaello per l'antichità romana e, dall'altro, pone qualche interrogativo sul significato e sui modi della sopravvivenza del blu egizio nell'Europa

²⁸ Osanna, Rescigno, *Il blu egizio in età classica: fonti e testimonianze* in AA.VV., *Il blu egizio dall'antichità al Rinascimento*. In ricordo di Mario Torelli (25 febbraio 2021), Atti dei Convegni Lincei, Bardi Edizioni, Roma 2022.

rinascimentale, dato che la sua presenza si attesta in altri dipinti del periodo, nella fattispecie nella *Santa Margherita* dell'Ortolano (1524), nell'*Adorazione dei Magi* (anni '30 del '500) e nella *Sacra famiglia* (1520-1535) del Garofalo²⁹. Tuttavia, nella *Galatea* di Raffaello si palesa “la consapevolezza dell'uso di un materiale antico per un soggetto *antico*”, cioè mitologico e non religioso come nelle opere dei due ferraresi, “e la volontà di usarlo *all'antica*”³⁰. Come e perché Raffaello se lo sia procurato resta ancora tutto da chiarirsi³¹.

Ripercorrendo rapidamente il complesso itinerario del blu egizio, possiamo osservare come questo pigmento sia dapprima ampiamente utilizzato nella civiltà nilotica (di rilievo la nota testa di Nefertiti conservata al Museo Egizio di Berlino) e, in seguito, sia attestato in Mesopotamia e nella cultura materiale del Mediterraneo³² a partire dall'età del Bronzo Medio. Il suo impiego proseguirà costantemente fino al VII secolo d.C. circa, per poi scomparire nel corso del Medioevo e riemergere, infine, con Raffaello.

1.3.2 Impieghi odierni e futuri del blu egizio

La storia del blu egizio, tuttavia, non si ferma solo all'antichità o all'epoca moderna; nuovi e innovativi impieghi sono stati recentemente proposti per questo pigmento. Infatti, grazie alle nanotecnologie, il blu egizio potrebbe essere utilizzato per diversi scopi, quali ad esempio il rilevamento delle impronte digitali (si sono ottenute delle dispersioni nanometriche di blu egizio che, grazie alla loro luminescenza, hanno trovato applicazione nelle scienze forensi) o, ancora, potrebbe essere impiegato per la produzione di inchiostro a prova di falsificazione – da usarsi nelle banconote o per altri usi di sicurezza.

Infine, in campo medico, ci sono degli studi sul blu egizio come componente delle ceramiche usate per la produzione di ossa artificiali. In quest'ultimo caso viene sfruttata un'altra delle caratteristiche del pigmento, ovvero la sua proprietà di essere batteriostatico (grazie alla presenza di rame nella sua struttura chimica): tale caratteristica può essere

²⁹ Bellini 2023

³⁰ Anselmi et. al. *Il blu egizio nel Trionfo di Galatea di Raffaello*, in AA.VV., *Il blu egizio dall'antichità al Rinascimento*.

³¹ Di certo Raffaello non avrebbe potuto riprodurlo in proprio, essendo la ricetta vitruviana imprecisa e, peraltro, non conoscendo egli il latino ed essendo venuto in possesso di una traduzione in volgare dell'opera vitruviana solo dopo la *Galatea*; indagini sono in corso su ricettari medievali nei quali si menziona fra gli ingredienti il *vestorianum* (v. p. 6)

³² A Pompei, nella Tb. del Tuffatore a *Paestum* e, addirittura, nei marmi del Partenone (v. p. 10)

impiegata per aiutare a prevenire le infezioni batteriche³³. Queste proprietà antibatteriche possono essere utilizzate in campo medico, ad esempio per la produzione di materiale sanitario antimicrobico, è stato provato infatti che il pigmento può inibire la crescita di batteri come lo *Staphylococcus aureus* e l'*Escherichia coli*³⁴.

Gli antichi Egizi usavano questo pigmento per decorare e dipingere ma, con molta probabilità, i suoi usi futuri potrebbero essere ancora tanti e tutti da scoprire.

³³ Greco, *Il colore delle cose*, in AA.VV., *Il blu egizio dall'antichità al Rinascimento*. In ricordo di Mario Torelli (25 febbraio 2021), Atti dei Convegni Lincei, Bardi Edizioni, Roma 2022.

³⁴ <https://pilloledichimica.it/2023/05/02/blu-egizio-la-chimica-dietro-uno-dei-pigmenti-piu-affascinanti-della-storia/>

Capitolo 2

LE PROPRIETÀ SPETTROSCOPICHE DEL BLU EGIZIO E LE MODALITÀ DI INDAGINE ADOTTATE IN QUESTO STUDIO PER LA SUA IDENTIFICAZIONE

Lo studio di manufatti nel campo dei Beni Culturali è sempre stato impegnativo. Infatti, in generale le metodologie finalizzate allo studio di tali manufatti dovrebbero soddisfare diverse condizioni per evitare ogni possibile danneggiamento degli oggetti. Quando possibile, è preferibile indagare un manufatto utilizzando tecniche non invasive, ovvero che non comportino alcun campionamento, e che possano essere eseguite dove l'oggetto è conservato o esposto, quindi attraverso misure "in situ". Pertanto, vi è un crescente interesse per lo sviluppo e l'applicazione di tecniche analitiche in grado di soddisfare i requisiti sopra menzionati e fornire informazioni utili sullo stato di conservazione delle opere d'arte³⁵.

Ovviamente, non in tutti i casi è possibile ricorrere a tecniche che non comportino alcun tipo di campionamento. Spesso, infatti, è necessario effettuare dei prelievi – seppur minimi – di materiale per poter effettuare indagini più di dettaglio e ottenere maggiori informazioni. Questo non è però necessario per identificare la presenza certa del blu egizio che, grazie alle sue proprietà spettroscopiche, consente l'impiego di metodi di indagine non invasivi.

Il blu egizio presenta infatti una serie di caratteristiche che ne premettono una rapida identificazione, senza dover utilizzare metodi invasivi: mostra una struttura a nanofogli e può essere identificato grazie alla sua luminescenza indotta nel visibile e rilevabile nell'infrarosso. Tale pigmento ha infatti la capacità di assorbire la radiazione visibile e di riemettere la radiazione nell'infrarosso (IR), nella banda 800-1000 nm, con un picco a ca. 910 nm (luminescenza indotta dal visibile VIL). L'emissione del pigmento è così forte (la cuprorivaite è il più potente emettitore IR a livello molecolare attualmente noto) che la luminescenza può essere facilmente rilevata in un ambiente oscurato utilizzando una fotocamera digitale modificata con una certa sensibilità nella gamma IR³⁶. Questa rara proprietà permette di riconoscere la presenza di blu egizio anche su porzioni

³⁵ Es Sebar et. al. 2023

³⁶ Verri et al. 2010

estremamente ridotte di colore, fino ad arrivare a individuarlo anche in singole particelle – con l’ausilio, in questo caso, di una lente adeguata³⁷.

Uno studio più completo, non invasivo, di questa caratteristica, può essere garantito associando le misure VIL a *micro-imaging* e a valutazioni compositive, utili per approfondire gli studi sulle tecnologie di produzione e per fornire dati utili sulla possibile provenienza dei pigmenti e sulle rotte commerciali. Infatti il blu egiziano, ma anche l’Han Blue e l’Han purple (che presentano le stesse caratteristiche di luminescenza) furono utilizzati in un ampio arco temporale e in molteplici luoghi³⁸.

Di seguito verranno elencate ed analizzate le principali tecniche di indagine che si è deciso di adottare per questo studio sul blu egizio, andando a vedere quelli che sono i punti di forza e i punti deboli di ciascuna tecnica. Si è deciso di analizzare le diverse tecniche partendo da quella più generica, che fornisce un’immagine d’insieme (VIL), fino a giungere a quelle più puntuali (spettroscopia Raman e FORS), che consentono di individuare e caratterizzare con maggiore precisione i pigmenti.

2.1 VIL - *Visible Induced Luminescence*

La VIL è una tecnica di *Imaging* che consente di esaminare, in via preliminare, una superficie su cui si supponga la presenza di blu egizio, basandosi sulla luminescenza indotta dall’uso di una sorgente visibile per far diventare luminescenti³⁹, nell’infrarosso tra 900 nm e 1000 nm, le parti coperte da tale pigmento.

2.1.1 La luminescenza foto-indotta

Il blu egiziano può essere rilevato facilmente ed economicamente utilizzando la luminescenza indotta visibile (VIL). Il blu egiziano puro, o in miscela, mostra una notevole risposta luminescente nella regione del vicino infrarosso – intorno a 910 nm – se illuminato con luce visibile e appare di un colore bianco molto brillante. Le immagini IR sono in grado di rilevare la maggior parte delle tracce di blu egizio, altrimenti invisibili a occhio nudo. Il metodo è descritto così:

«La luminescenza è l’emissione di luce da parte di una sostanza, che avviene quando un elettrone ritorna allo stato elettronico fondamentale da uno stato

³⁷ Verri et al. 2010

³⁸ Masic, Nicola 2021

³⁹ Nicola, Musso, Petacchi 2015

eccitato e perde la sua energia in eccesso come fotone. Nella situazione specifica in cui l'eccitazione è causata da fotoni, il fenomeno è noto come luminescenza foto-indotta. La luminescenza NIR si concentra sulla risposta dei composti organici e inorganici quando eccitati nel campo del visibile. Questi includono il blu egiziano, che emette una forte luminescenza centrata intorno a 910 nm»⁴⁰.

La luminescenza foto-indotta rappresenta perciò un processo in cui un elettrone all'interno di una molecola assorbe la radiazione, provocando la transizione verso uno stato energetico elettronico più elevato. Quando l'elettrone nella molecola eccitata ritorna ad uno stato energetico inferiore, si verifica l'emissione di radiazione elettromagnetica a lunghezze d'onda maggiori. Le molecole che mostrano questa proprietà sono chiamate luminiferi. Il fenomeno della luminescenza comprende sempre una lunghezza d'onda di eccitazione ed una lunghezza d'onda di emissione. La fosforescenza⁴¹ è un processo che richiede periodi di tempo relativamente lunghi affinché l'elettrone ritorni a uno stato energetico inferiore, mentre la fluorescenza implica periodi di tempo più brevi.

Il termine luminescenza⁴² comprende entrambi questi fenomeni. Storicamente, il termine fluorescenza è stato prevalente, soprattutto nel campo dei beni culturali. Tuttavia, a meno che non siano disponibili informazioni sulla durata, la distinzione tra fluorescenza e fosforescenza non è possibile per le misurazioni in campo stazionario. In generale, poiché le durate sono molto brevi, la luminescenza foto-indotta con sorgenti di radiazioni convenzionali e dispositivi di registrazione è limitato alla registrazione dei processi

⁴⁰ Sather 2021

⁴¹ Da un punto di vista chimico-fisico, la fosforescenza è il risultato di processo nel quale la molecola in stato eccitato in seguito ad assorbimento di radiazione (stato di *singoleto eccitato*) non decade immediatamente allo stato fondamentale, ma si converte ad uno stato eccitato, cosiddetto di *tripletto*, ad energia leggermente inferiore. Il decadimento allo stato fondamentale (che è sempre di *singoleto*), con emissione di radiazione, richiede il cambiamento da *tripletto* a *singoleto*, processo molto improbabile, che rende quindi lento il decadimento radiativo.

⁴² Nel caso della luminescenza l'eccitazione avviene a livello molecolare, mentre nel caso della fluorescenza a raggi X avviene a livello atomico. Le lunghezze d'onda di eccitazione più comuni per la luminescenza foto-indotta sono nella gamma UV e visibile, mentre la gamma di emissione è solitamente nell'ultravioletto (370-400 nm), visibile (400-700 nm) o vicino infrarosso (700-1000 nm). Questi intervalli sono decisi dalla disponibilità dei dispositivi di registrazione, che normalmente hanno una sensibilità compresa tra 350 e 1000 nm. Altri rilevatori disponibili in commercio sono sensibili fino a 2500 nm; questo intervallo può essere utile per la rilevazione di alcuni materiali, come il blu di manganese, che emette a circa 1200 nm (Accorsi et al. 2014).

stazionari, cioè dell'emissione media dopo l'eccitazione con una sorgente di radiazioni continua⁴³.

Più in generale, di tutti i processi di luminescenza foto-indotta, quella indotta da raggi ultravioletti (UVL – *ultraviolet-induced luminescence*) è quella più comunemente utilizzata nel campo dei beni culturali, poiché sia i composti inorganici sia quelli organici possono mostrare proprietà di luminescenza distinte. Tali proprietà sono fenomeni comunemente sfruttati nell'analisi di opere d'arte di varia tipologia, principalmente allo scopo di:

- caratterizzare spazialmente la distribuzione dei materiali luminescenti organici e inorganici (leganti, pigmenti, coloranti ecc.);
- differenziare materiali con proprietà ottiche simili ma diversa composizione chimica (ritocchi, presenza di rivestimenti, vernici, materiali aggiunti ecc.);
- caratterizzare/valutare lo stato dei manufatti (biodeterioramento, presenza di Sali ecc.)⁴⁴.

La conservazione di molti tipi di oggetti, come dipinti, pitture murali, ceramica, vetro, tessuti, legno, carta e pietra beneficia dell'analisi della luminescenza. La luminescenza viene studiata e interpretata mediante: esame con sorgente luminosa, *imaging* e spettroscopia.

Sulla base delle informazioni raccolte, all'*imaging* segue normalmente l'identificazione di punti/zone di interesse, che possono essere ulteriormente studiati con tecniche di indagine non invasiva, come la spettroscopia di luminescenza, l'infrarosso a trasformata di Fourier in riflettanza o la spettroscopia Raman, solo per citare alcune delle tecniche disponibili. Una volta effettuata la mappatura e l'analisi dei punti, è possibile identificare le aree di campionamento per indagini invasive, non distruttive (ad esempio Raman, dispersioni, sezioni trasversali ecc.) e indagini distruttive (ad esempio gascromatografia-spettrometria di massa, cromatografia liquida ad alta prestazione ecc.)⁴⁵.

⁴³ Verri 2020

⁴⁴ Verri 2020

⁴⁵ Verri 2020

2.1.2 Esame visivo della luminescenza

Sebbene l'analisi visiva del colore e dell'intensità della luminescenza rappresenti una fase cruciale in una sequenza di esami, l'utilità dell'esame visivo è limitata all'intensità di emissione nella regione del visibile, quindi valida solo per la fluorescenza UV, ma non per la VIL. Inoltre, l'interpretazione visiva della luminescenza si basa sulla percezione e sull'esperienza dell'esaminatore, risultando quindi soggettiva e complessa da replicare. Le emissioni deboli o al di fuori della gamma visibile possono quindi essere registrate con l'ausilio di strumenti relativamente semplici, come ad esempio una fotocamera modificata che consenta di scattare nell'IR. È importante notare che l'analisi visiva resta fondamentale, poiché contribuisce a orientare le scelte riguardo alla successiva registrazione degli specifici comportamenti luminescenti attraverso tecniche di *imaging*.

2.1.3 *Imaging* della luminescenza indotta da luce visibile

L'*imaging* a luminescenza foto-indotta si riferisce all'acquisizione di immagini con una fotocamera RGB, modificata, dotata di un sensore a base di silicio, sensibile tra circa 300 nm e 1000 nm. Le normali fotocamere commerciali sono dotate di un filtro interno che blocca sia le radiazioni UV che IR, consentendo così di registrare solo la luce visibile⁴⁶. Se il filtro interno UV-IR viene rimosso, è possibile utilizzare l'intera sensibilità della fotocamera (300-1000 nm), per questo si parla di fotocamere modificate o Full Range.

L'esatta definizione dell'intervallo di interesse, dopo la modifica della fotocamera, avviene mediante l'utilizzo di filtri a banda larga normalmente posizionati davanti all'obiettivo e comprendente i seguenti intervalli: 300–400 nm (UV), R, G, B (VIS) e 700–1000 nm (IR), quest'ultimo divisibile in ulteriori bande⁴⁷.

2.1.4 Strumentazione

Per effettuare l'*imaging* della luminescenza indotta da luce visibile è necessario l'impiego di una sorgente luminosa nel visibile e di una fotocamera reflex modificata sul cui obiettivo sia montato un idoneo filtro IR.

La sorgente luminosa

Una sorgente luminosa, se puntata su un oggetto, eccita l'emissione di radiazioni da parte di composti luminescenti nel o sull'oggetto. Le fonti di radiazione disponibili in

⁴⁶ Verri 2020

⁴⁷ Dyer, Sotiropoulou 2017

commercio sono molteplici⁴⁸ e queste vengono selezionate di volta in volta sulla base delle specifiche esigenze/tipo di indagine.

L'illuminazione deve essere uniforme e devono essere impediti le riflessioni dirette della radiazione IR verso la fotocamera.

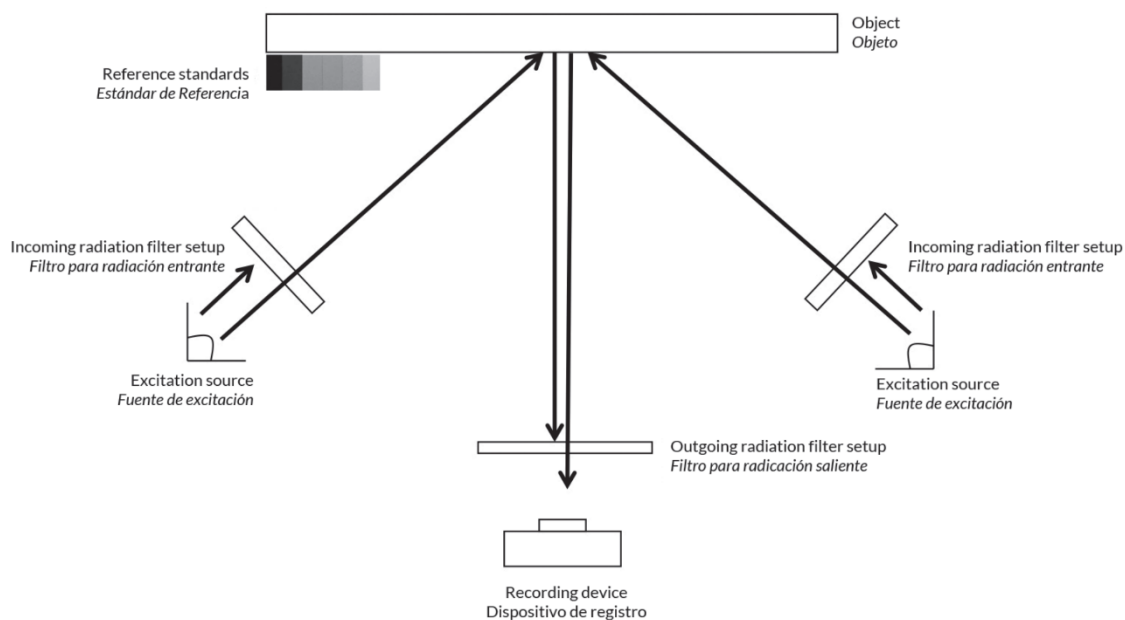


Fig. 1: Schema dell'installazione per le acquisizioni multispettrali, in cui le fonti di radiazione si trovano a 45° rispetto alla posizione dell'oggetto e vengono filtrate per selezionare il range di eccitazione desiderato. Gli standard di riferimento consentono di determinare le proprietà spettrali della radiazione incidente. Una telecamera registra la luminescenza dell'oggetto; l'intervallo registrato viene selezionato tramite filtri. (Verri 2020, p. 12)

Imprescindibile quando si lavora con l'imaging multispettrale è anche una comprensione approfondita delle proprietà della sorgente di radiazione, poiché i materiali nel campo dei beni culturali sono in generale altamente eterogenei e potrebbe quindi essere presente più di un luminifero. Ciò significa che lo stesso oggetto può apparire diverso, per esempio nel range UV, se eccitato a 303 nm o 365 nm, o con una banda di lunghezze d'onda di eccitazione più ampia o più stretta. Pertanto, è necessario utilizzare dei filtri (fig. 3) per “pulire” l'emissione⁴⁹.

L'oggetto

Gli standard di riferimento di luminescenza/riflettanza, quando si lavora nel multispettrale, vengono posizionati vicino all'oggetto da indagare. Lo scopo di questi

⁴⁸ Dyer, Sotiropoulou 2017

⁴⁹ Verri 2020

standard è determinare le proprietà spettrali della radiazione in arrivo e aiutare nell'interpretazione dell'emissione spettrale dell'oggetto. In particolare, uno standard non luminescente che riflette il 99% della radiazione incidente è uno strumento essenziale per verificare la quantità di radiazione indesiderata. Per esempio, in condizioni di acquisizione ideali, ovvero in un ambiente completamente oscurato e con una sorgente di radiazioni ideale che emette solo radiazioni UV, questo standard dovrebbe apparire nero anche durante l'irraggiamento⁵⁰.

Il dispositivo di registrazione

Le immagini vengono catturate con un dispositivo di registrazione, solitamente una fotocamera digitale reflex (DSLR) a obiettivo singolo, modificata (FULL RANGE) sensibile tra ca. 300-1000 nm (fig. 2). La radiazione in uscita, ovvero la radiazione emessa dall'oggetto, una volta illuminato, verso il dispositivo di registrazione, viene filtrata mediante un filtro di emissione, il cui scopo è quello di lasciar passare solo la radiazione di interesse emessa dall'oggetto e di garantire che il campo di emissione sia diverso da quello di eccitazione⁵¹.



Fig. 2: Esempio di fotocamera Full Range utilizzabile per le acquisizioni: Nikon D800 FR. Fotocamera reflex digitale a obiettivo singolo (DSLR) con attacco F per obiettivo intercambiabile; Dimensione del sensore Full Frame 35,9 × 23,9 mm; 46 megapixel (8256 × 5504 pixels); Full Range modificato: sensibilità tra 340 to 1100 nanometri (www.profilocolore.com)

⁵⁰ Verri 2020

⁵¹ Verri 2020

La maggior parte delle applicazioni nei beni culturali riguardano le emissioni nella gamma del visibile (400-700 nm), in alcuni casi tuttavia possono estendersi alla gamma IR (700-1700 nm)⁵², come nel caso dei pigmenti di blu egizio (Verri et al. 2010), cadmio (Thoury et al. 2011) e blu manganese (Accorsi et al. 2014).



Fig. 3: Filtri taglia banda che possono essere posti davanti all'obiettivo, in modo da scattare fotografie selezionando una ben precisa zona dello spettro.



Fig. 4: Esempio di *imaging* VIL. Sopra: immagine in luce visibile riflessa del campione n° 2526. Sotto: immagine VIL corrispondente, che mostra la presenza di blu egiziano nel copricapo e nei geroglifici. Lo standard blu egiziano è mostrato nella parte inferiore delle immagini (manufatti egiziani presso il Museo Egizio di Torino)

⁵² Verri 2020

2.2 Spettroscopia Raman

Quando la luce interagisce con le molecole di un gas, di un liquido o di un solido, senza subire assorbimento, la maggior parte dei fotoni viene dispersa o diffusa mantenendo la stessa energia dei fotoni incidenti. Questo fenomeno è denominato diffusione elastica o diffusione di Rayleigh. Una quantità molto piccola di questi fotoni, circa 1 fotone su 10 milioni, dopo la diffusione ha una frequenza diversa da quella del fotone incidente. Questo processo è denominato diffusione anelastica o effetto Raman, dal nome di Sir. Chandrashekhara Venkata Râman⁵³.

L'effetto Raman si basa sull'interazione della radiazione con la struttura atomica o molecolare di un campione. A causa delle vibrazioni nei legami chimici, l'interazione con i fotoni provoca specifici spostamenti di energia nella luce retrodiffusa che appaiono in uno spettro Raman. Lo spettro Raman è unico per ogni composizione chimica e può fornire informazioni qualitative e quantitative del materiale⁵⁴.

2.2.1 Le principali caratteristiche della Spettroscopia Raman

Negli ultimi dieci anni la spettroscopia Raman è stata sempre più applicata per l'analisi di oggetti artistici ed archeologici. Essa ha infatti un'innumerabile serie di vantaggi che la portano ad essere ampiamente utilizzata nel campo dei beni culturali, spesso associata con altre tecniche di indagine quali ad esempio FORS, XRF e VIL. Nel dettaglio⁵⁵:

- fornisce un'"impronta digitale" chimica dei composti studiati;
- è non distruttiva e non invasiva;
- richiede una preparazione minima, se non nulla, del campione;
- può essere utilizzata *in situ* grazie all'impiego di microsonde Raman
- è insensibile all'acqua;
- può essere utilizzata per l'*imaging*
- è ideale per la caratterizzazione dei pigmenti (organici e inorganici)

2.2.2 Le basi della Spettroscopia Raman

Il fenomeno della diffusione Raman implica l'interazione dei fotoni con una molecola, interazione che può provocare l'eccitazione della molecola stessa a un livello energetico

⁵³ Caggiani, Colombari 2018

⁵⁴ <https://raman.oxinst.com/techniques/raman-imaging>

⁵⁵ <https://raman.oxinst.com/techniques/raman-imaging>

virtuale superiore. Una volta che la molecola raggiunge questo livello energetico superiore, possono verificarsi diverse cose. Una prima possibilità è che la molecola ritorni a un livello energetico vibrazionale diverso da quello iniziale, generando un fotone con un'energia differente. La differenza tra l'energia del fotone incidente e l'energia del fotone diffuso è denominata *Raman shift* (o spostamento Raman). Quando l'energia del fotone diffuso è minore di quella del fotone incidente, il fenomeno prende il nome di diffusione Stokes. Alcune molecole, invece, possono trovarsi in uno stato vibrazionale eccitato e, dopo essere salite a un livello energetico virtuale superiore, possono ricadere in un livello energetico finale inferiore a quello corrispondente allo stato eccitato iniziale, dando origine alla diffusione anti-Stokes (vedi fig. 5)⁵⁶.

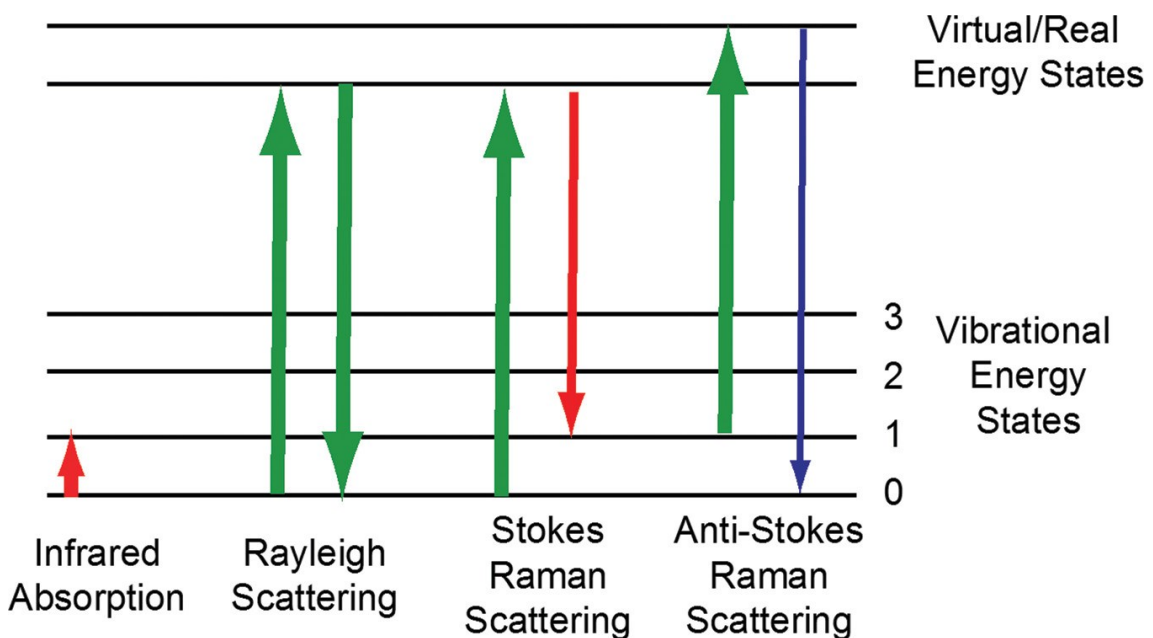


Fig. 5: Diagramma del livello energetico che mostra gli stati coinvolti nella spettroscopia Raman e i diversi tipi di diffusione. Il processo coinvolto nella spettroscopia infrarossa viene mostrato a titolo di confronto (Hamann e Sonntag 2018)

Affinché l'effetto Raman si esprima per una molecola, quella molecola deve subire un cambiamento, durante il movimento vibrazionale, nel dipolo elettrico indotto dalla radiazione per effetto della polarizzabilità della molecola^{57,58}. L'intensità dello *scattering* Raman è proporzionale all'entità della polarizzabilità della molecola e all'intensità della

⁵⁶ Hamann e Sonntag 2018

⁵⁷ tendenza di una distribuzione di carica elettrica a modificare la sua posizione originaria per l'effetto di un campo elettrico esterno. Tale fenomeno genera un momento di dipolo elettrico.

⁵⁸ sistema composto da due cariche elettriche uguali e di segno opposto e separate da una distanza costante nel tempo

radiazione che induce il dipolo elettrico. In un esperimento Raman di base, la luce monocromatica illumina e interagisce con le molecole di un campione; la luce viene diffusa da una molecola e la luce diffusa anelasticamente viene utilizzata per costruire lo spettro Raman, tracciato come intensità rispetto allo spostamento di frequenza. Questa luce anelastica costituisce una piccola frazione ($\sim 1 \times 10^{-7}$) della luce totale ma fornisce utili informazioni chimiche e strutturali. La diffusione di Rayleigh (luce diffusa elasticamente) è circa 1000 volte più intensa della luce diffusa anelasticamente e deve essere filtrata prima di raggiungere il rivelatore⁵⁹.

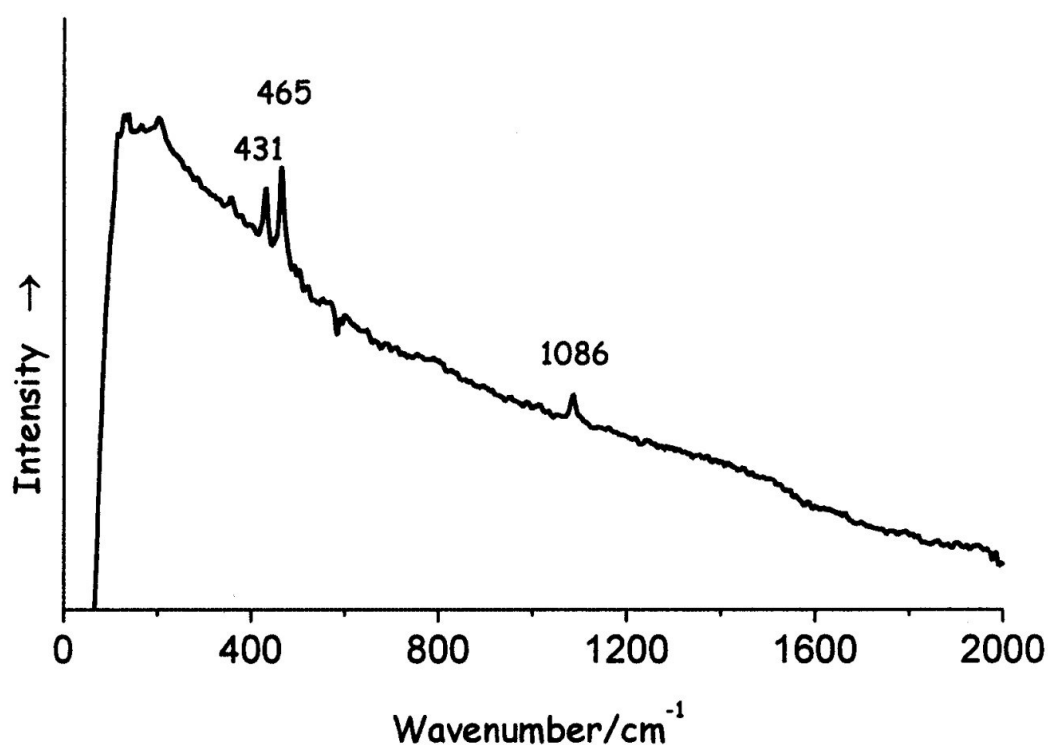


Fig. 6: Esempio di uno spettro Raman, nello specifico relativo al blu egizio. $\lambda_0 = 1064 \text{ nm}$, 3mW

La comprensione di uno spettro Raman richiede l'identificazione dell'unità vibrazionale e della sua simmetria. Uno spettro Raman mostra un'impronta di picco simmetrica rispetto al segnale di scattering elastico (Rayleigh), situata alla stessa lunghezza d'onda/energia del laser. L'intensità dei picchi anti-Stokes diminuisce molto rapidamente man mano che aumenta la distanza dal picco di Rayleigh. Gli spettri Raman sono generalmente espressi

⁵⁹ Hamann e Sonntag 2018

in cm^{-1} , ma possono essere utilizzate anche unità THz (Terahertz) o meV (millielectronvolt) ⁶⁰.

2.2.3 Strumentazione

Gli strumenti per spettroscopia Raman moderni sono piuttosto compatti e costituiti da una serie di componenti fondamentali⁶¹:

- **Laser:** utilizzato come sorgente di eccitazione per provocare la diffusione Raman. Solitamente, si utilizzano laser a diodo o al Nd:YAG⁶², per generare la luce che viene successivamente dispersa nel campione.
- **Monocromatore:** utilizzato per separare la luce dispersa in base alla frequenza (o lunghezza d'onda). Questo permette di ottenere uno spettro Raman che mostra le frequenze di dispersione della luce nel campione.
- **Ottica di Campionamento:** una serie di lenti e specchi che concentrano la luce sul campione e raccolgono la luce dispersa per il rilevamento.
- **Supporto per il Campione:** un dispositivo che tiene il campione in posizione durante l'analisi. Può essere una lamella, una soluzione liquida, o un qualsiasi altro substrato adatto al tipo di campione.
- **Sistema di Rilevamento:** questo sistema cattura la luce dispersa e ne misura l'intensità. I rivelatori comuni includono i fotomoltiplicatori o i sensori CCD.
- **Software di Analisi Dati:** dopo l'acquisizione, è necessario un software specializzato per analizzare gli spettri Raman e interpretare i dati.
- **Campione:** materiale che si desidera analizzare. Può essere solido, liquido o gassoso.

Nei moderni strumenti per spettroscopia Raman si tendono ad utilizzare laser a stato solido, le cui lunghezze d'onda più frequenti sono 532 nm, 785 nm, 830 nm e 1064 nm. I laser con lunghezze d'onda inferiori hanno sezioni d'urto maggiori per la diffusione Raman (dando quindi luogo a segnali più elevati), tuttavia utilizzando lunghezze d'onda inferiori aumenta anche l'insorgenza della fluorescenza. Per questo motivo molti sistemi per spettroscopia Raman utilizzano laser a 785 nm. Per eliminare la diffusione Rayleigh

⁶⁰ Caggiani, Colomban 2018

⁶¹ Colomban 2018

⁶² Il laser Nd:YAG è un tipo di laser che utilizza il cristallo di ittrio-alluminio-granato (YAG) come mezzo attivo, e il neodimio (Nd) come dopante.

e anti-Stokes si utilizza generalmente un filtro edge o un filtro elimina banda (notch). La luce restante, che ha subito diffusione Stokes, viene fatta passare attraverso un elemento di dispersione, di solito un reticolo olografico (monocromatore). Successivamente un rivelatore CCD (ad accoppiamento di carica) cattura quindi la radiazione dispersa, producendo lo spettro dello *scattering* Raman. Poiché la diffusione Raman fornisce un segnale debole, è fondamentale che i componenti dello spettrometro Raman siano di qualità elevata e ben combinati tra loro dal punto di vista dell'ottica⁶³.

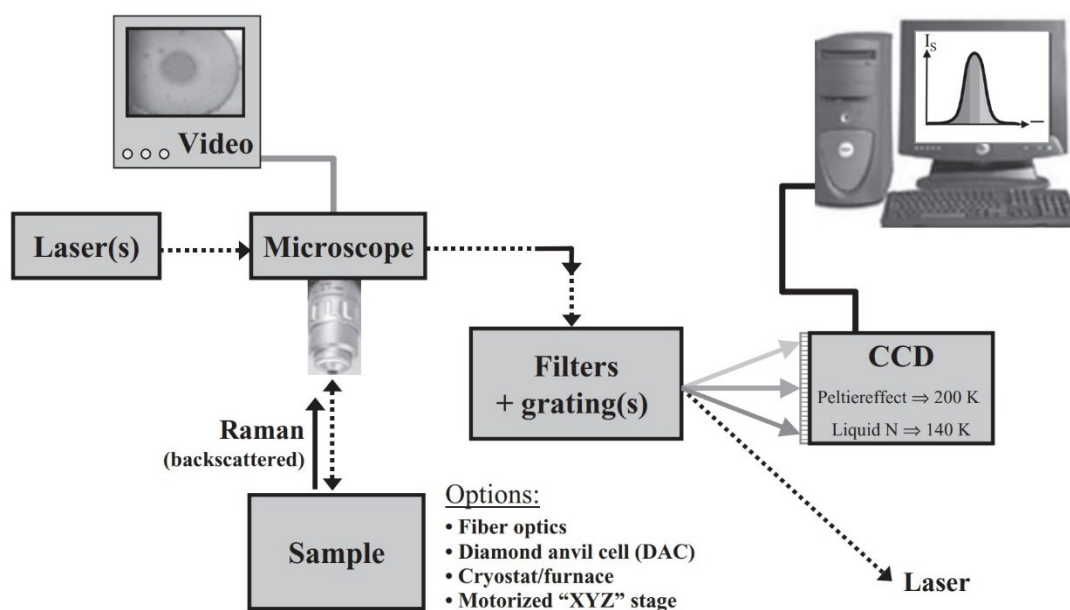


Fig. 7: Principio di uno spettrometro micro-Raman convenzionale (Colomban 2008)

Il laser

L'intensità dello *scattering* Raman dipende dalla lunghezza d'onda del laser, dall'intensità del laser e dall'efficienza del rivelatore. La lunghezza d'onda del laser blu è quella più appropriata per ottenere uno spettro intenso con un basso potere illuminante (le ottiche, le sorgenti laser e il CCD perdono la loro efficienza nella gamma UV)⁶⁴. Il segnale Raman è invece molto debole con il laser rosso e ancora più debole con quello IR⁶⁵. Tuttavia, le eccitazioni rosse, o addirittura NIR, possono essere quelle più appropriate per evitare che il segnale Raman venga coperto da quello di fluorescenza⁶⁶. Infatti, le transizioni tra livelli elettronici portano all'emissione di fluorescenza, un fenomeno piuttosto lento (10^{-10} s)

⁶³ Colomban 2018

⁶⁴ Colomban 2018

⁶⁵ Caggiani, Colomban 2018

⁶⁶ Colomban 2018

nella scala dei tempi dello scattering Raman, ma molto più forte e con ampia banda spettrale, che può coprire totalmente lo spettro Raman.

Si può dunque affermare che l'opzione migliore sia quella di avere a disposizione diversi laser eccitatori. Ad esempio, è stato dimostrato nello studio dei dipinti che solo la combinazione di diverse eccitazioni laser fornisce una visione completa degli ingredienti utilizzati da un artista in un dipinto. Per lo studio dei materiali inorganici, invece, sono da preferire i laser blu o viola e per quelli organici il vicino infrarosso (NIR).

Lo spettrometro

Oggi c'è una grande scelta di strumenti Raman, di seguito si elencano i principali⁶⁷:

- Strumenti da banco, solitamente dotati di due laser o più (sorgenti da UV – 255-325 nm – a NIR – 785 nm – e raramente da 1.064 nm)⁶⁸. Una testa remota può essere collegata tramite fibre ottiche per facilitare l'analisi di manufatti troppo grandi per essere sottoposti ad un microscopio verticale standard, benché di norma si preferiscano evitare le fibre ottiche, che riducono l'intensità del segnale e introducono artefatti; in rari casi, lo strumento è accoppiato con un microscopio orizzontale, ad esempio per studiare le superfici verticali di una scultura.

Le prestazioni di tali strumenti possono essere molto buone: superficie piatta, alta risoluzione ($\sim 0,5 \text{ cm}^{-1}$), accesso a basse lunghezze d'onda ($10\text{--}100 \text{ cm}^{-1}$) e alta sensibilità. Il rilevatore CCD viene raffreddato a $\sim 200 \text{ K}$ o a 80 K per massimizzare la rilevazione. L'efficienza dei rilevatori non è costante su tutta la finestra spettrale, soprattutto per l'eccitazione NIR, che richiede correzioni o limita il range di lavoro.

Alcuni di questi strumenti possono essere spostati da un luogo all'altro e la regolazione/affidabilità è controllata dal computer.

- Strumentazioni Raman mobili: costituite da una sorgente laser (in genere 532 o 785 nm) collegata tramite fibre ottiche (fino a 30 m) ad una testa remota e allo spettrometro. Il CCD viene raffreddato a 200 K . Generalmente questi strumenti non lavorano al di sopra dei 3.200 cm^{-1} e la risoluzione è media ($\sim 5 \text{ cm}^{-1}$). È

⁶⁷ Caggiani, Colomban 2018

⁶⁸ Colomban 2018

disponibile un'ampia gamma di ottiche ed è sufficiente un laptop per visualizzare e gestire lo strumento.

- Strumenti portatili: possono avere laser da 532, 785 o 1.024 nm; la bassa risoluzione ($\sim 10 \text{ cm}^{-1}$) e l'incertezza del fondo ostacolano la rilevazione/misurazione delle bande larghe. È possibile solo l'impiego di un'ottica a basso ingrandimento (e fissa). La visualizzazione su un grande schermo ed il trattamento dei dati spesso non sono possibili o, quantomeno, non sono facili.

L'ottica di campionamento

Spesso la qualità dell'ottica viene trascurata, fatto che porta, il più delle volte, alla scelta di obiettivi microscopici standard. L'elevata efficienza del CCD porta a favorire la chiusura del cosiddetto foro confocale – che è posto simmetricamente al punto focale rispetto alla lente dell'obiettivo – per diminuire la dimensione dello spot laser focalizzato⁶⁹.

Gli obiettivi del microscopio che lavorano nel campo del visibile sono ottimizzati per fornire una migliore risoluzione nel piano x-y rispetto all'asse z. Il diaframma confocale diminuisce questa anisotropia ma porta anche ad una notevole riduzione dell'intensità del segnale. Inoltre, se vengono utilizzate fibre ottiche, il diametro del nucleo della fibra determina la confocalità⁷⁰.

La scelta di obiettivi di alta qualità e ad alto ingrandimento è molto vantaggiosa poiché amplia il volume analizzato nel mezzo dielettrico. La profondità di penetrazione dipende dal coefficiente di assorbimento: per le sostanze nere e colorate la profondità di penetrazione può essere inferiore al micron o anche a qualche decimo di nanometro⁷¹.

Un altro parametro molto importante è la distanza di lavoro, ovvero la distanza tra la lente frontale e il punto di messa a fuoco. Gli obiettivi del microscopio standard hanno una distanza di lavoro breve per massimizzare il volume angolare di raccolta della luce (o in altre parole l'apertura numerica). In tal caso, la distanza tra campione e lente può essere inferiore a 1 mm per un obiettivo del microscopio 100X. Ciò è sufficiente per analizzare un'area di campione molto piatta ma non per studiare un oggetto dalla forma complessa.

⁶⁹ Caggiani, Colomban 2018

⁷⁰ Colomban 2018

⁷¹ Caggiani, Colomban 2018

In tal caso sono necessari obiettivi con una lunga distanza di lavoro. Aumentare la distanza di lavoro implica però allargare le lenti e, quindi, aumentare drasticamente il costo dell'obiettivo⁷². Quando il sistema Raman non può essere protetto dalla luce ambientale, l'efficienza ottica diventa molto importante e un'apertura numerica bassa risulta essere un vantaggio. Tuttavia, per rendere efficiente la raccolta della luce diffusa, la superficie analizzata dovrebbe essere perfettamente perpendicolare all'asse ottico⁷³.

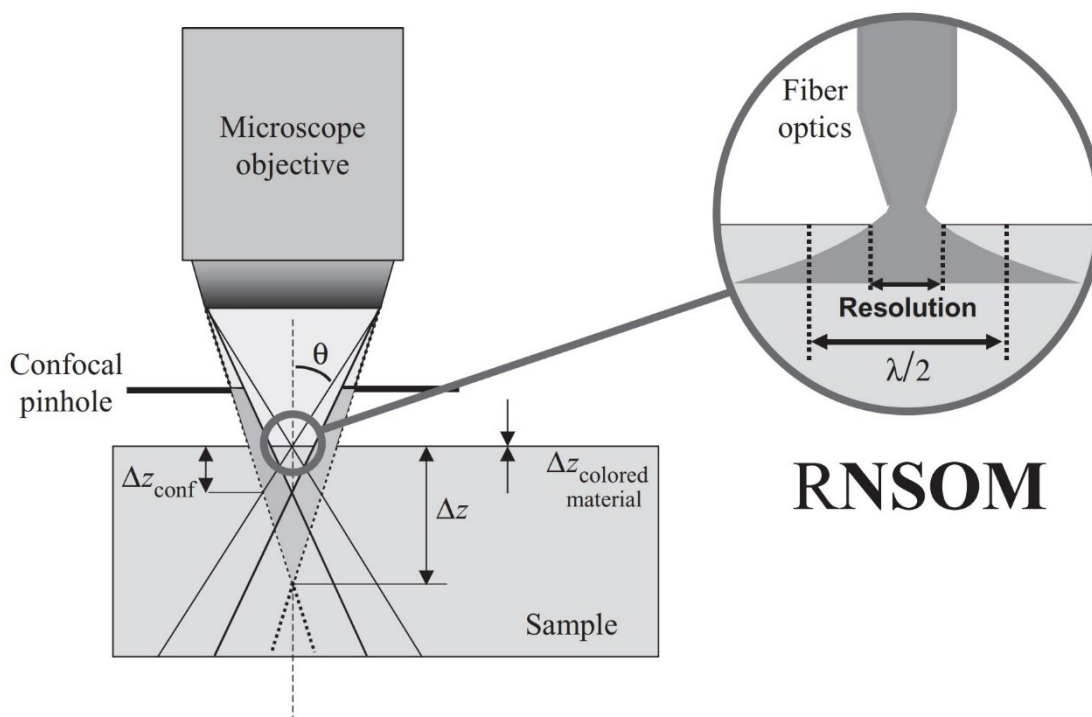


Fig. 8: Osservazione di un campione attraverso un microscopio Raman. Un foro confocale respinge la luce che è stata oscurata e facilita un'analisi più accurata in profondità ($\Delta z_{\text{conf}} < \Delta z$). L'immagine mostra un modo di eseguire la microscopia ottica a scansione Raman in campo prossimo (RNSOM) utilizzando l'estremità affusolata di una fibra ottica rivestita in metallo per la trasmissione della luce (Colomban 2008, p. 16)

Il supporto

L'ottica ad alto ingrandimento richiesta per le analisi sui beni culturali implica un'ottima stabilità del manufatto in esame e del laser. È possibile utilizzare un supporto o un piedistallo che, però, consentano spostamenti controllati al micron. L'esame può essere effettuato in orizzontale o in verticale, a seconda della forma e delle dimensioni del

⁷² tipicamente il costo di un obiettivo LWD da 20 mm è da 3 a 10 volte quello di un obiettivo standard 50X con una distanza di lavoro di 3 mm

⁷³ Colomban 2018

manufatto e del parere del curatore. Spesso si ricorre all'impiego di pezzi di acciaio per rendere il supporto più stabile.

In alcuni casi è poi necessario aggiungere della schiuma per proteggere il manufatto da eventuali cadute. Per alcuni manufatti, tra l'altro, sono necessari supporti speciali⁷⁴.

2.2.4 Librerie spettrali

L'identificazione dei materiali tramite spettroscopia Raman si basa spesso sul confronto dello spettro Raman della sostanza sconosciuta con una libreria spettrale di materiali di riferimento. Una delle prime librerie spettrali ad essere stata pubblicata è quella dell'University College di Londra, che fornisce una panoramica degli spettri Raman di 56 pigmenti inorganici simili a quelli usati prima del 1850⁷⁵.

Altre ampie librerie spettrali includono e-VISART e il progetto COLORAMAN. Sono poi disponibili diversi database on-line, come ad esempio quelli del LENS di Firenze e del Dipartimento di Scienze della Terra di Siena. Altri importanti database sono quelli del Californian Institute of Technology, dell'Ens a Lione, del progetto RRUFF in Arizona e dell'Istituto Nazionale di Scienza e Tecnologia Industriale Avanzata di Nagoya.⁷⁶

Le principali sfide nel confronto e nella fusione dei database spettrali Raman, provenienti da laboratori diversi, derivano dalle disparità spettrali, causate dalle diverse lunghezze d'onda del laser, dalle procedure di calibrazione adottate in tali laboratori – spesso non descritte in modo esaustivo –, e dalla difficoltà di confrontare dati espressi in formati diversi. Quest'ultima problematica è considerata uno dei principali ostacoli per la creazione di un database spettroscopico Raman unificato nel prossimo futuro, a parte la definizione di algoritmi ad alte prestazioni e di metodi di ricerca rapida⁷⁷.

2.3. FORS – Fiber Optics Reflectance Spectroscopy

La FORS, ovvero la spettroscopia di riflettanza in fibra ottica, è una tecnica che è stata ampiamente utilizzata negli ultimi decenni in campo artistico per determinare gli spettri di riflettanza dei materiali degli artisti, come pigmenti e leganti per vernici, utilizzati nei manoscritti o nei dipinti⁷⁸. Il vantaggio di questa tecnica spettroscopica, rispetto ad altre

⁷⁴ Colomban 2018

⁷⁵ Vandenabeele, Edwards, Moens 2007

⁷⁶ Vandenabeele, Edwards, Moens 2007

⁷⁷ Vandenabeele, Edwards, Moens 2007

⁷⁸ <https://doi.org/10.1080/19455224.2018.1463920>

come Raman e XRF, è legato all'elevata economicità delle sue componenti strumentali: una sorgente luminosa, uno spettrometro e due fibre ottiche (una per illuminare il campione, l'altra per raccogliere la luce riflessa). I costi, inoltre, sono ancora più contenuti se si decide di lavorare nello spettro visibile, includendo solo una piccola porzione del vicino infrarosso e del vicino ultravioletto (tra ca. 360 nm e 1000 nm). Ovviamente, se si deve lavorare nelle regioni spettrali UV-Vis-NIR esistono apparecchiature più sofisticate – e conseguentemente più costose – per raggiungere maggiore accuratezza, sensibilità e riproducibilità delle misure⁷⁹.

Da quanto testimoniato dalle fonti⁸⁰, la prima applicazione delle fibre ottiche per l'indagine di dipinti è stata effettuata alla National Gallery di Londra⁸¹ alla fine degli anni '70 e all'inizio degli anni '80. Questa applicazione faceva parte di un programma incentrato sul monitoraggio dei cambiamenti di colore indotti dalla luce. In generale, l'uso della FORS è proposto per l'identificazione di pigmenti, correlando lo spettro del campione a un database appropriato, per analizzare i cambiamenti di colore sui dipinti e per monitorare la presenza di prodotti di alterazione e lo stato di conservazione dei manufatti⁸².

Grazie alle sue dimensioni e al suo peso, l'apparecchiatura FORS può essere facilmente trasportata e utilizzata per raccogliere spettri *in situ*, offrendo così la possibilità di eseguire le analisi anche in situazioni scomode e difficili. È inoltre possibile registrare un gran numero di spettri, fatto che permette un trattamento statistico dei dati, utile per l'identificazione di differenti composti. Negli ultimi anni, l'apparecchiatura FORS è stata proposta anche nel vicino infrarosso per la rilevazione di prodotti di alterazione (ad esempio: gesso, ossalati di calcio) su affreschi, statue calcaree e monumenti⁸³.

2.3.1 Principi fisici alla base della FORS

Esposto ad illuminazione ogni oggetto manifesta specifiche proprietà di riflessione, assorbimento e trasmissione della luce. La riflettanza (ρ) indica la capacità di riflessione di un oggetto esposto alla luce ed è espressa come un parametro percentuale

⁷⁹ Cosentino 2014

⁸⁰ Piccolo et al. 2000

⁸¹ Bullock 1979

⁸² Piccolo et al. 2000

⁸³ Piccolo et. al 2000

adimensionale. La somma dei coefficienti di riflettanza (ρ), trasmissione (τ) e assorbimento (α) è costantemente pari a 1, ossia: $\alpha + \rho + \tau = 1$, relazione dimostrabile facilmente considerando la legge di conservazione dell'energia: una parte della energia incidente è riflessa, una parte è trasmessa, una parte è assorbita.

Ci sono due modelli utilizzabili per calcolare il flusso riflesso: il modello di riflessione diffondente, noto anche come modello Lambertiano, e il modello di riflessione speculare. Questi due modelli rappresentano degli estremi e, di conseguenza, sono in grado di approssimare accuratamente solo il comportamento di un numero limitato di oggetti. Per la maggior parte dei casi reali, la riflessione può essere considerata una via di mezzo tra questi due estremi.

La riflessione diffusa prevede che la luce, dopo aver colpito la superficie, rimbalzi su di essa e si diffonda in tutte le direzioni dello spazio. Si può quindi considerare la superficie come una sorgente luminosa secondaria di forma sferica. Questo comportamento è tipico dei materiali scabri e opachi⁸⁴.

La riflessione speculare, al contrario, prevede che il fascio luminoso colpisca la superficie di un corpo e venga riflesso in modo simmetrico rispetto alla normale alla superficie. Con questo modello si può approssimare bene il comportamento degli specchi, ad esempio le superfici lucide dei metalli. In generale il valore che assume la riflettanza per un particolare oggetto dipende essenzialmente dal colore e dalle caratteristiche della sua superficie⁸⁵.

La FORS si basa sull'analisi di spettri di riflettanza in cui l'intensità della radiazione retrodiffusa dalla superficie investigata è riportata in funzione della lunghezza d'onda della radiazione inviata sulla zona di misura. Il valore dell'intensità, riportato come percentuale di luce diffusa (riflessa) dalla superficie investigata, è rapportato a un bianco di riferimento, che si assume diffondente luce al 100% su tutto l'intervallo spettrale considerato. L'identificazione dei pigmenti avviene per comparazione con spettri di stesure pittoriche di riferimento⁸⁶.

⁸⁴ http://www.mat.unimi.it/users/alzati/Geometria_Computazionale_98-99/apps/illuminazione/theory.html

⁸⁵ http://www.mat.unimi.it/users/alzati/Geometria_Computazionale_98-99/apps/illuminazione/theory.html

⁸⁶ Beeby et al. 2018 (<https://doi.org/10.1080/19455224.2018.1463920>)

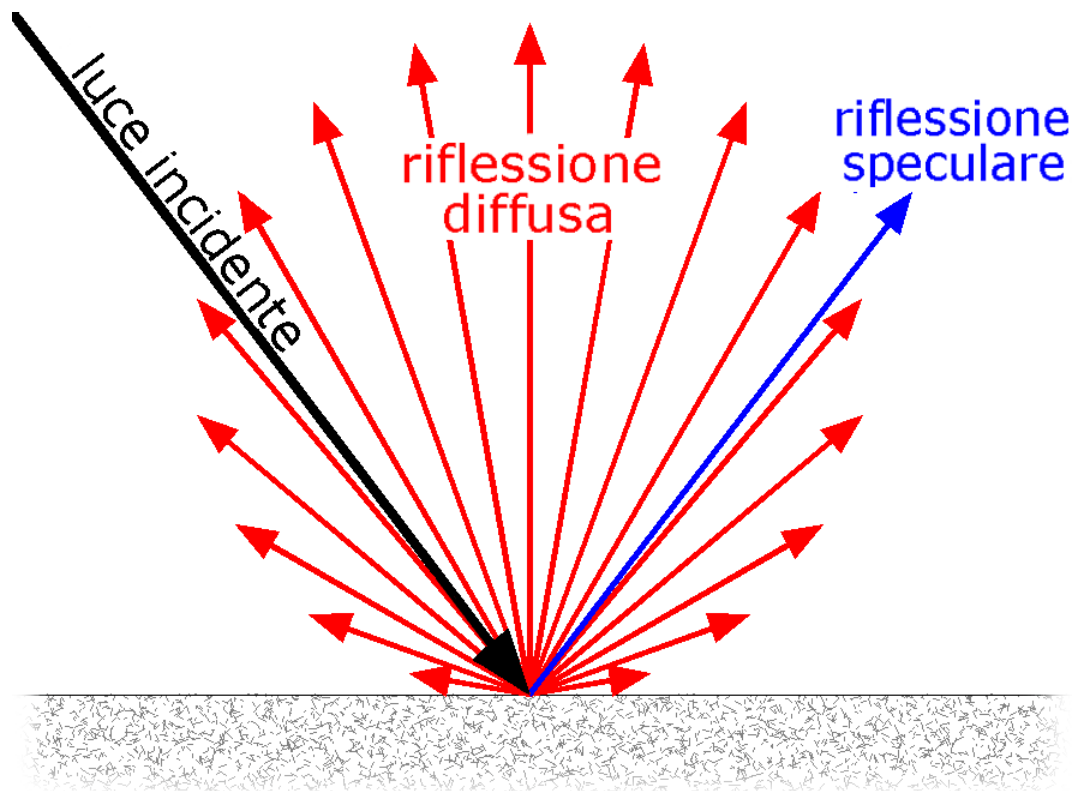


Fig. 9: Schema dei due possibili comportamenti della luce una volta che colpisce una superficie (riflessione diffusa o riflessione speculare)

2.3.2 Strumentazione

Il sistema FORS è composto da soli quattro elementi⁸⁷:

- la sorgente luminosa: emette radiazioni elettromagnetiche sulla superficie del campione.
- lo spettrometro: la luce riflessa viene raccolta dalla fibra ottica e inviata a uno spettrometro, che analizza la luce riflessa in base alla sua lunghezza d'onda, producendo uno spettro di riflettanza.
- la sonda: veicola la luce dalla sorgente luminosa al campione e raccoglie la luce riflessa per l'analisi spettroscopica.
- le fibre ottiche: utilizzate per trasportare la luce dalla sorgente al campione e per raccogliere la luce riflessa dal campione. Queste fibre sono spesso flessibili e consentono di raggiungere facilmente diverse aree del campione.

⁸⁷ Cosentino 2014

La sorgente luminosa

La sorgente luminosa nella FORS è fondamentale per generare la luce incidente sul campione, consentendo di ottenere spettri di riflettanza. La scelta della sorgente dipende dalle caratteristiche spettrali desiderate e dalla natura del materiale analizzato. Nel dettaglio la sorgente luminosa è responsabile di fornire la luce incidente sulla superficie del campione, essenziale per generare una risposta spettrale dal materiale che compone il campione.

La scelta della sorgente luminosa dipende poi dall'intervallo spettrale di interesse. Nella FORS, sono spesso utilizzati Vis e NIR per ottenere informazioni sulla composizione chimica del materiale. Nell'uso della FORS su materiali sensibili al calore, la sorgente luminosa è selezionata in modo da minimizzare il trasferimento di calore al campione durante l'illuminazione. Ciò è particolarmente importante per evitare danni ad oggetti artistici o a materiali delicati.

Le sorgenti luminose comunemente utilizzate includono lampade alogene, lampade a incandescenza, lampade ad alogenuri metallici e LED. La scelta dipende dai requisiti specifici dell'applicazione e dalle caratteristiche spettrali necessarie per l'analisi. In alcuni casi, è importante regolare l'intensità luminosa per adattarsi alle caratteristiche del campione e alle esigenze dell'analisi.



Fig. 10: Sorgente luminosa UV-Vis-NIR alogena al deuterio-tungsteno (<https://www.oceaninsight.com/>)

Lo spettrometro

Lo spettrometro svolge il compito di raccogliere i dati spettrali, i quali forniscono informazioni sulla composizione chimica dei materiali analizzati. La scelta dello spettrometro e la sua corretta configurazione sono essenziali per ottenere risultati accurati e affidabili durante le analisi spettrali.

Lo spettrometro è l'elemento chiave per rilevare lo spettro di riflettanza della luce riflessa dal campione: misura l'intensità della luce in funzione della lunghezza d'onda, creando uno spettro che rappresenta la risposta del materiale alla radiazione. Lo spettrometro consente di analizzare la luce riflessa in termini di lunghezze d'onda specifiche. Questa analisi spettrale fornisce informazioni sulla composizione chimica del materiale del campione, aiutando a identificare i componenti presenti⁸⁸.

A seconda dell'applicazione specifica, gli spettrometri possono essere configurati per operare in diverse regioni dello spettro elettromagnetico. Ad esempio, la FORS può essere eseguita nella luce visibile e nel vicino infrarosso.



Fig. 11: Spettrometro Vis-NIR (<https://www.oceaninsight.com/>)

⁸⁸ Bullock 1979

Lo spettrometro richiede calibrazioni accurate per assicurare la precisione delle misurazioni. Le calibrazioni possono essere eseguite utilizzando campioni di riferimento noti per correlare i valori di riflettanza a specifiche caratteristiche chimiche.⁸⁹

Spesso, lo spettrometro è gestito da un software specializzato che consente l'acquisizione, l'analisi e la rappresentazione grafica degli spettri ottenuti. Questo software semplifica il processo di interpretazione dei dati. Nella progettazione della strumentazione, si presta attenzione a minimizzare gli artefatti che potrebbero influenzare negativamente la qualità dei dati. Ad esempio, sono adottate soluzioni ottiche per ridurre i riflessi speculari o altre interferenze⁹⁰.

La sonda

La sonda nella FORS svolge una funzione chiave nel facilitare l'illuminazione del campione, nel raccogliere la luce riflessa e nel trasportare la luce attraverso le fibre ottiche per l'analisi spettroscopica. Un'accurata progettazione della sonda è essenziale per garantire risultati precisi e affidabili durante le analisi dei materiali, specialmente quando si tratta di opere d'arte o manufatti storici⁹¹.

La sonda trasporta la luce proveniente dalla sorgente luminosa e la indirizza verso la superficie del campione. Questa illuminazione è essenziale per ottenere una risposta spettrale dal materiale del campione. Dopo che la luce colpisce il campione, una parte di essa viene riflessa dalla superficie. La sonda ha il compito di raccogliere questa luce riflessa e di convogliarla attraverso le fibre ottiche verso lo strumento di analisi, tipicamente uno spettrometro. Le fibre ottiche integrate nella sonda trasportano la luce dalla sorgente al campione e dalla superficie del campione allo strumento di analisi. Queste fibre sono flessibili e possono essere posizionate in modo da raggiungere diverse parti del campione⁹².

⁸⁹ <https://www.treccani.it/enciclopedia/spettrometria/>

⁹⁰ Bullock 1979

⁹¹ Cosentino 2014

⁹² Bacci 1995

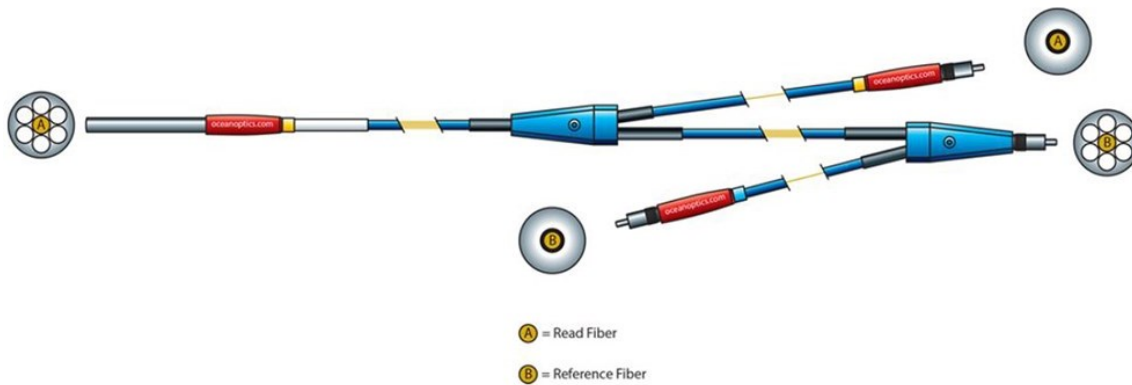


Fig. 12: Schema di assemblaggio e funzionamento di una sonda in fibra ottica (<https://www.oceaninsight.com/>)

Alcune sonde possono includere dispositivi di controllo per regolare le condizioni sperimentali. Ad esempio, possono essere progettate per variare l'angolo di incidenza della luce sulla superficie del campione. A seconda del design, alcune sonde possono essere progettate per minimizzare le interferenze, ad esempio riflessi speculari che potrebbero alterare la qualità dei dati ottenuti dalla riflettanza.

Le fibre ottiche

Queste ultime svolgono una funzione pratica, trasportando la luce proveniente dalla sorgente fino al campione e raccolgono la luce riflessa per permetterne l'analisi da parte dello spettrometro. L'utilizzo delle fibre presenta ulteriori vantaggi: trasportano al campione solo la luce prodotta della sorgente, evitando il trasferimento del calore, il quale, nel caso della lampada ad incandescenza utilizzata per la FORS, potrebbe essere considerevole e dannoso per l'oggetto; inoltre, grazie alla loro maneggevolezza e leggerezza, le fibre ottiche consentono di raggiungere agevolmente punti difficilmente accessibili⁹³.

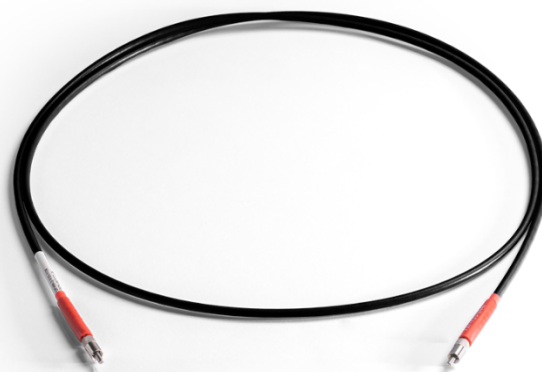


Fig. 13: Esempio di fibra ottica Vis-NIR (<https://www.oceaninsight.com/>)

⁹³ Cosentino 2014

Capitolo 3

I REPERTI OGGETTO DI INDAGINE DEL MUSEO DI SCIENZE ARCHEOLOGICHE E D'ARTE DELL'UNIVERSITÀ DI PADOVA

3.1 Il museo di Scienze Archeologiche e d'Arte

La storia dell'attuale Museo di Scienze archeologiche e d'Arte inizia nei primi anni del '700 ed è legata alla donazione delle raccolte Vallisneri. Queste collezioni, inizialmente, confluirono al Bo, andando a costituire un unico museo che prese il nome di *Gabinetto di storia naturale*. In un primo momento la parte archeologica ed antiquaria, pur rimanendo sempre al Bo, venne separata dalle altre, prendendo il nome di *Gabinetto delle Antichità*. Nel 1807 si decise di spostare il museo presso l'allora Biblioteca universitaria (situata presso la Sala dei Giganti), dove rimase fino al 1819⁹⁴.

Un primo importante momento di svolta vi fu nel 1899, quando giunse a Padova il primo docente di formazione pienamente archeologica, Gherardo Ghirardini. Nel 1905 Antonio Minto, sotto la guida di Ghirardini, redasse il primo inventario scientifico del museo e si occupò della stesura delle prime note storiche del museo. A Ghirardini e al suo successore, Giuseppe Pellegrini, si deve inoltre la costituzione della gipsoteca di scultura classica che andò ad implementare le collezioni del museo.

Nel 1922 Carlo Anti subentrò a Pellegrini e immediatamente si impegnò per arricchire il museo con nuovi materiali, mantenendo viva la sua funzione di laboratorio didattico. Un contributo significativo e fondamentale fu l'acquisizione, tra '25 e '26, della collezione Neumann di Trieste, la quale comprendeva reperti da Cipro, dall'Egitto, dall'Etruria e dall'Italia meridionale.

Il prof. Anti, durante il suo mandato come Rettore, supervisionò la realizzazione di una nuova sede per la Facoltà di Lettere e Filosofia, il *Liviano*, il cui progetto fu affidato all'architetto Gio Ponti. In questa occasione, si decise di destinare un'apposita area al terzo piano per il *Museo delle Antichità*. Da quel momento in avanti, il museo sarà comunemente conosciuto come il *Museo del Liviano*⁹⁵.

⁹⁴ Polacco 1967, <https://www.musei.unipd.it/it/archeologia/storia-sede>

⁹⁵ Menegazzi 2019, <https://www.musei.unipd.it/it/archeologia/storia-sede>

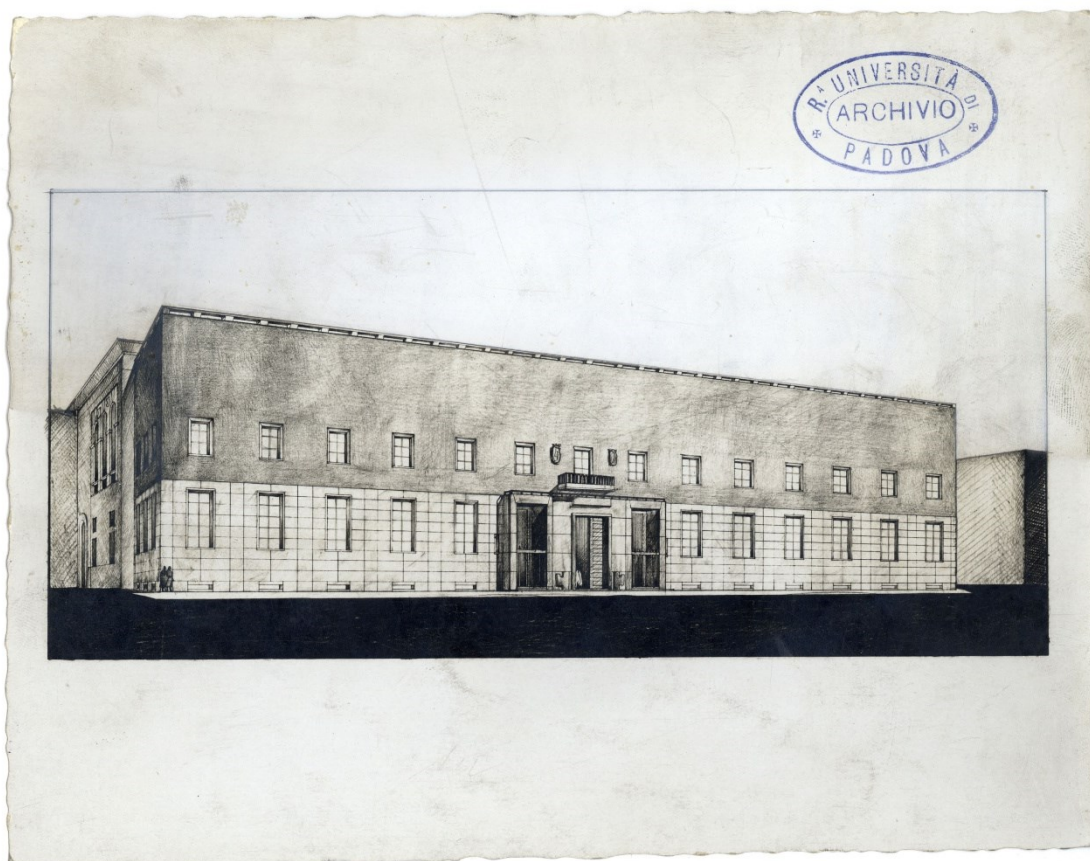


Fig. 14: Facciata settentrionale e orientale del nuovo palazzo della Facoltà di Lettere secondo il progetto presentato dall'architetto milanese Gio Ponti (<https://phaidra.cab.unipd.it/o:333317>)

A causa degli eventi bellici di quegli anni, l'allestimento del museo venne iniziato nel primo dopoguerra ma fu completato solo nel corso degli anni '60, sotto la guida prof. Luigi Polacco. Sempre nel corso di quegli anni il museo ricevette ulteriore materiale archeologico (collezione Gorga) e furono effettuati una serie di restauri sui materiali. Nel ventennio successivo, le collezioni continuarono ad arricchirsi grazie ad una serie di materiali provenienti dal Museo Correr di Venezia e dal Museo Nazionale Atestino. Inoltre, nuovi contributi furono apportati grazie a donazioni, tra cui le più recenti includono la donazione dei vasi italici ed apuli da parte dei coniugi Merlin-Hieke nel 2006 e le donazioni di monete e campioni lapidei effettuate da Lorenzo Lazzarini nel 2008⁹⁶.

⁹⁶ <https://www.musei.unipd.it/it/archeologia/storia-sede>

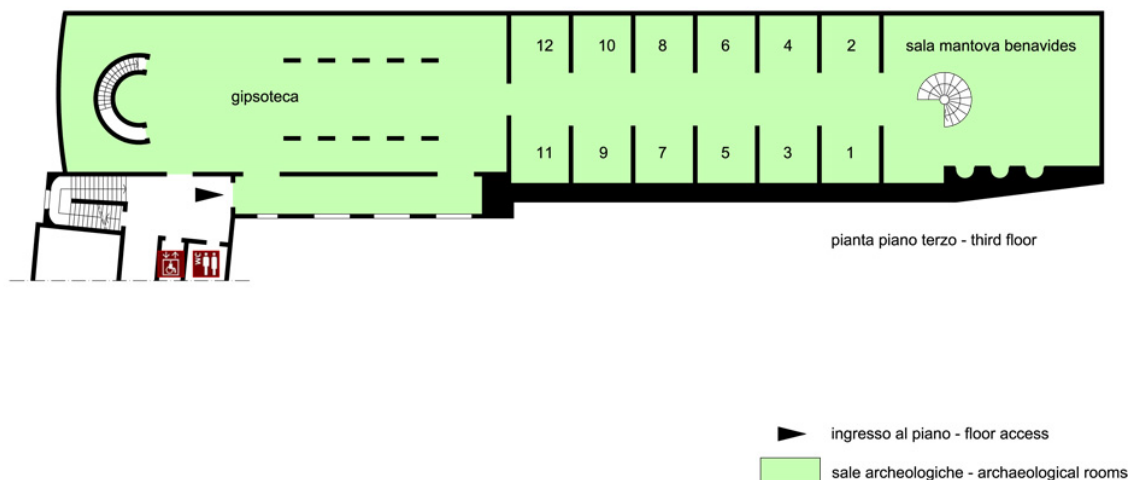


Fig. 15: Planimetria Museo di Scienze Archeologiche e d'Arte dell'Università di Padova

Attualmente, il Museo accoglie nelle sue 14 sale tre sezioni principali: la gipsoteca (sala omonima), le raccolte archeologiche (12 sale centrali), il collezionismo (sala Mantova Benavides)⁹⁷. Oggigiorno l'ingresso è possibile sia dal lato della scala che conduce al Dipartimento per gli utenti interni e i gruppi, sia dalla scala a chiocciola per il pubblico generico (fig. 16), tuttavia nel progetto di Ponti l'accesso al museo doveva avvenire esclusivamente dalla scala a chiocciola.



Fig. 16: Vista di quello che doveva essere l'originale ingresso al museo (sinistra) e della gipsoteca (destra) a progetto appena concluso (<https://phaidra.cab.unipd.it/o:355926> e <https://phaidra.cab.unipd.it/o:355924>)

In occasione dell'Ottocentenario dell'Università di Padova, la scala a chiocciola è stata ripristinata, consentendo di apprezzare appieno la disposizione degli ambienti e l'effetto

⁹⁷ Si rimanda al link di seguito per vedere come si presenta oggi il Museo di Scienze Archeologiche e d'Arte dell'Università di Padova e l'allestimento odierno del museo:
<https://mostre.cab.unipd.it/archeologiafuoriluogo/it/40/museo-di-scienze-archeologiche-e-d-arte>

prospettico creato dalle pareti delle salette che incorniciano la statua in gesso dell'*Hermes* di Prassitele posta al centro dell'emiciclo⁹⁸. Infatti, come sopra detto, il pubblico generico usufruisce proprio della scala a chiocciola per accedere al Museo; al contrario per gruppi e scuole si preferisce ricorrere all'utilizzo della scala che conduce in Dipartimento essendo essa più ampia e sicura.

3.1.1 Collezione Mantova Benavides

Il percorso originale di visita, dunque, iniziava dalla sala Mantova Benavides, dedicata all'esposizione di ritratti antichi e all'antica, accanto ai quali trovano posto calchi e modelli di artisti contemporanei al collezionista Marco Mantova Benavides (XVI sec.), tra cui Bartolomeo Ammannati e Alessandro Vittoria, o a lui precedenti di una generazione, come Donatello.

L'esposizione inizia con opere dei tre artisti appena menzionati: il modello della *Cariatide* o *Allegoria dell'Architettura* di Alessandro Vittoria, il modello dell'*Allegoria della Sapienza* di Bartolomeo Ammannati e la *Testa del Gattamelata*, una riproduzione in gesso della testa dell'originale monumento equestre donatelliano conservato nella basilica di Sant'Antonio a Padova. Segue poi una sezione, esposta all'interno di un'antica libreria a giorno cinquecentesca, dove sono conservati materiali di studio per gli artisti del tempo, quali bozzetti, calchi e piccole sculture. Infine, sul fondo della sala è presente una grande vetrina in cui sono conservati una serie di busti e ritratti, sia antichi sia rinascimentali. L'esposizione di questa sala si conclude con tre nicchie sul lato destro, che contengono: una statuetta votiva di *Athena*, originale d'arte greca di IV sec. a.C., una copia antica in marmo dell'Eros che allenta l'arco, tratta da un'opera originale di Lisippo andata perduta, e un frammento di stele funeraria attica della prima metà del IV sec. a.C.⁹⁹

3.1.2 Le salette archeologiche

Le 12 sale centrali espongono reperti provenienti da diverse collezioni, nella maggior parte dei casi, dunque, si tratta di materiali privi di contesto poiché non provenienti da scavi regolari. Proprio per questo motivo, nel nuovo allestimento del 2008 si è cercato di riaggregare per insiemi culturali e cronologici i materiali provenienti dalle diverse

⁹⁸ Menegazzi 2019, pp. 195-196

⁹⁹ <https://www.musei.unipd.it/it/archeologia/mantova-benavides>

collezioni, in modo da creare un quadro generale per ogni ambito culturale documentato¹⁰⁰:

- civiltà del mediterraneo orientale ed Egitto antico (con un approfondimento sugli scavi padovani nell'oasi del Fayum);
- civiltà greca nelle sue molteplici espressioni topografiche (continentale, insulare, Magna Grecia) e cronologiche (dal Bronzo cipriota all'età ellenistica);
- popolazioni italiche (Apuli, Etruschi, Veneti);
- Roma (con approfondimento su Padova romana)

Ognuna delle 12 salette – con l'eccezione della n° 11 che ospita l'archivio e il catalogo informatizzato – tratta perciò un tema specifico¹⁰¹:

1. Egitto. Tebtynis e gli scavi di Carlo Anti;
2. Collezioni egizie e cipriote;
3. Ceramica apula;
4. Produzioni greche;
5. I Veneti antichi;
6. Collezione Merlin;
7. La necropoli veneta del Piovego a Padova (VI-IV secolo a.C.);
8. Collezione etrusca;
9. Padova romana;
10. Vita quotidiana dei Romani;
11. Collezione di vetri romani.

3.1.3 La gipsoteca

L'ultima sezione è la gipsoteca, istituita grazie al lavoro di Gherardo Ghirardini, nonostante l'impegno maggiore per il potenziamento della sala sia da attribuire al successore Giuseppe Pellegrini. La gipsoteca custodisce una serie di calchi di sculture classiche e rilievi del Partenone. Provenienti invece da campagne di scavo, il gesso dell'*Hermes* da Olimpia e i 10 calchi di noti reperti minoici da Creta¹⁰².

Ad occuparsi della progettazione della gipsoteca fu, ancora una volta, Gio Ponti. Egli realizzò una vasta sala sul modello di una casa ad atrio romana e, infatti, al centro della

¹⁰⁰ <https://www.musei.unipd.it/it/archeologia/salette-archeologiche>

¹⁰¹ <https://www.musei.unipd.it/it/archeologia/salette-archeologiche>

¹⁰² <https://www.musei.unipd.it/it/archeologia/gipsoteca>

sala e circondato dai calchi delle statue più importanti, si trova l'*impluvium*¹⁰³, mentre alla fine della sala, in asse con esso, si presenta l'emiciclo contenente la statua dell'*Hermes* di Prassitele.

Sono poi presenti una serie di vetrine¹⁰⁴, posizionate lungo il lato meridionale, in corrispondenza dell'ingresso dal Dipartimento. Queste vetrine a doppio fronte – e che hanno la doppia funzione di vetrina espositiva e di separatore con l'area della gipsoteca – ospitano sia la collezione litologica sia la parte didattica. Per quanto concerne la parte didattica, due vetrine sono dedicate all'esposizione permanente di pigmenti inorganici naturali e artificiali utilizzati nella pittura antica, mentre una terza vetrina espone modelli di contenitori ceramici del '700 (ricostruiti in via sperimentale)¹⁰⁵. La collezione litologica, donata nel 2008 dal prof. Lorenzo Lazzarini, è costituita da circa un'ottantina di reperti e trova anch'essa posto all'interno delle vetrine, in questo caso rivolte verso il corridoio di servizio che corre lungo il lato sud¹⁰⁶.

3.2 I manufatti presi in esame

I manufatti che sono stati selezionati per questo studio provengono da 3 delle 12 salette centrali che accolgono al loro interno le raccolte archeologiche. Nello specifico si sono presi in esame¹⁰⁷:

- Lacerto di affresco, pesce, AR12, inv. n° 430, (collocazione odierna nel Museo: reperto n° 67, sala 10);
- Statuetta femminile stante, Merlin123, inv. n° 1364, (collocazione odierna nel museo: reperto n° 38, sala 6);
- Statuetta femminile stante, danzatrice bacchica, Merlin124, inv. n° 1365, (collocazione odierna nel Museo: reperto n° 39, sala 6);
- Frammento/rilievo, funzionario, E48, inv. n° 6105, (collocazione odierna nel Museo: reperto n° 25, sala 2)

¹⁰³ Purtroppo, già nel 1948 l'impluvio venne coperto con una lastra di vetro per i problemi che si erano creati nel tempo.

¹⁰⁴ Si tratta tra l'altro di un recupero in chiave attuale di un elemento divisorio (posto tra le finestre e i pilastri dell'impluvio appunto) che era stato realizzato con il progetto di Gio Ponti e poi in seguito era stato demolito in occasione del successivo riallestimento degli anni sessanta del prof. Luigi Polacco.

¹⁰⁵ <https://www.musei.unipd.it/it/archeologia/vetrine-didattiche>

¹⁰⁶ <https://www.musei.unipd.it/it/archeologia/collezione-litologica>

¹⁰⁷ Nell'indicazione dei reperti presi in esame viene riportato, in ordine: l'identificativo/definizione dell'oggetto, il soggetto, il codice del bene attribuito dal Museo, il numero di inventario del Museo e/o della Soprintendenza e la collocazione attuale nell'esposizione museale.

Gli oggetti selezionati provengono da ambiti culturali e cronologici differenti, scelta che è stata effettuata con l'intento di verificare se, in base all'epoca e al luogo di produzione, si possano riscontrare delle differenze nella produzione e composizione del blu egizio. Tra questi manufatti, infatti, abbiamo un reperto proveniente dalle collezioni egizie e databile al Nuovo Regno (E48), un reperto di età romana di produzione istriana (AR12) e due reperti provenienti dalla collezione Merlin di probabile produzione italiota e databili al IV sec. a.C. (Merlin123, Merlin 124).

Di questi manufatti, purtroppo, le informazioni al riguardo non sono moltissime; fatto in parte dovuto alla loro appartenenza a collezioni di cui, alle volte, è difficile ricostruire con precisione la storia collezionistica. La maggior parte delle informazioni che possediamo derivano da schede ICCD che sono state redatte da curatori e responsabili del Museo e che vengono costantemente aggiornate. Queste informazioni hanno consentito un inquadramento generale dei diversi reperti, in particolare a livello cronologico, più incerte sono infatti le informazioni relative alla provenienza dei reperti.

3.2.1 Frammento egizio (E48)



Fig. 17: Bassorilievo, calcare, 1540-1070 a.C., 21,8 x 14,0 x 6,2 cm, inv. n° 6105, provenienza ignota, Università degli Studi di Padova, Dipartimento dei Beni Culturali, Archivio del Museo di Scienze Archeologiche e d'Arte.

Il frammento di rilievo raffigura una figura maschile di profilo, probabilmente un funzionario o, comunque, un personaggio di un certo rango vista la tipologia degli accessori e dell'abbigliamento. Al collo porta infatti una collana *usekh*, di colore turchese¹⁰⁸, composta da quattro giri di pendenti, appoggiata ad un pettorale realizzato da piccoli elementi di forma rettangolare. Il manufatto è lavorato a bassorilievo e

¹⁰⁸ Nel capitolo successivo si vedrà – mediante analisi VIL e FORS – come il blu impiegato per la colorazione della collana *usekh* sia blu egizio.

originariamente la superficie era dipinta: su volto e braccia si intravede ancora il colore rosso-bruno tipico dell'incarnato. Anche sul sopracciglio si vedono ancora tracce di colore nero, come nell'occhio sinistro, realizzato in visione frontale e con la pupilla nera al centro dell'iride. Le labbra sono carnose e anch'esse presentano il colore dell'incarnato. La figura, rivolta verso destra, mostra un volto pieno e indossa una parrucca tripartita che ricade parzialmente sul petto; essa è realizzata per mezzo di una serie di incisioni parallele e conserva una parziale colorazione nera. Lo stile suggerisce una datazione al Nuovo Regno (1540-1070 a.C.)¹⁰⁹. Il reperto fu probabilmente acquistato sul mercato antiquario nel corso della missione archeologica in Egitto di Carlo Anti.

3.2.2 Lacerto di affresco romano (AR12)



Fig. 18: Lacerto con raffigurazione di un pesce, intonaco, I sec. d.c. (?), 34,0 x 40,0 x 3,0 cm, inv. n° 430, Trieste, Friuli-Venezia Giulia, Università degli Studi di Padova, Dipartimento dei Beni Culturali, Archivio del Museo di Scienze Archeologiche e d'Arte.

Il lacerto di intonaco dipinto raffigura un pesce policromo (si vede l'impiego di ocre rossa, ocre gialla, azzurrite, blu egizio¹¹⁰ e bianco di calce) su uno sfondo bianco piuttosto

¹⁰⁹ Bettineschi et al. 2013, p. 176

¹¹⁰ Nel prossimo capitolo verrà esplicitato come sia stato possibile accertare la presenza di blu egizio nell'affresco e come mai l'uso del pigmento in questo caso sembri essere differente dagli altri casi analizzati

uniforme, intervallato solo da alcune crepe da riferire con molta probabilità al momento dello stacco. Il frammento è conservato all'interno di una scatola lignea delle dimensioni di 41,0 x 34,6 cm.

Sappiamo che le rappresentazioni di animali marini erano molto frequenti nella pittura romana in un periodo che va dal I sec. a.C. fino alla tarda età imperiale. Generalmente venivano raffigurate tutte specie ampiamente diffuse nel Mediterraneo e che costituivano buona parte dell'alimentazione dei Romani. Pesci, molluschi e crostacei venivano spesso inseriti dai pittori nelle nature morte, talvolta associandoli ad altri animali e oggetti. O, ancora, varie specie di pesci potevano costituire lo sfondo di ambienti marini con imbarcazioni o scene mitologiche¹¹¹. Infine, molto frequenti nel corso del I sec. d.C. (per l'esattezza con il IV stile pompeiano¹¹²) divennero le rappresentazioni di vivai, in cui si riscontra la presenza di pesci nel loro ambiente naturale e scene di lotta tra animali marini. Sappiamo dalle fonti che la moda di allevare in vivai di acqua salata varie specie di pesce ebbe un'enorme diffusione a Roma dall'età tardo-repubblicana, e che vi fu un exploit nel I sec. d.C., quando *piscinae salsae* divennero comuni in tutte le aree dell'Impero¹¹³.

Le prime raffigurazioni con animali marini risalgono già al II stile pompeiano ma sono assai rari e sempre riconducibili al genere della natura morta, sarà infatti con il IV stile che le rappresentazioni marine cominceranno a diventare molto più frequenti¹¹⁴. Proprio nell'ambito dei sistemi decorativi di IV stile la natura morta viene impiegata con notevole frequenza, assumendo spesso un ruolo non secondario all'interno della parete. Tali composizioni possono essere delimitate da una cornice dipinta – a costituire un vero e proprio quadro – o essere poste al di sopra di un pianetto, come vignetta inserita al centro dei pannelli della zona mediana¹¹⁵.

Essendo in possesso solo di un lacerto di quello che doveva essere l'originario affresco è difficoltoso anche solo ipotizzare in che tipo di scena dovesse essere inserito tale soggetto (è plausibile pensare che si trattasse di una natura morta?). Quello che è certo è che si

¹¹¹ Rossetti, Tella 1993, p. 1

¹¹² Il IV stile pompeiano si sviluppa all'incirca tra 35 d.C. – fine I sec. d.C. a Roma e tra 45-79 d.C. a Pompei.

¹¹³ Rossetti, Tella 1993, pp. 7-8

¹¹⁴ Nel III stile le nature morte con pesci continuano ad essere utilizzate ma abbastanza raramente.

¹¹⁵ Rossetti, Tella 1993, p. 4

tratta di una rappresentazione piuttosto comune in epoca romana e, in particolare, nel I sec. d.C. (periodo a cui è stato ipotizzato appartenere tale lacerto di intonaco dipinto).

Il reperto preso in esame proviene dalla collezione Neumann, di cui l'Università di Padova entrò in possesso nel 1925. In quell'anno Enrico Tedeschi, Giorgio Dal Piaz e Angelo Bianchi, rispettivamente direttori degli Istituti di Antropologia, Geologia e Mineralogia dell'Università di Padova, venuti a conoscenza dell'esistenza della sua vasta collezione, ne valutarono l'effettivo interesse scientifico. Successivamente, si fecero promotori presso l'allora Rettore Lucatello affinché l'Ateneo potesse acquistare la collezione nella sua interezza. L'acquisto avvenne alla fine del 1925 e fu possibile grazie a una sovvenzione del Ministero della Pubblica Istruzione pari a 50.000 lire.

Una volta arrivate a Padova, le ampie collezioni di Neumann furono distribuite tra gli istituti di Antropologia, Geologia e Mineralogia, integrandosi così nel patrimonio dell'Università di Padova. Nel 1926, Carlo Anti concordò con l'Istituto di Antropologia il trasferimento di una serie di reperti ritenuti pertinenti al Museo di Antichità presso l'Istituto di Archeologia, situato in piazza Capitaniato, successivamente demolito per fare spazio alla costruzione del Liviano. È probabile che in questo periodo – o poco dopo – molti degli oggetti della collezione Neumann trasferiti ad Archeologia siano stati contrassegnati con la sigla "N", che oggi costituisce in gran parte l'unico documento attestante l'appartenenza alla collezione dei reperti attualmente custoditi nel Museo di Scienze Archeologiche e d'Arte, i quali spaziano dalle produzioni dell'antico Egitto a quelle di ambito etrusco, apulo, greco, magnogreco e romano.

La maggior parte dei manufatti della collezione Neumann conservati oggi presso il Museo di Antropologia proviene da grotte, necropoli e castellieri dell'area carsico-istriana, da importanti palafitte in Svizzera e Slovenia e da varie altre località italiane ed europee. A causa dei numerosi spostamenti e riorganizzazioni subiti nel tempo, la consistenza e le precise provenienze geografiche della raccolta sono ancora in fase di definizione. Tuttavia, è plausibile ritenere che una parte significativa della collezione del Museo derivi proprio da questa acquisizione¹¹⁶.

¹¹⁶ <https://mostre.cab.unipd.it/archeologiafuoriluogo/it/48/eugenio-neumann-1847-1928>

3.2.3 Statuetta femminile di danzatrice bacchica (Merlin124)



Fig. 19: Statuetta femminile di danzatrice bacchica, argilla, IV sec. a.C., altezza 25,8 cm, produzione tarantina, collezione Merlin n° 124, inv. n° 1365, Università degli Studi di Padova, Dipartimento dei Beni Culturali, Archivio del Museo di Scienze Archeologiche e d'Arte.

Si tratta di una statuetta in terracotta che reca ancora parziali tracce di policromia, in particolare si notano evidenti tracce di blu¹¹⁷ all'altezza del seno e su un dito della mano sinistra. La figura, stante su alto zoccolo, ha la gamba destra tesa e la sinistra flessa; le

¹¹⁷ Mediante analisi VIL e FORS (si veda capitoli successivi) si è potuto appurare che si tratta di blu egizio.

braccia sono piegate, sembra nel gesto di sorreggere uno strumento musicale. Indossa un chitone con un manto legato intorno alla vita e sul capo reca la corona bacchica.

La statuetta rientra nella collezione Merlin-Hieke, una collezione che contava ben 138 manufatti, principalmente riferibili a produzioni ceramiche greche, italiote e locali, ma anche, in misura minore, bronzi, vetri, monete e alcuni reperti riferibili alla preistoria e alla protostoria¹¹⁸.

La prima menzione della loro collezione risale al 1970, quando Michelangelo Merlin ne segnalò il possesso al Museo Archeologico Provinciale di Bari. Alla fine del 1971, il Ministero della Pubblica Istruzione riconobbe l'eccezionale interesse artistico e archeologico della raccolta. Nel 1973, con il trasferimento di Oplinia Hieke a Venezia, anche la collezione venne spostata, arrivando infine a Padova nel 1983. La collezione Merlin venne acquisita dal Consiglio di amministrazione dell'Università di Padova nel settembre 2006, in occasione della morte della Hieke. Su preciso lascito testamentario della stessa Oplinia la collezione veniva ceduta *“allo Stato perché, se possibile, venga destinata all'Università di Padova per il suo Museo Archeologico in modo da costituire un settore dedicato ai coniugi Plinia e Michelangelo Merlin”*¹¹⁹.

Michelangelo Merlin, nato a Trieste il 4 dicembre 1910, conseguì la laurea in Economia nella sua città natale nel 1934. Successivamente, ottenne una seconda laurea in Matematica presso l'Università di Padova nel 1941, dove iniziò a lavorare come docente all'Istituto di Fisica nel 1946, subito dopo il suo ritorno dai campi di prigionia tedeschi, dove era stato internato dopo l'8 settembre 1943. Anche Oplinia Heike, nata a Palmanova il 28 luglio 1915, era di origini friulane e, seguendo le orme del marito, ottenne due lauree: la prima in Scienze Naturali nel 1938 e la seconda in Chimica presso l'Università di Padova nel 1941¹²⁰.

Un elemento significativo che emerge fin dalle prime informazioni riguardanti questa coppia è il loro elevato livello culturale. Entrambi erano estremamente preparati nelle discipline scientifiche affini, e la combinazione delle loro conoscenze ha probabilmente garantito una notevole capacità critica nella selezione delle opere d'arte, nell'analisi dei

¹¹⁸ <https://mostre.cab.unipd.it/archeologiafuoriluogo/it/54/michelangelo-merlin-1910-2002-e-oplinia-hieke-1915-2006>

¹¹⁹ Menegazzi 2013, pp. 41-42

¹²⁰ Tomasella 2022, pp. 130-31

materiali utilizzati e nei contesti di provenienza. Inoltre, la loro accessibilità agli esperti e ai contesti istituzionali ha facilitato ulteriormente la loro ricerca. Proprio la preparazione culturale dei collezionisti è fondamentale – anche se spesso non sufficiente – per garantire un certo livello nella scelta dei manufatti da inserire nella propria collezione¹²¹.

Per quanto concerne un tentativo di inquadramento artistico, si è osservato che questa statuetta (come vedremo anche per la successiva) presenta molte similitudini con le produzioni tanagrine, di Centuripe e di Canosa. Sia a livello cronologico che stilistico, infatti, tale statuetta sembra poter rientrare in questo tipo di produzioni. Tutte e tre le forme d'arte ceramiche si contraddistinguono del resto per la produzione di piccole statuette femminili in terracotta, collocabili nel periodo ellenistico – in particolare tra IV e III sec. a.C. –, che raffigurano donne in varie pose e abbigliamenti. Queste statuette sono caratterizzate da una notevole vivacità e realismo nelle espressioni facciali e nei dettagli di vesti e accessori. Le donne sono spesso ritratte in pose eleganti o in atteggiamenti di vita quotidiana, e molte statuette mostrano anche elementi di erotismo o di mitologia¹²².

¹²¹ Tomasella 2022, pp. 130-132

¹²² Patanè

3.2.4 Statuetta femminile stante (Merlin123)



Fig. 20: Statuetta femminile stante, argilla, IV sec. a.C., altezza 27,3 cm, produzione italiota, collezione Merlin n° 123, inv. n° 1364, Università degli Studi di Padova, Dipartimento dei Beni Culturali, Archivio del Museo di Scienze Archeologiche e d'Arte.

Anche in questo caso ci troviamo di fronte ad una statuetta in terracotta con notevoli tracce di policromia, specialmente nella zona del pannello della veste, dove già ad occhio nudo è visibile l'impiego di colore blu. La figura, stante sulla gamba destra e con la sinistra leggermente avanzata, ha il braccio destro sollevato verso il petto, mentre il sinistro le cinge la vita.

Come detto per la statuetta Merlin¹²⁴, anche in questo caso si riscontrano analogie con le produzioni tanagrine, di Canosa e di Centuripe. In particolare, in questo caso, si sono trovati dei buoni confronti nei cataloghi di collezione del Louvre e del British Museum. Proprio tra le collezioni del Louvre è emersa una applique da vaso (fig. 21), databile al periodo ellenistico e proveniente da Canosa, che presenta diverse similitudini con la statuetta oggetto di indagini. L'esempio proveniente dal Louvre propone ancora una volta una statuetta femminile di piccole dimensioni (33 x 11 x 10,5 cm), raffigurante probabilmente una donna in lutto¹²³ in una posa molto simile a quella della statuetta 38: la figura è stante sulla gamba sinistra, la destra è invece leggermente piegata; il braccio sinistro è sollevato verso il petto, mentre il destro le cinge la vita.



Fig. 21: Statuetta/applique da vaso, 300-200 a.C. (II sec. a.C.), da Canosa (Italia), oggi presso il Museo del Louvre (<https://collections.louvre.fr/en/ark:/53355/cl010266409#>)

¹²³ <https://collections.louvre.fr/en/ark:/53355/cl010266409>

A parte per queste somiglianze riscontrate non possiamo spingerci troppo oltre con i confronti e con le interpretazioni sia perché, come precedentemente detto, nonostante i coniugi Merlin siano stati dei collezionisti piuttosto attenti, le informazioni che sono giunte sino a noi sono poche e incerte, sia perché la volontà di questo studio è quella di indagare la presenza di tracce di blu egizio su tali manufatti e la motivazione per cui questo pigmento si presenti in modi differenti sugli stessi.

Capitolo 4

ANALISI E RISULTATI DEGLI OGGETTI PRESI IN ESAME

Il primo obiettivo del presente lavoro di tesi è stato quello di identificare e quindi selezionare una serie di oggetti, tra quelli conservati nel Museo di Scienze Archeologiche e d'Arte dell'Università degli Studi di Padova, diversi per tipologia, finitura ed epoca, che presentassero tracce certe di blu egizio. Per poter selezionare gli oggetti di interesse, si è quindi deciso di utilizzare la ormai ben nota proprietà del blu egizio di rispondere con un effetto di luminescenza, visibile nell'infrarosso (a circa 900 nm), se illuminato con una radiazione visibile a banda stretta.

L'intento complessivo dello studio, oltre all'identificazione dell'effettiva presenza del pigmento era quello di verificare eventuali analogie o differenze nella risposta spettroscopica, relativamente all'uso del blu egizio o di sue miscele nelle diverse epoche e corrispondenti agli oggetti presi in esame.

Le fasi di questo studio hanno quindi previsto:

1. Una prima parte incentrata sull'impiego della luminescenza indotta nel visibile e rilevabile nell'infrarosso (VIL), per identificare la reale presenza del blu egizio nei reperti oggetto di indagine;
2. Una seconda parte incentrata sull'analisi puntuale, spettroscopica, mediante l'uso di fibre ottiche (FORS), per l'individuazione delle caratteristiche fisico-chimiche del pigmento o sua miscela, individuati preliminarmente e in modo qualitativo con la tecnica VIL.

Indubbiamente la provenienza degli oggetti presi in esame, estremamente incerta, e prevalentemente¹²⁴ frutto di collezioni di cui non si può ricostruire con precisione l'iter

¹²⁴ Nel caso della collezione Neumann gli oggetti provenienti dall'Egitto sono 38. Il totale dei reperti egizi del Museo ammonta però a 67. Di tutti gli oggetti che non facevano parte della collezione Neumann, i tre calchi in gesso (cat. 62-64) sono i soli oggetti che il professor Carlo Anti portò a Padova assieme a *ostraka* e frammenti di papiro in seguito alla conclusione dei suoi scavi nel sito di Tebtynis, nel Fayum. Per quanto riguarda i restanti oggetti, invece, si potrebbe pensare che la loro origine sia da ricercare o nell'attività di commerciante di antichità di Neumann, dal momento che nell'elenco delle sue collezioni il numero di oggetti egizi si aggira attorno alla settantina (cfr. Archivio dell'Università di Padova, Facoltà di Scienze, *Elenco delle collezioni Neumann*) e soltanto 38 di essi sono stati identificati, oppure che si tratti di quegli "idoletti egizi di terracotta verdognola" del Catalogo Vallisneriano (cfr. Carrara, Menegazzi, Moser 2010)

conservativo, ha determinato anche l'esito di questo studio, da considerarsi per ora solo preliminare, in assenza di approfondimenti sugli oggetti analizzati.

4.1 L'acquisizione delle immagini VIL

L'acquisizione di immagini VIL ha previsto l'utilizzo di una macchina fotografica reflex modificata full range (in questo caso è stata utilizzata una Nikon D800 FR modificata dalla ditta Profilocolore), posizionata su un cavalletto e una fonte di illuminazione nel range visibile stretto (per queste analisi è stata impiegata una lampada LED blu).

Le riprese con questa tecnica sono basate sulla sollecitazione della risposta in luminescenza dei pigmenti, nell'ipotesi che sia presente il blu egizio, e per questo motivo l'acquisizione e il set di ripresa sono diversi rispetto al generico *imaging* multispettrale. In generale si preferisce un ambiente oscurato, non contaminato da radiazioni diverse da quella visibile a banda stretta prodotta dalla sorgente scelta, in modo che risalti il fenomeno della luminescenza dell'eventuale blu egizio.

Per l'acquisizione VIL, sull'obiettivo della fotocamera è stato montato un filtro taglia-banda con centro a 850 nm fornito con la fotocamera. Il diaframma è stato impostato su valori medi tra f/5-f/8.

Va poi aggiunto che trattandosi di analisi effettuate *in situ*, con finestre non completamente oscurabili, nonostante il cielo fosse coperto, è stato impossibile rimuovere tutte le possibili sorgenti di radiazione spuria, anche se ciò sarebbe stato auspicabile poiché i lunghi tempi di esposizione¹²⁵ in generale tendono a falsare la ripresa.

Le immagini sono state registrate in formato RAW, ovvero “non elaborato/grezzo”. In fotografia digitale questo formato rappresenta l'immagine così come è stata acquisita dal sensore, per l'appunto non elaborata, e tale formato viene utilizzato per avere a disposizione tutti i dati dell'immagine originale senza alcuna compressione¹²⁶.

La differenza tra un'immagine JPG¹²⁷ e una immagine RAW risiede nella possibilità di intervenire su esposizione, gamma dinamica e correzione del rapporto segnale-rumore. È

¹²⁵ I tempi di esposizione utilizzati variavano in media tra i 2,5 e i 3 sec.

¹²⁶ https://www.adobe.com/ch_it/creativecloud/file-types/image/raw.html

¹²⁷ JPEG = Joint Photographic Experts Group

poi possibile gestire il bilanciamento colore senza la necessità di effettuare il settaggio direttamente sulla fotocamera prima dello scatto¹²⁸.

Il formato RAW rappresenta uno specifico approccio per conservare i dati di un'immagine: l'immagine acquisita dal sensore della fotocamera viene salvata nel suo stato numerico originale dopo essere stata semplicemente convertita da analogico a digitale, senza subire ulteriori modifiche da parte della fotocamera.

Di solito il file RAW relativo all'immagine è più pesante degli altri formati immagini (tiff. e jpg.). Questo perché, oltre alle informazioni digitali e ai dati sui pixel, include anche i codici di formato del file, noti come *header*, che ne consentono l'identificazione e quindi la sua interpretazione.



Fig. 22: Esempio di ripresa. A sinistra si può osservare la preparazione della macchina fotografica per scattare la fotografia VIL (in particolare la messa a fuoco nel visibile). A destra si osserva lo scatto della fotografia VIL, con l'ausilio del faretto LED blu.

4.2 L'acquisizione degli spettri FORS

L'impiego della tecnica VIL ha permesso di individuare in via preliminare la presenza del blu egizio sui vari oggetti in esame. Lo studio puntuale per l'analisi chimico/fisica delle

¹²⁸ Iannacone 2012-14, p. 81

eventuali differenze tra i pigmenti/miscele identificati genericamente con la VIL come blu egizio nei vari oggetti è stato però affinato grazie all'impiego della spettroscopia di riflettanza nel visibile mediante l'uso di fibre ottiche (VIS-FORS), con strumentazione portatile, una tecnica spettroscopica che analizza le caratteristiche spettroscopiche della luce riflessa da una superficie illuminata con luce visibile. Per ogni oggetto indagato sono stati selezionati – sulla base dei risultati ottenuti con la VIL – una serie di punti considerati di potenziale interesse su cui effettuare le analisi. In linea generale per ogni manufatto sono stati analizzati 4 punti, 3 relativi al presunto blu egizio e 1 di riferimento sul background.

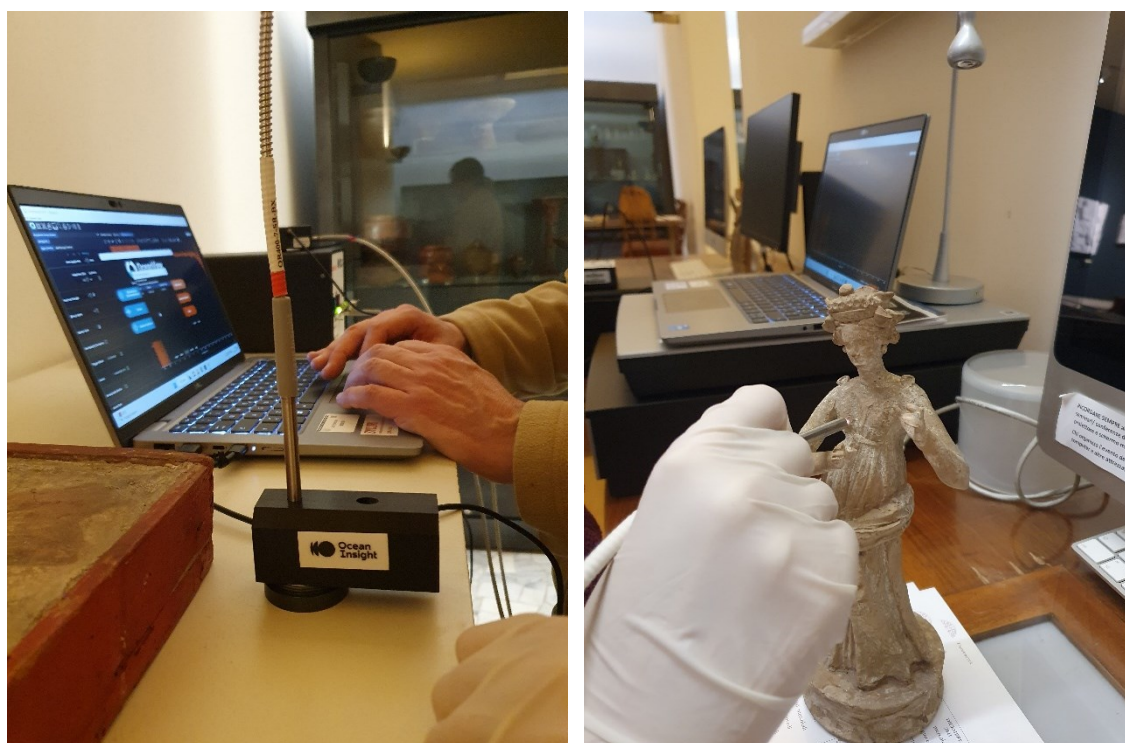


Fig. 23: Esempio di acquisizione. A sinistra si vede la calibrazione dello strumento. A destra si osserva l'acquisizione su un singolo punto

Per l'indagine FORS sono stati utilizzati:

- una lampada alogena al tungsteno (VIS) e di una lampada al deuterio (UV) combinate in un'unica sorgente luminosa della Ocean Insight, modello DH 2000-BALL. La gamma delle lunghezze d'onda di questa sorgente va da 210 a 2500 nm, fatto che ha permesso di eseguire senza difficoltà le analisi sul blu egizio, avendo esso un picco caratteristico intorno ai 930 nm;
- uno spettrometro della Ocean Optics, modello UV-VIS SR 4;

- fibre ottiche della Ocean Insight, modello QR400-7-SR-BX, ideali per la riflettanza diffusa o speculare dei solidi, la fluorescenza e l'analisi dei pigmenti;
- un pc con installato il software OceanView 2.0;
- un calibratore, uno standard di riflettanza speculare e diffusa.

Per l'acquisizione degli spettri, solo sulla superficie piana del frammento di affresco, è stato impiegato un supporto per la fibra ottica, per garantire risultati più possibile affidabili. Per le statuette e il frammento egizio, vista l'irregolarità delle superfici e la difficoltà nel raggiungere alcuni punti, è stata utilizzata la fibra ottica senza supporto.

Gli spettri sono stati acquisiti esclusivamente nel visibile a causa dell'eccessiva luminescenza del blu egizio e delle non ottimali condizioni di oscuramento, impossibile integralmente a causa di alcune finestre del museo, per cui non è stato possibile l'acquisizione del dato UV. Per ogni spettro è stata acquisita la media di 100 scansioni.

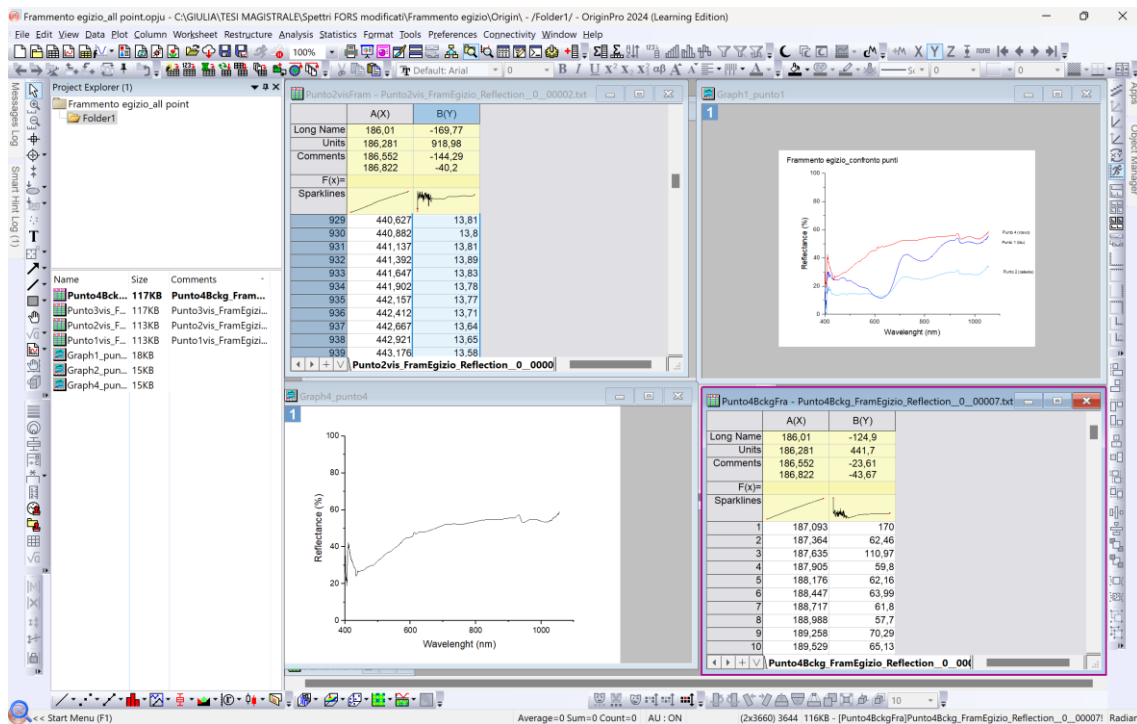


Fig. 24: Schermata del software OriginLab, con esempi di elaborazione dati

Ogni spettro successivamente è stato elaborato per mezzo del programma OriginLab¹²⁹, con cui è stato possibile estrapolare e successivamente pulire le curve rimuovendo le anomalie generate dalle sorgenti luminose esterne. Sempre grazie a questo software è

¹²⁹ <https://originlab.com/>

stato infine possibile mettere a confronto gli spettri ottenuti dalle diverse analisi sui vari oggetti, in modo tale da verificare se presentassero analogie o differenze.

4.3 Il frammento egizio (E48)

Nel caso del frammento egizio già ad occhio nudo erano state individuate delle zone con presenza di blu in corrispondenza della collana “*usekh*”. L’impiego della VIL in questo caso, quindi, ha confermato quanto osservate con un esame preliminare.

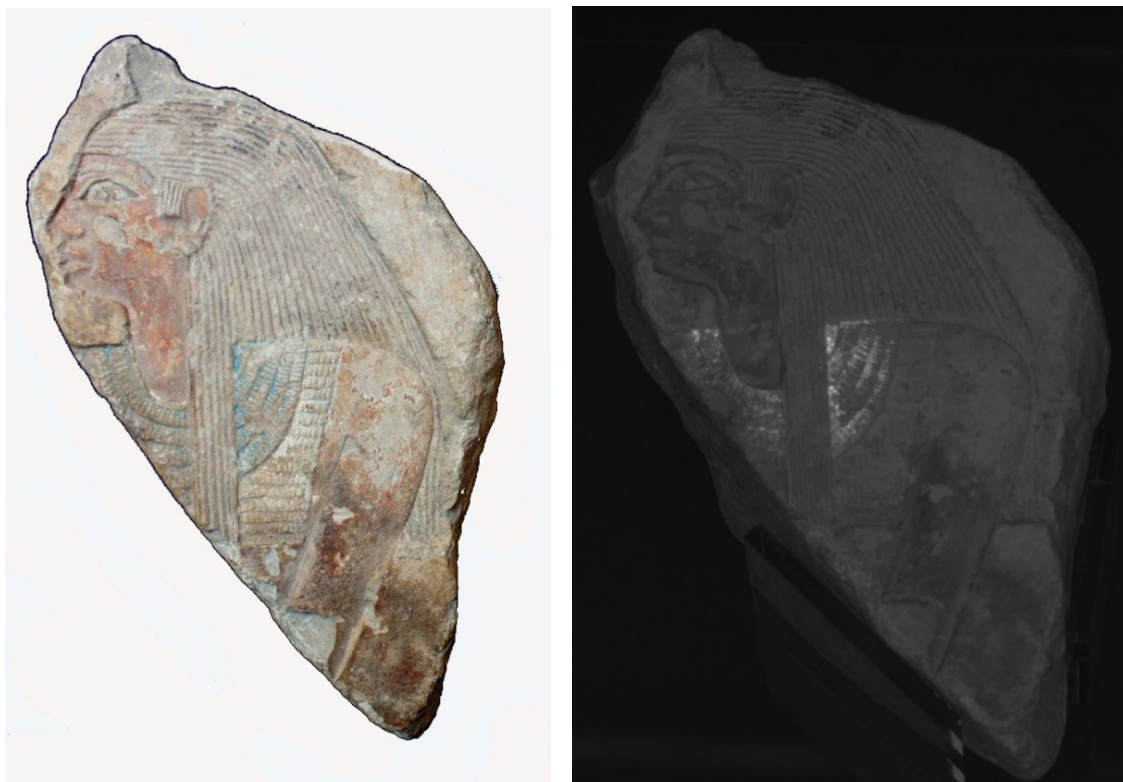


Fig. 25: Immagine VIS (sinistra) e VIL (destra) a confronto. Evidente la fluorescenza del pigmento di blu egizio in corrispondenza della collana *usekh*

I dati più interessanti sono emersi grazie alla tecnica FORS che, oltre a confermare la presenza di blu egizio in corrispondenza della collana *usekh*, secondo le indicazioni preliminari di fluorescenza avute con la VIL, ha permesso l’individuazione di una possibile traccia del pigmento anche sul pettorale, nonostante lo spettro ottenuto differisca da quelli registrati sulla collana, con un picco caratteristico del blu egizio a ca. 930 nm.

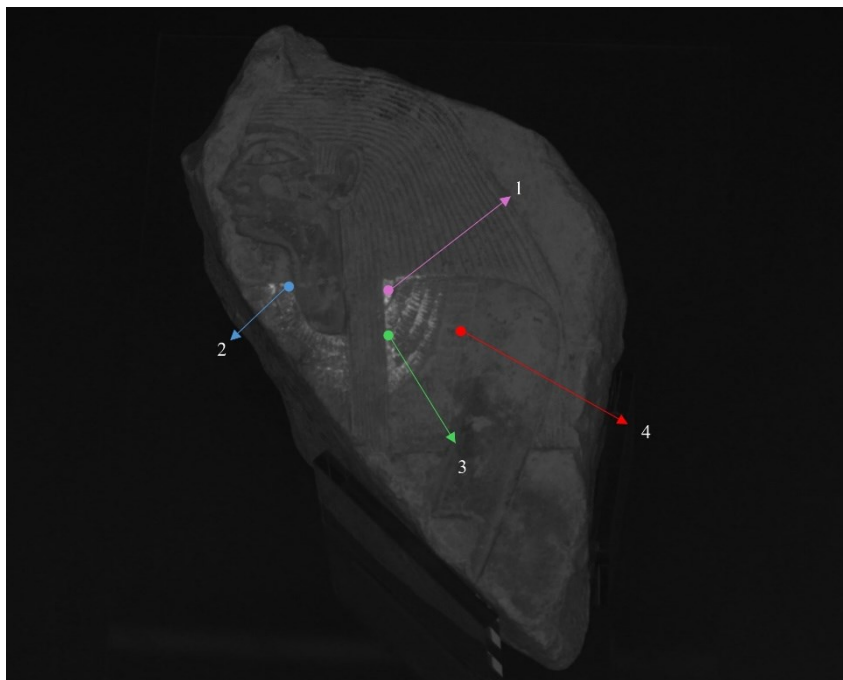


Fig. 26: Punti di misura FORS

A parte questa “anomalia” riscontrata in quello che abbiamo denominato pt.4 (fig. 26), i restanti spettri hanno riportato curve estremamente caratteristiche del blu egizio. Se infatti effettuiamo dei confronti con i riferimenti di alcuni database¹³⁰, osserviamo che l’andamento dei nostri spettri è assolutamente nella norma (figg. 27 e 28), con due bande di assorbimento a ca. 629 nm e 800 nm ed una riflettanza massima intorno a 930 nm.

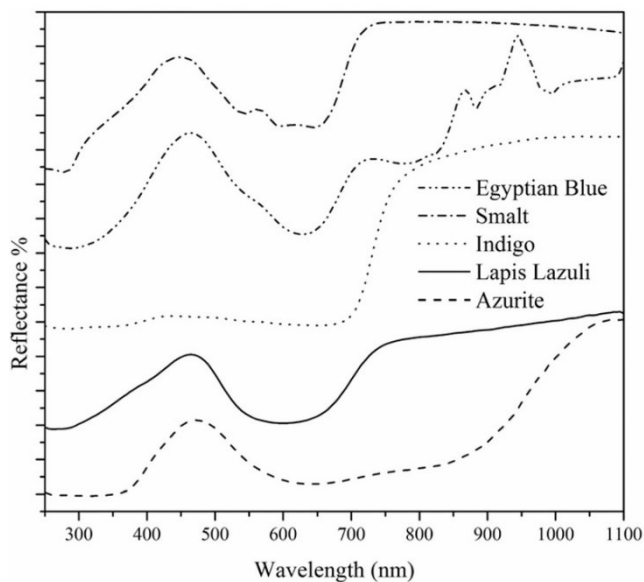


Fig. 27: Spettri FORS dei pigmenti blu da Aceto et al. 2014, p. 1495

¹³⁰ Come database di riferimento si sono presi: Cosentino 2014, Aceto et al. 2014, <https://spectradb.ifac.cnr.it/>, <https://chsopensource.org/egyptian-blue-k-10060/>

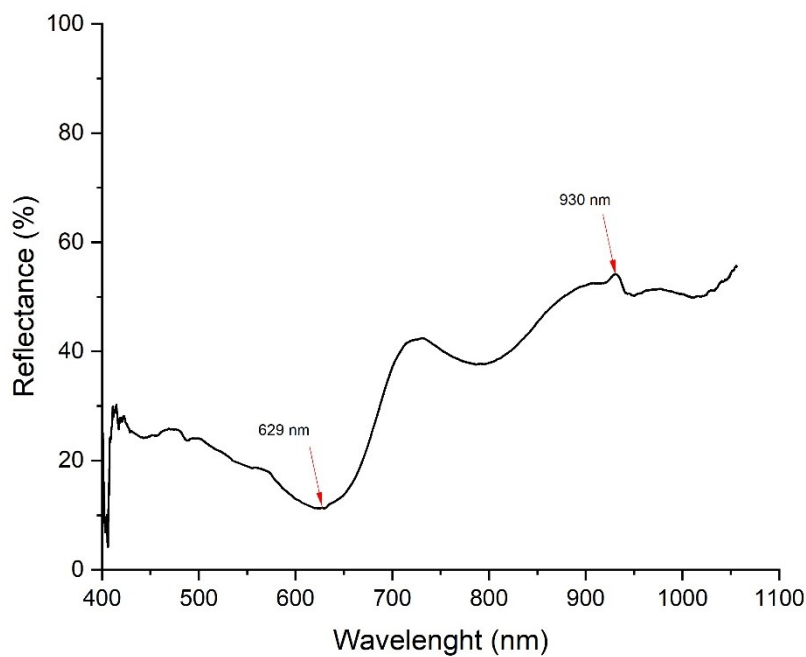


Fig. 28: Spettro FORS del pt.1 del frammento egizio, con indicazione del punto di massimo assorbimento (629 nm) e del picco caratteristico del blu egizio (930 nm).

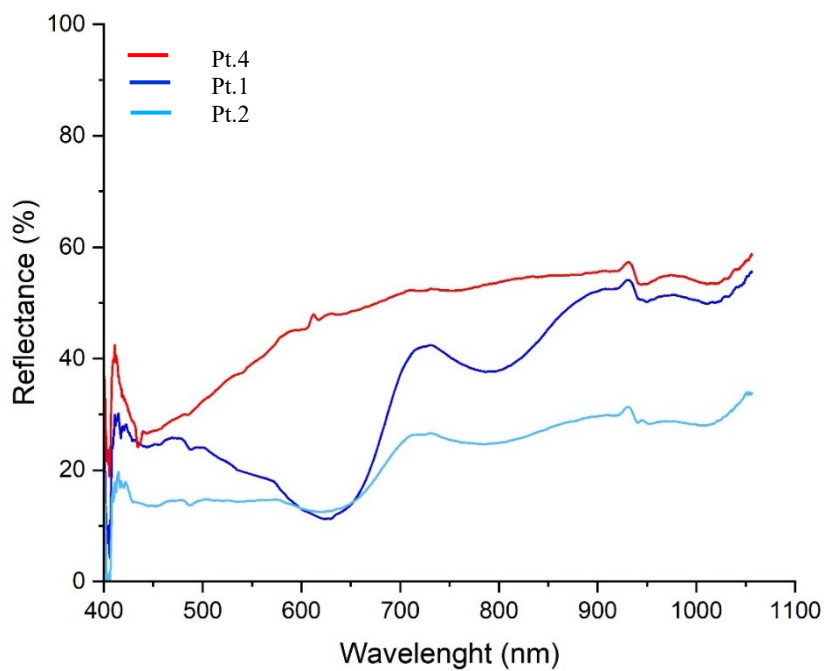


Fig. 29: Confronto tra pt.1 (blu), pt.2 (celeste), pt.4 (rosso) del fr. egizio. È possibile vedere come tutti gli spettri, compreso il pt.4 (in origine scelto come punto di background), presentino il picco caratteristico a 930 nm.

La leggera diversità nell'andamento degli spettri potrebbe essere da attribuire alle non ottime condizioni in cui si sono eseguite le analisi o ad una diversa percentuale della quantità di blu egizio nei punti analizzati: specie per il pt.4 potrebbe essere che il blu sia stato mescolato con altri pigmenti, come ad esempio terra verde. Con l'eccezione,

dunque, del pt.4 per il frammento egizio abbiamo spettri estremamente caratteristici, che ci testimoniano l'utilizzo di blu egizio quasi sicuramente puro.

4.4 Il lacerto di affresco romano (AR12)

Più complesso risulta essere il caso del lacerto di affresco romano poiché già da un'osservazione visiva preliminare sembrerebbe trovarsi di fronte ad un verde piuttosto che ad un blu. La VIL, tuttavia, evidenzia proprio in corrispondenza di quello che sembrava essere un pigmento verde una forte fluorescenza. Le zone più fluorescenti le troviamo sulla pancia del pesce, specie nella zona della pinna anale. Tracce più deboli sono presenti sul dorso del pesce: si osserva una leggera linea fluorescente tra la 1° e la 2° pinna dorsale (fig. 30).



Fig. 30: Immagine VIS (sopra) e VIL (sotto) a confronto. Evidente la fluorescenza del pigmento di blu egizio in corrispondenza della pinna anale

La tecnica FORS, oltre a confermare l'effettiva presenza di blu egizio, individuata preliminarmente con la tecnica VIL, ha messo in evidenza una probabile diversa modalità di utilizzo del pigmento rispetto a quello rilevato nel frammento egizio: gli spettri ottenuti, infatti, hanno mostrato degli andamenti molto differenti, tanto da far presumere che il blu egizio sia stato utilizzato quasi sicuramente in miscela.

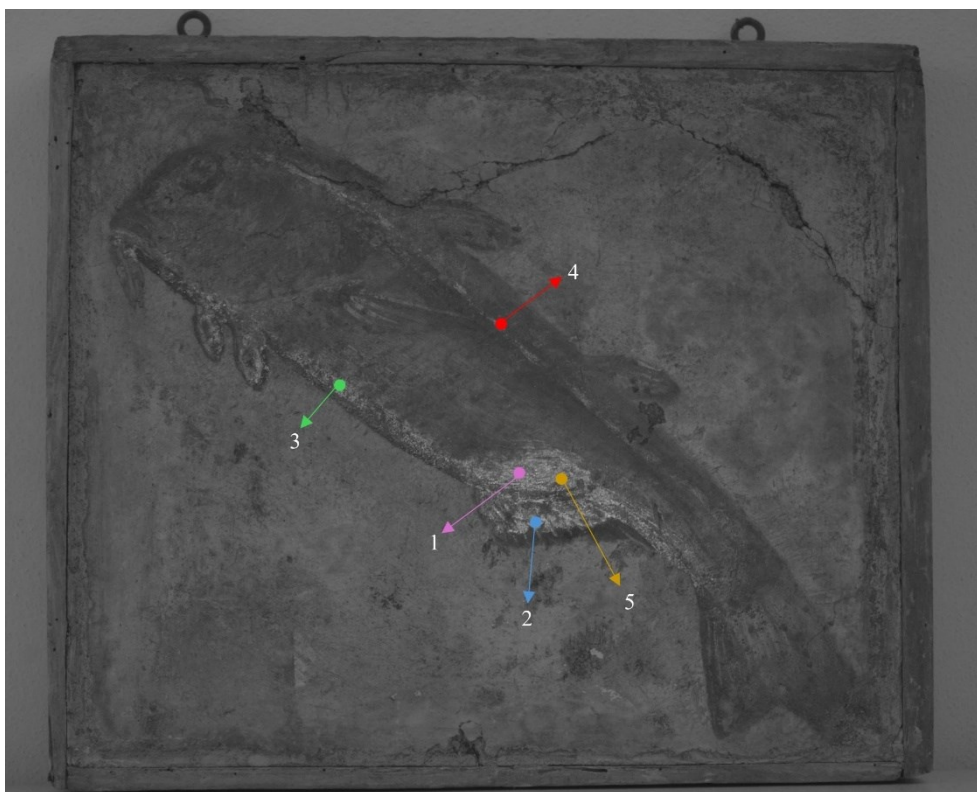


Fig. 31: Punti di misura FORS

Come è possibile osservare dal grafico a fig. 32, ben visibile risulta essere il picco caratteristico del blu egizio a ca. 930 nm; tuttavia, se confrontiamo tale spettro con quello rilevato nel frammento egizio, notiamo una considerevole differenza nell'andamento della curva, specie tra 570 nm e 800 nm. Proprio tale andamento ha portato a ritenere – con un certo grado di sicurezza – che il blu egizio in questo caso non sia puro, bensì inserito all'interno di una miscela. Più difficoltoso risulta definire tale miscela, servirebbero infatti ulteriori studi e l'impiego di altre tecniche per appurare in modo certo la natura degli ulteriori pigmenti. Tra i pigmenti che con più probabilità potrebbero essere stati mescolati con il blu egizio, si annoverano le ocre gialle e le terre verdi. L'ipotesi del blu egizio utilizzato in miscela è peraltro plausibile se si pensa ad altri studi in merito, *in primis* a quelli sulla *Tomba del Tuffatore* di Paestum. Proprio nella *Tomba del Tuffatore*,

infatti, è stato riscontrato che il blu egiziano non veniva utilizzato solo per dipingere le aree blu ma anche per creare diverse sfumature¹³¹. Risultati simili sono emersi anche dallo studio di affreschi di altre tombe di Paestum¹³²: analisi XRF e RAMAN hanno consentito l'identificazione dei pigmenti utilizzati¹³³ ed è stato osservato che il blu egizio compariva frequentemente in associazione con ocre gialla e ocre rossa, spesso in combinazione anche per la creazione di verdi. Inoltre, nelle poche tombe caratterizzate da pigmenti blu, è stato riscontrato che il blu egizio era la componente principale, anche se presentava diverse impurità (ossidi di ferro e carbonio).

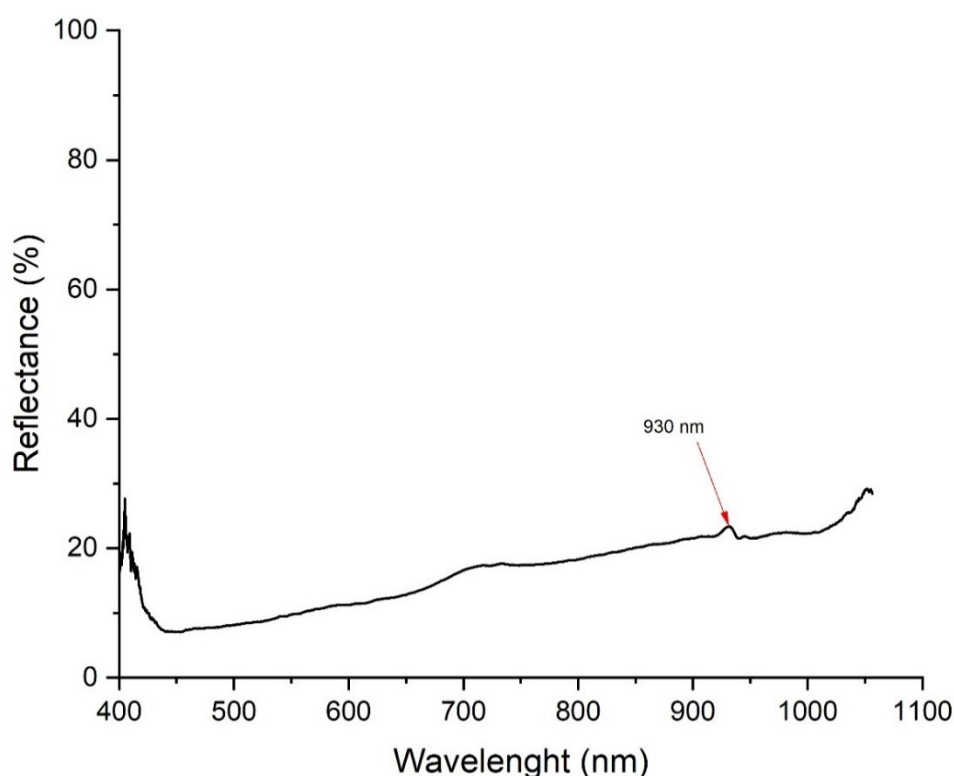


Fig. 32: Spettro FORS del pt.1 del lacerto di affresco, con indicazione del picco caratteristico del blu egizio a 930 nm.

Inoltre, se proviamo a mettere a confronto tale spettro con quelli di alcuni database¹³⁴, notiamo che ci sono effettivamente delle analogie proprio con gli spettri caratteristici delle ocre gialle e delle terre verdi.

¹³¹ In particolare, su una lastra della tomba è raffigurata una persona che indossa una veste che presenta del blu egiziano, anche se alla luce visibile la veste appare quasi bianca con qualche linea nera. In questo caso, la piccola quantità di pigmento blu è stata utilizzata intenzionalmente per conferire una tonalità più fredda al gilet (<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0232375#pone.0232375.ref013>)

¹³² Ferrari et al. 2018

¹³³ Tabelle con i risultati ottenuti consultabili in Ferrari et al. 2018, p. 828

¹³⁴ Si rimanda a nota n° 8 per i database di riferimento.

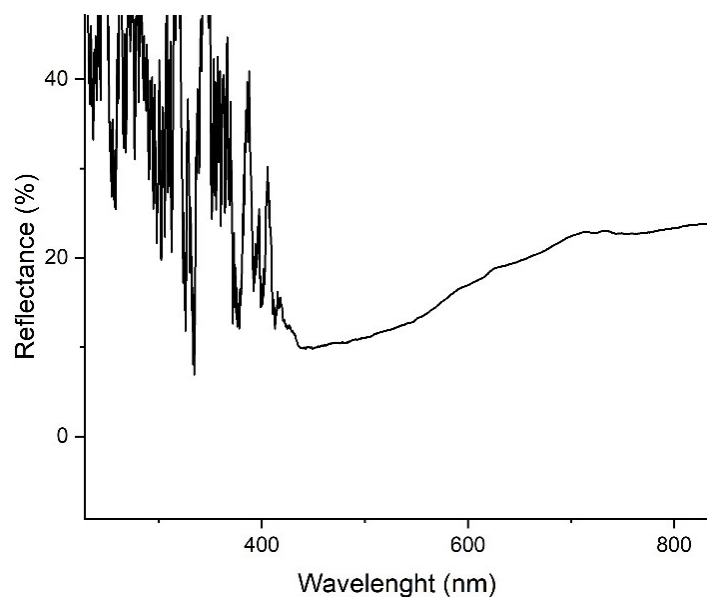


Fig. 33: Focus dello spettro FORS del pt.4 del lacerto di affresco romano

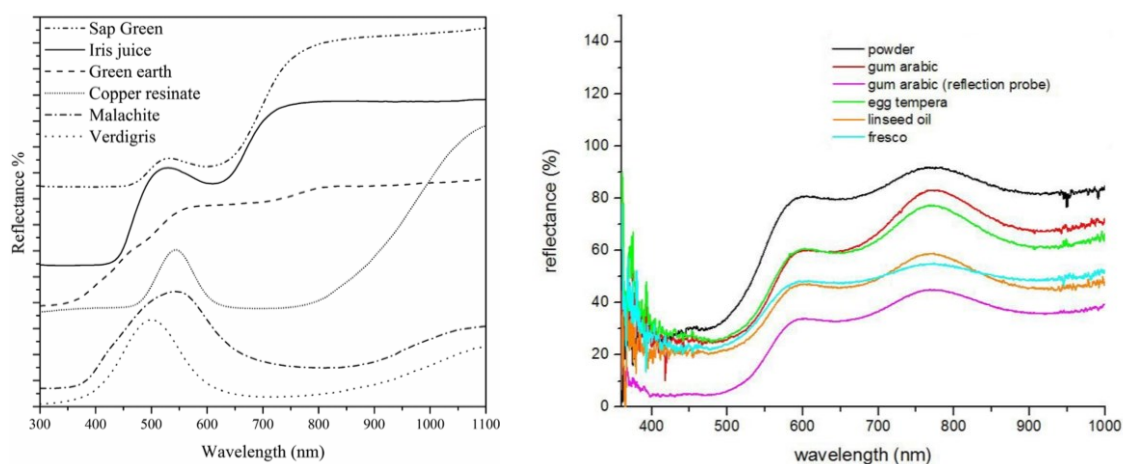


Fig. 34: Spettri FORS dei pigmenti verdi a sinistra (Aceto et al. 2014) e degli spettri dell'ocra gialla a destra (Cosentino 2014)

Evidente, dunque, risulta essere l'utilizzo di ulteriori pigmenti oltre al blu egizio nell'affresco romano, emersi grazie alle indicazioni fornite dalla tecnica FORS, nonostante questa non permetta di individuare la composizione della miscela e le percentuali degli ulteriori pigmenti. Per ottenere tali informazioni bisognerebbe ricorrere all'impiego dell'XRF, del RAMAN o di tecniche micro-invasive che consentano di esaminare in laboratorio la struttura chimica del pigmento su un microcampione di stratigrafia.

4.5 La statuetta di danzatrice bacchica (Merlin124)



Fig. 35: Immagine VIL dell'intera statuetta e particolare della zona di fluorescenza del blu egizio in corrispondenza del seno e della mano sinistra.

Nel caso della statuetta di danzatrice le tracce di blu egizio sono apparse molto esigue in corrispondenza del seno della donna e di un dito della mano sinistra. Flebili tracce di blu egiziano sembravano poi essere presenti sul braccio destro della statuetta, (probabilmente si tratta solamente di piccoli granelli di pigmento scivolati durante la stesura).

Come per i manufatti precedenti, dopo un primo approccio con la VIL si è passati alla tecnica FORS, di non semplicissimo impiego in questo caso date le tracce molto di blu egizio. Ciò nonostante, si è comunque riusciti ad acquisire tutti i dati sui punti utili ai fini dello studio.



Fig. 36: Schema di misura FORS

I dati emersi da queste analisi indicano certamente una presenza di blu egizio ma, forse, non un utilizzo puro del pigmento, specie nel pt.2 e nel pt.5. In questi due punti, per prima cosa, è possibile osservare come il picco caratteristico del blu egizio sia leggermente spostato, a ca. 945 nm (nei casi visti in precedenza risultava sempre a ca. 930 nm). Secondo alcuni autori (es. Cosentino) il picco del blu egizio sarebbe tuttavia proprio identificabile intorno a 950 nm¹³⁵.

¹³⁵ Cosentino 2014: “Egyptian blue shows two absorption bands near 800 nm and 630 nm, and is also characterized by the presence of a peak at 950 nm which could be assigned to its infrared fluorescence, and is visible with every binder”.

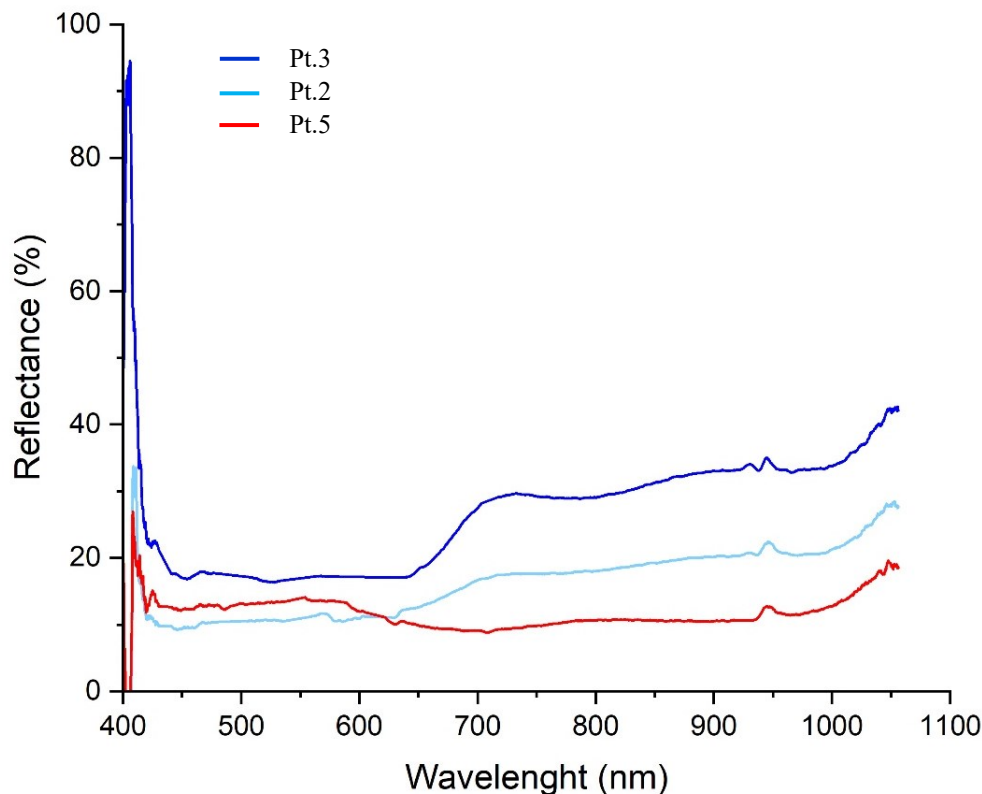


Fig. 37: Confronto tra pt.3 (blu), pt.2 (celeste), pt.5 (rosso) della statuetta Merlin124. È possibile vedere come tutti gli spettri presentino un picco a ca. 945 nm.

Nel grafico di fig. 37 si osserva come le curve dei 3 spettri siano piuttosto differenti le une dalle altre, a parte per la presenza di un picco – in tutti e 3 i casi – a 945 nm. Per quanto riguarda l’andamento dello spettro del pt.3 possiamo affermare che sia piuttosto caratteristico del blu egizio, sono infatti presenti – seppur non molto marcate – le due bande di assorbimento a ca. 640 e 800 nm e il picco a 930 nm.

Un andamento simile allo spettro del pt.2, invece, lo avevamo visto nel caso del lacerto di affresco romano AR12, anche in quel caso si era ipotizzato l’impiego del blu egizio in miscela, probabilmente con ocra gialla o terra verde. Rispetto ad AR12, tuttavia, la banda di assorbimento sembra essere leggermente spostata verso numeri più caratteristici del blu egizio. Ciò potrebbe attribuirsi ad una maggior quantità di blu egiziano nella statuetta Merlin124 rispetto al lacerto di affresco AR12.

Per comprendere effettivamente con cosa potrebbe essere stato mescolato il blu egizio sarebbe sicuramente utile provare a ricreare, in via sperimentale, le possibili miscele in cui potrebbe essere stato impiegato il pigmento. Uno studio simile, infatti, permetterebbe di comprendere come variano gli spettri, anche sulla base delle differenti percentuali di

un pigmento in miscela. Studi simili sono stati compiuti, (si veda ad esempio la Iannacone), proprio con la finalità di verificare come cambi la curva dello spettro del blu egizio in base al pigmento con cui è in miscela e in base alla percentuale dello stesso all'interno della miscela. Del resto, già con la tecnica VIL, sembrerebbe che quando la concentrazione di blu egizio è poco elevata all'interno della miscela, vi siano delle differenze apprezzabili nella risposta in luminescenza. Secondo gli studi condotti dalla Iannacone, le differenze di luminescenza diventano visivamente apprezzabili solo per concentrazioni di blu egizio minori del 50%¹³⁶.

4.6 La statuetta stante (Merlin123)



Fig. 38: Immagine VIL dell'intera statuetta e particolare della zona di fluorescenza del blu egizio in corrispondenza del panneggio della veste.

Come per gli oggetti precedentemente analizzati e discussi, anche in questo caso la tecnica VIL ha permesso di identificare preliminarmente la presenza di blu egizio, che è qui stata riscontrata in corrispondenza del panneggio della veste. Rispetto alla statuetta

¹³⁶ Iannacone 2012-14, pp. 70-80

Merlin124, le tracce di pigmento qui erano molto più estese, semplificando l'impiego della tecnica FORS che, ha restituito spettri caratteristici del blu egizio (fig. 40).

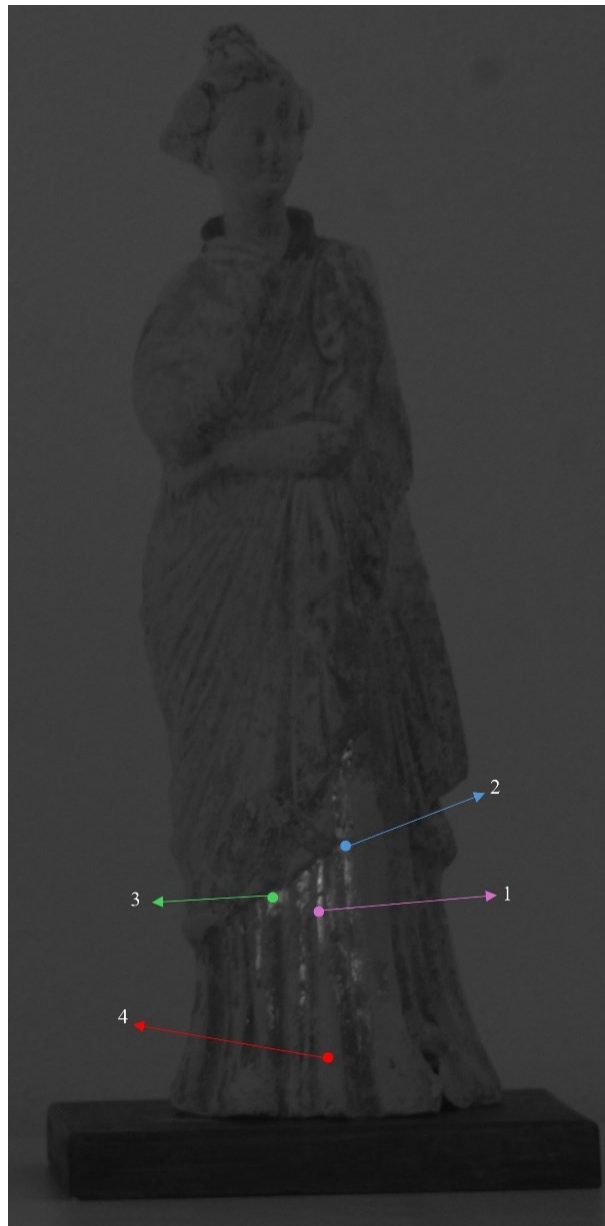


Fig. 39: Punti di misura FORS

Dunque, pur trattandosi di due statuette, apparentemente del medesimo periodo (IV sec. a.C.), le stesse presentano delle differenze piuttosto notevoli dal punto di vista spettroscopico, imputabili ad un differente impiego del pigmento, anche per quanto riguarda le zone in cui questo è stato adoperato. In questo caso, infatti, sembrerebbe essere stato utilizzato esclusivamente per il pannello della parte bassa della veste. Un simile uso del blu sembrerebbe del resto trovare conferma anche in alcune fonti greche. Bruno,

ad esempio, suggerisce che gli artisti greci considerassero il blu non come un colore ma come un medium scurente, utilizzato per modificare l'aspetto degli altri pigmenti. Plinio il Vecchio¹³⁷ menziona l'uso di più di un materiale blu (*caeruleum*) proveniente dall'Egitto, dall'Iran (Sciti) e da Cipro, utilizzato per creare ombre¹³⁸. Un tale uso del blu egiziano, inoltre, è stato osservato nei dipinti e nei pannelli egiziani-romani di Tebtunis¹³⁹, che suggeriscono proprio un forte legame con queste tradizioni pittoriche greche.

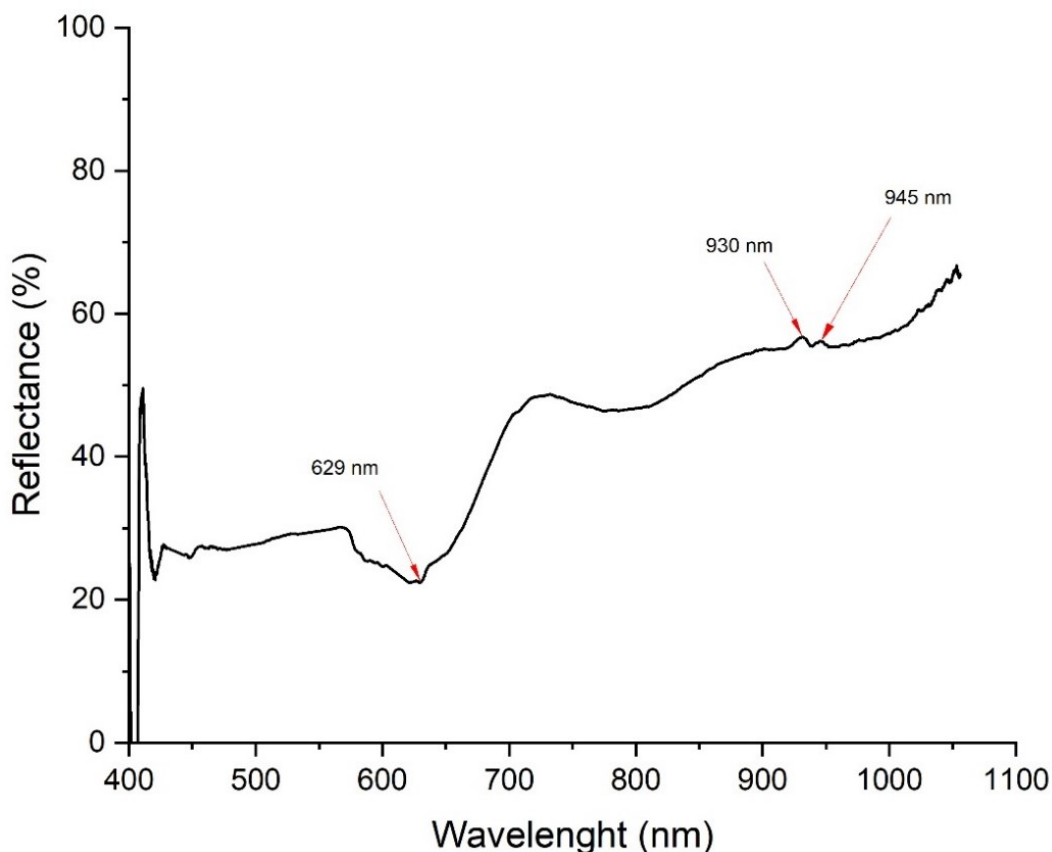


Fig. 40: Spettro FORS del pt.1 della statuetta Merlin123, con indicazione del punto di massimo assorbimento (629 nm), del picco caratteristico del blu egizio (930 nm) e di un secondo picco (945 nm)

Dal grafico di fig. 40 si può osservare come lo spettro del pt.1 della statuetta Merlin123 rispetti in modo piuttosto preciso quello che è l'andamento di un tipico spettro del blu egizio: con punti di massimo assorbimento a 629 e 800 nm e dei picchi di riflettanza tra 930 e 945 nm. Questi andamenti sono stati riscontrati su tre punti presi in esame (fig. 41),

¹³⁷ Libro XXXII, 57

¹³⁸ Libro XXXV, 11

¹³⁹ Ganio et al. 2015

con l'eccezione del pt.4, che è stato scelto in modo arbitrario come punto di background, per evidenziare quelle che erano le differenze con le aree caratterizzate dal pigmento blu.

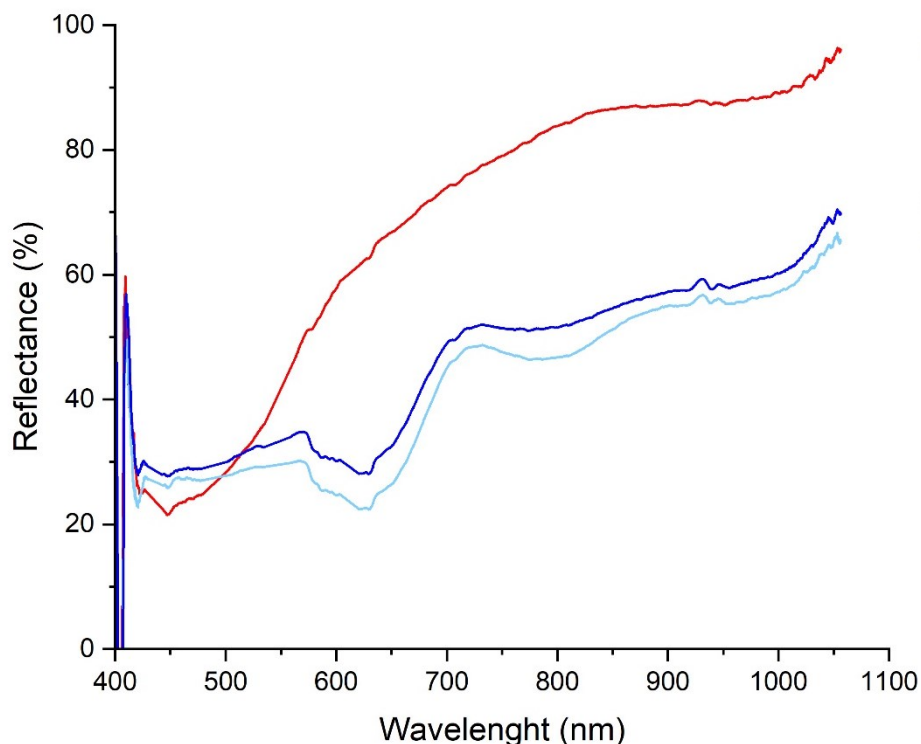


Fig. 41: Confronto tra pt.1 (celeste), pt.2 (blu), pt.4 (rosso) della statuette Merlin124. È possibile vedere come tutti gli spettri, escluso quello relativo al pt.4 (scelto come punto di background), presentino l'andamento caratteristico dello spettro del blu egizio.

Dunque, per quanto riguarda la statuette Merlin123 possiamo affermare con certezza la presenza di blu egizio utilizzato puro, visti gli spettri ottenuti.

4.7 Discussione dei risultati

Impossibile non affermare che vi siano delle differenze tra i manufatti presi in esame, è infatti evidente che il blu egizio, seppur presente su tutti gli oggetti analizzati, non sia stato impiegato allo stesso modo (fig. 42): nel frammento egizio (E48) e nella statuette Merlin123 sembrerebbe trattarsi di uso puro del pigmento (nonostante vi siano comunque delle leggere differenze negli spettri); nel lacerto di affresco (AR12) il blu egizio sembrerebbe invece trovarsi in miscela e in una percentuale piuttosto bassa, considerato l'unico leggero picco a ca. 930 nm; infine, nella statuette Merlin124, il blu egizio è certamente presente ma, anche a causa delle esigue tracce riscontrate, gli spettri FORS non permettono di comprendere affondo se questo sia stato utilizzato mescolato con altri pigmenti o se, invece, vi sia stato un uso puro del pigmento. Nel caso in cui questo

compaia in miscela, poi, non è semplice stabilire con quale/i pigmento/i sia stato mescolato. Probabile, per lo meno nel caso dell'affresco AR12, che il blu egizio sia stato miscelato con ocre gialla o terra verde. Indubbiamente sarebbero necessarie ulteriori e più approfondite analisi per tentare di rispondere a questi dubbi.

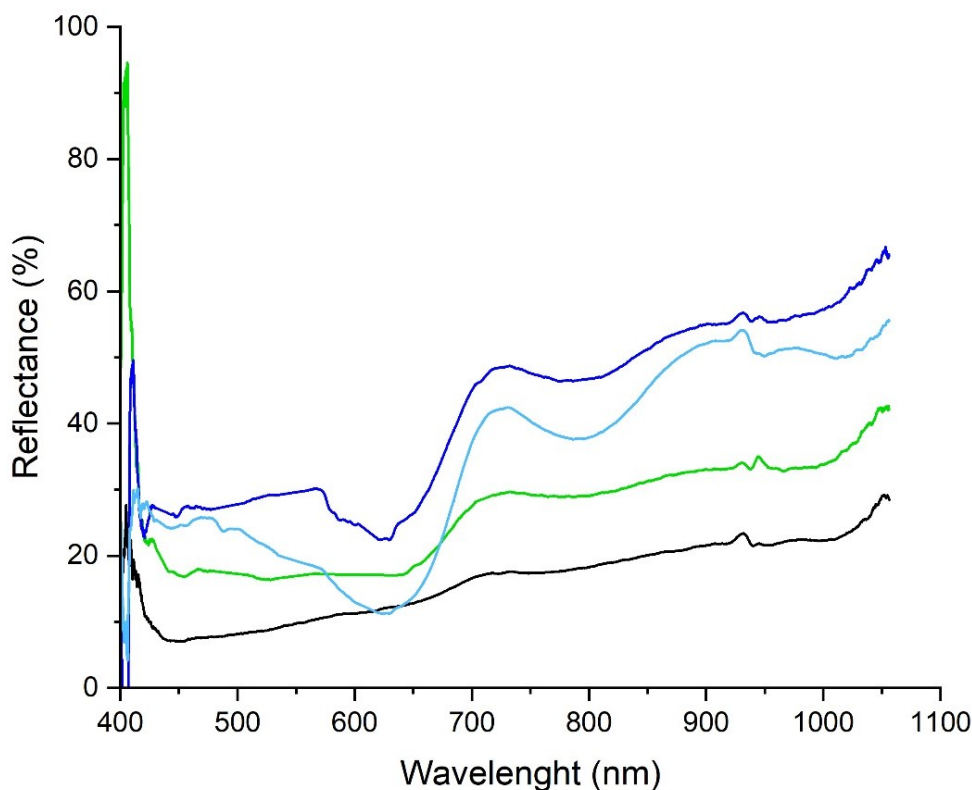


Fig. 42: Confronto tra uno spettro caratteristico di ogni manufatto preso in esame: statuetta Merlin123 (blu), fr. egizio E48 (celeste), statuetta Merlin124 (verde), lacerto affresco AR12 (nero). Evidenti le differenze che intercorrono negli spettri dei diversi reperti.

Dal grafico di fig. 20 emerge in maniera chiara ed evidente quelle che sono le differenze nell'impiego del blu egizio riscontrate in questo studio comparativo. Notiamo in particolare che, seppur simili, gli andamenti degli spettri della statuetta Merlin123 (in blu) e del frammento egizio E48 (in celeste) non risultano comunque uguali, specie per quanto riguarda le bande di assorbimento a ca. 629 e 800 nm, molto meno accentuate nella statuetta Merlin123 rispetto al frammento egizio E48. Inoltre, anche per quanto riguarda i picchi dei medesimi oggetti si notano delle differenze. Se, infatti, il frammento egizio presenta un unico picco molto accentuato a 930 nm, lo stesso non si può assumere per la statuetta Merlin123, che presenta sempre un picco a 930 nm, ma molto meno accentuato e, in più, presenta un secondo picco a ca. 945 nm (picco assente nel fr. egizio).

Per quanto riguarda l'uso in miscela, in particolare per l'età romana, era piuttosto attestato un uso simile del blu egizio. Spesso, infatti, è stato trovato mescolato con ocra gialla (per creare o ravvivare i verdi), con ematite¹⁴⁰ (per la creazione di viola) o, ancora, con il bianco (per dare lucentezza a occhi, volti ecc.). Il blu egizio, inoltre, in alcuni casi è stato trovato impiegato come sotto-disegno, specie per i ritratti su tavola¹⁴¹. Un simile uso del blu egizio ha aperto anche una serie di interrogativi sull'ampia disponibilità di blu egiziano durante il periodo romano, suggerendo che fosse così abbondante da poter essere un sostituto del nerofumo o del gesso¹⁴². La popolarità del blu egiziano in epoca romana può essere in parte spiegata dalla sua probabile non ancora attestata accessibilità economica, contrariamente all'ipotesi che il pigmento fosse in generale sempre costoso a causa del suo complesso processo di produzione, sebbene le prove archeologiche e letterarie indichino il contrario. Il blu egizio veniva spesso utilizzato anche per decorare oggetti di scarso valore monetario, come figurine di terracotta prodotte in serie, a conferma che il pigmento non era né raro né proibitivamente costoso. Infatti, il blu egiziano è il terzo pigmento grezzo più comunemente trovato a Pompei, subito dopo l'ocra rossa e gialla¹⁴³.

Luciano peraltro usa la parola greca per blu egiziano, κύανος, in un dialogo in cui Licino ammonisce Lessifane per il suo stile oratorio, dicendogli che somiglia alle figurine vendute nell'agorà, colorate (κεχρωσμένος) di blu (κύανος) e rosso (μίλτος) e realizzate di argilla fragile (εὔθροπτος) all'interno. Il commento, chiaramente, vuole essere dispregiativo, paragonando i pigmenti blu e rossi a sforzi economici per rivestire un nucleo senza valore¹⁴⁴.

Intorno al 70 d.C., inoltre, Plinio il Vecchio menziona una fascia di prezzo compresa tra otto e undici denari per libbra di *caeruleum*, blu egiziano, a seconda della qualità del pigmento, veduto perciò quasi allo stesso prezzo della buona ocra rossa, *sinopis*, che veniva venduta per dodici denari a libbra. Il blu egiziano veniva venduto ad un prezzo inferiore anche rispetto all'indaco, *indicum*, il cui costo si aggirava intorno ai

¹⁴⁰ Siddall 2016

¹⁴¹ Cfr. *Mummy Portraits of Roman Egypt* per comprendere come veniva impiegato il blu egizio nei ritratti di mummie durante l'Impero Romano.

¹⁴² Ganio et al. 2015

¹⁴³ Thiboutot 2020

¹⁴⁴ Thiboutot 2020

diciassette/venti denari a libbra. Naturalmente, bisogna tenere conto che questi costi variavano in base alla domanda, alla disponibilità e all'inflazione.

Per poter avanzare proposte su questo aspetto sarebbero necessarie ulteriori indagini e studi, ovviamente su un numero di campioni più elevato rispetto a quanto esplorato preliminarmente in questo lavoro di tesi.

Conclusioni

I quattro reperti scelti per questo studio, provenienti dal Museo di Scienze Archeologiche e d'Arte dell'Università degli Studi di Padova, sono stati studiati con l'obiettivo di identificare e localizzare spazialmente il blu egizio e verificare delle possibili differenze nel suo impiego.

Con questo studio è stata messa in evidenza la presenza di blu egizio e, soprattutto, l'esistenza di significative differenze nella composizione e nell'impiego di tale pigmento. I diversi manufatti presi in esame, infatti, presentano un uso svariato del blu egizio per quanto riguarda le modalità di impiego (puro o in miscela), le aree in cui è stato adoperato (vesti, ornamenti, parti del corpo di animali) e le superfici dove è stato utilizzato (calcare, terracotta, intonaco).

Si può affermare, già solo attraverso lo studio di questi pochi reperti, come siano davvero molteplici gli usi che ne sono stati fatti del blu egizio nel corso della storia. Sembra infatti trattarsi di un pigmento estremamente versatile, che si presta bene a svariati usi, in primis quello di essere miscelato con altri pigmenti per apportare effetti particolari e suggestivi nei punti dove viene steso. Poteva essere usato per aumentare la brillantezza ma, allo stesso tempo, anche come scurente, a seconda, quindi, delle modalità in cui si sceglieva di adoperarlo.

Per condurre tale studio ci si è avvalsi esclusivamente di tecniche di indagine non invasive. La VIL ha dimostrato di essere un ottimo strumento per l'identificazione del blu egizio. Sono poi state condotte analisi complementari e puntuali con la FORS, che ha confermato la presenza di blu egiziano in ciascuna delle aree in cui è stata registrata una brillante luminescenza. La FORS, inoltre, ha permesso di caratterizzare la risposta spettrale delle diverse superfici contenenti blu egizio, identificandone le differenze. Sono infatti emerse notevoli discrepanze tra i reperti presi in esame, in particolare nel caso del lacerto di affresco romano AR12 e della statuetta Merlin124, che presentano degli spettri molto differenti da quelli caratteristici del blu egizio – nonostante la VIL e la FORS abbiano confermato con sicurezza la presenza di blu egiziano.

Interessante sarebbe certamente condurre uno studio più ampio, prendendo in esame un maggior numero di campioni per verificare se sia possibile individuare delle analogie tra

reperiti appartenenti alle medesime epoche. Vedendo questi dati, infatti, spontaneo è stato chiedersi se sia possibile individuare un modo comune di utilizzare il pigmento nei diversi periodi storici. Del resto, recenti studi sembrano proprio mettere in evidenza come nel mondo romano – e in parte anche greco – vi fosse un uso del blu egiziano ben diverso da quello del mondo egizio.

Oltre a questi usi differenti del pigmento, sarebbe poi interessante verificare le varianti con cui si presenta il blu egizio. Impossibile che la sua “ricetta” sia rimasta inalterata nel corso del tempo, sia per l’inesistenza di una ricetta vera e propria sia per i molteplici e svariati impieghi di tale colore.

Bibliografia e sitografia

ABDRABOU A. et al. *The application of multispectral imaging and reflectance transformation imaging to an ancient Egyptian polychrome wooden stela*, 2017 (doi: 10.13140/RG.2.2.27181.18404)

ACCORSI et al., *The exceptional near-infrared luminescence properties of cuprorivaite (Egyptian blue) in The Royal Society of Chemistry*, 2009, pp. 3392-3394 (doi: [10.1039/b902563d](https://doi.org/10.1039/b902563d))

ACETO M. et al., *Characterisation of colourants on illuminated manuscripts by portable fibre optic UV-visible-NIR reflectance spectrophotometry*, *Analytical Methods*, 6, 2014, pp. 1488-1500 (doi: 10.1039/c3ay41904e)

ALBERGHINA M.F. et al., *The Tomb of the Diver and the frescoed tombs in Paestum (southern Italy): New insights from a comparative archaeometric study*, *PLOS ONE*, 2020 (doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232375>)

ALIATIS I. et al., *Pigments used in Roman wall paintings in the Vesuvian area*, *J Raman Spectrosc.*, 2010, vol. 41, pp. 1537–1542.

ALFED M. et al., *MA-XRF and hyperspectral reflectance imaging for visualizing traces of antique polychromy on the Frieze of the Siphnian Treasury*, *Microchemical Journal*, 2018, pp. 395-403.

APPOLONIA L. et al., *Una nuova strumentazione per il LAS: lo spettrometro Raman* (<https://www.regione.vda.it/allegato.aspx?pk=39337>)

BACCI M., *Fibre optics applications to works of art*, *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 29, Issues 1–3, 1995, pp. 190-196 (doi: [https://doi.org/10.1016/0925-4005\(95\)01682-1](https://doi.org/10.1016/0925-4005(95)01682-1))

BAINES J., *Color Terminology and Color Classification: Ancient Egyptian Color Terminology and Polychromy*, *Wiley on behalf of the American Anthropological Association*, 1985, vol. 87, n° 2, pp. 282-297 (doi: <https://www.jstor.org/stable/678562>)

BARALDI P., NATALUCCI M., ROSSI A., *Il blu egiziano a Kainua: dai pigmenti alla policromia su terracotta* In *OCNUS, Quaderni della Scuola di Specializzazione in Beni Archeologici*, 2017, Ante Quem, Bologna.

BECKER H., *Pigment nomenclature in the ancient Near East, Greece, and Rome*, in *Archaeological and Anthropological Sciences* (a cura di Gliozzo E. et al., 2021 (doi: <https://doi.org/10.1007/s12520-021-01394-1>)

BELL I.M., CLARK R.J.H., GIBBS P.J., *Raman spectroscopic library of natural and synthetic pigments (P re- N 1850 AD)*, Spectrochimica Acta Part A, n° 53, 1997, pp. 2159-2179 (doi: [https://doi.org/10.1016/S1386-1425\(97\)00140-6](https://doi.org/10.1016/S1386-1425(97)00140-6))

BELLINI M., *Il blu egizio e il simbolo. Una nota* in *Materiali di Estetica: il linguaggio dei colori* (a cura) di Amico D. e Scaramuzza G., 2023, pp.67-80 (doi: 10.54103/mde.i10.1-2.20617)

BENSON J., *Greek Color Theory and the Four Elements*, University of Massachusetts Amherst, vol. 1, 2000 (https://scholarworks.umass.edu/art_jbge)

BERETTA M., *A cultural history of chemistry in antiquity*, vol. 1, Bloomsbury Publishing Plc, Londra, 2022.

BERKE H., *Chemistry in Ancient Times: The Development of Blue and Purple Pigments*, *Angewandte Chemie (International ed. in English)*, Weinheim, Germania, 2002, pp. 2483-7. (doi: [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20020715\)41:14<2483::AID-ANIE2483>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20020715)41:14<2483::AID-ANIE2483>3.0.CO;2-U))

BERKE H., *The invention of blue and purple pigments in ancient times*, The Royal Society of Chemistry, 2006, pp. 15-30 (doi: 10.1039/b606268g)

BONANOMI F., *L'utilizzo dell'imaging multispettrale per lo studio degli ostraka inediti del Museo di Scienze Archeologiche e d'Arte dell'Università degli Studi di Padova*, Tesi di Laurea Magistrale in Scienze Archeologiche, Università degli Studi di Padova, 2022.

BULLOCK L., *Reflectance Spectrophotometry for Measurement of Colour Change*, Londra, National Gallery Technical Bulletin 2, 1978, pp. 49-55.

BURGIO L, CLARK R.J.H., *Library of FT-Raman spectra of pigments, minerals, pigment media and varnishes, and supplement to existing library of Raman spectra of pigments with visible excitation*, Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, vol. 57, 2000, pp. 1491-1521 (doi: [https://doi.org/10.1016/S1386-1425\(00\)00495-9](https://doi.org/10.1016/S1386-1425(00)00495-9))

CAGGIANI M.C., COLOMBAN P., *Raman microspectroscopy for Cultural Heritage studies* in *Physical Sciences Reviews*, vol. 3, no. 11, 2018 (doi: <https://doi.org/10.1515/psr-2018-0007>)

CARRARA N., MENEGAZZI A., MOSER S., *Collezionismo egittologico all'Università di Padova: i reperti dei Musei di Scienze Archeologiche e d'Arte e di Antropologia*, in *Bollettino del Museo Civico di Padova*, Skira editore spa, Milano, 2010

CASTRO K. et al., *Noninvasive and nondestructive NMR, Raman and XRF analysis of a Blaeu coloured map from the seventeenth century*, *Anal Bioanal Chem* vol. 391, 2008, pp. 233-441 (doi: <https://doi.org/10.1007/s00216-008-2001-4>)

CAVASSA L., *La production du bleu égyptien durant l'époque hellénistique et l'Empire romain (IIIe av. J.-C.-Ier s. apr. J.-C.)*, École française d'Athènes, 2018 (doi: <https://shs.hal.science/halshs-02049231>)

CHIARI G., *Photoluminescence of Egyptian Blue*, 2018 (doi: 10.1002/9781119188230.saseas0453)

COLOMBAN P., GOUADEC G., *Raman Scattering: Theory and Elements of Raman Instrumentation*, in *Raman Spectroscopy for soft matter applications*, Editore da Maher S. Amer, 2008, pp. 11-29.

COLOMBAN P., *On-site Raman study of artwork: Procedure and illustrative examples*, *Journal of Raman Spectroscopy*, 2018, 49 (6), pp. 921-934. (doi: [10.1002/jrs.5311](https://doi.org/10.1002/jrs.5311))

COSENTINO A., *Identification of pigments by multispectral imaging; a flowchart method* in *Heritage Science*, 2014 (doi: <http://www.heritagesciencejournal.com/content/2/1/8>)

COSENTINO A., *FORS, Fiber Optics Reflectance Spectroscopy con gli spettrometri miniaturizzati per l'identificazione dei pigmenti*, in *Tecnologie per i beni culturali*, *Archeomatica* n° 1, 2014.

COSENTINO A., *FORS Spectral Database of Historical Pigments in Different Binders*, *E-conservation Journal*, 2, 2014, pp. 57-68 (doi: 10.18236/econs2.201410)

DARIZ P., SCHMID T., *Trace compounds in Early Medieval Egyptian blue carry information on provenance, manufacture, application, and ageing*, 2021 (doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90759-6>)

DAVIDOVITIS F., *Vitruvio e la sua ricetta di fabbricazione del pigmento "blu egiziano"*, in *Atti del II Convegno multidisciplinare sul vetro in Italia meridionale ed insulare, Settima Giornata Nazionale di Studio-Comitato italiano Comitato Association Internationale pour l'Histoire du Verre*, Napoli 5-7 Dicembre 2001, F. Sogliani, C. Piccioli (eds), A.I.E.S. Beni Culturali-Crysos s.r.l.-Interservice s.a.s, Naples, 2003, p. 297-302.

DYER J., VERRI G., CUPITT J., *Multispectral Imaging in Reflectance and Photo-induced Luminescence modes: A User Manual*, 2013.

DYER J., SOTIROPOULOU S., *A technical step forward in the integration of visible-induced luminescence imaging methods for the study of ancient polychromy* in Heritage Science, 2017 (doi: 10.1186/s40494-017-0137-2)

ES SEBAR L. et al., 3D Multispectral Imaging for Cultural Heritage Preservation: The Case Study of a Wooden Sculpture of the Museo Egizio di Torino in Heritage n°6, 2023, pp. 2783-2795 (doi: <https://doi.org/10.3390/heritage6030148>)

FAVARETTO I., GHEDINI F., ZANOVELLO P., CIAMPINI E. M. (a cura di), *Anti, Archeologia, Archivi*, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Venezia, 2019

FERRARI G. et al., *Images and colors from the tombs of Paestum: a multidisciplinary study of the pigments in the flora and fauna iconography*, Journal of Archaeological Science, vol. 20, 2018, pp. 818-833 (doi: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.05.008>)

FINLAY V., *The brilliant history of a color in art*, Getty Publications, Los Angeles, 2004.

GANIO M. et al., *Investigating the use of Egyptian blue in Roman Egyptian portraits and panels from Tebtunis, Egypt*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015, pp. 813-821 (doi: <https://doi.org/10.1007/s00339-015-9424-5>)

GIGANTE G.E. *La tecnica della Fluorescenza a raggi X*, in Metodologie fisiche non distruttive per le indagini sui Beni Culturali (a cura) di Giovanni E. Gigante e Maurizio Diana, edito dal CSA dell'Università degli studi di Roma "La Sapienza", 2005, pp. 177-201.

GROS P., CORSO A., ROMANO E., Vitruvio, *De architectura*, 2 vol., Giulio Einaudi editore, Torino, 1997.

HATTON G.D., SHORTLAND A.J., TITE M.S., *The production technology of Egyptian blue and green frits from second millennium BC Egypt and Mesopotamia*, Journal of Archaeological Science, 2008 (doi: 10.1016/j.jas.2007.11.008)

IANNACONE R., *Tecniche di imaging innovative per la messa a punto di un protocollo integrato per la caratterizzazione dei pigmenti utilizzati nell'antichità*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Scienza per la Conservazione dei Beni Culturali, Università degli Studi di Firenze, 2012-14.

JEHLICKA J., CULKA A., BERSANI D., VANDENBEELE P., Comparison of seven portable Raman spectrometers: beryl as a case study, Wiley Online Library, 2017 (doi: 10.1002/jrs.5214)

KAKOULLI I., *Late Classical and Hellenistic painting techniques and materials: a review of the technical literature*, *Studies in Conservation*, 2002, pp. 56-67 (doi: 10.1179/sic.2002.47.Supplement-1.56)

LEONA M., WINTER J., *Fiber Optics Reflectance Spectroscopy: A Unique Tool for the Investigation of Japanese Paintings*, *Studies in Conservation*, 2001, vol. 46, n° 3, pp. 153-162 (doi: <https://www.jstor.org/stable/1506806>)

LEONA M. et al., *Non-destructive Identification of Natural and Synthetic Organic Colorants in Works of Art by Surface Enhanced Raman Scattering* in *Analytical Chemistry*, American Chemical Society, 2011, pp. 3990–3993 (doi: <https://doi.org/10.1021/ac2007015>)

LIU W. et al., *A new application of Fiber optics reflection spectroscopy (FORS): Identification of “bronze disease” induced corrosion products on ancient bronzes*, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 49, 2021, pp. 19-27 (doi: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.03.007>)

MASIC A., NICOLA M., *NIR Luminescence and Composition of Egyptian Blue as Markers in Archaeometric Evaluations* in *Microscopy and Microanalysis*. 2021, pp. 3004-3006 (doi: 10.1017/S1431927621010448)

MARKETOU A.K., *The materialisation of colour: Reconstructing Egyptian blue manufacture on late Hellenistic Kos*, *Norwegian Archaeological Review*, 2022, vol. 55, No. 1, pp. 21–37, (doi: <https://doi.org/10.1080/00293652.2022.2052746>)

MENEGAZZI A., *Carlo Anti e il “suo” museo*, in: *Anti. Archeologia. Archivi*. Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Venezia, 2019, pp. 191–207.

MOSER S., *La collezione egizia del Museo di Scienze Archeologiche e d’Arte dell’Università di Padova: linee di una strategia di ricognizione analitica*, *Tesi di Laurea in Archeologia*, Università degli Studi di Padova, Facoltà di Lettere e Filosofia, 2004-2005.

MUSUMECI A. *Le terracotte figurate della necropoli di contrada Casino in Centuripe* in *Centuripe*. Indagini archeologiche e prospettive di ricerca (a cura di Biondi G., CNR, Enna, 2010).

NICOLA M., MUSSO S., PETACCHI S., *Tecniche diagnostiche non invasive nell’autenticazione e studio dei reperti egizi: la fluorescenza dei raggi X (XRF) e la luminescenza indotta da visibile (VIL)*, XIII Congresso Nazionale IGIIC, Lo Stato dell’Arte, Centro Conservazione e Restauro La Venaria Reale, 2015.

PANAGOPOULOU A., KARANASIOS K., XANTHOPOULOU G., *Ancient Egyptian Blue (CaCuSi₄O₁₀) Pigment by Modern Solution Combustion Synthesis Method*, in Eurasian Chemico-Technological Journal, vol. 18, n° 1, 2016, pp. 31-37 (doi: 10.18321/ectj390)

PASTOREAU M., *Blue – The History of a color*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 2001.

PATANÈ R.P.A., “*Ceramica centuripina*” e terracotte teatrali, per le credenze sull’aldilà nella Sicilia romana, ACTA 44, 2016, pp. 255-265.

PAZ C., RODRIGUEZ-SIMON L.R., MANZANO E., *Spectroscopic study of mixtures of green copper pigments in fresh and aged model samples. Case studies on masterpieces from the Spanish Golden Age*, Journal of Cultural Heritage, vol. 59, 2023, pp. 217-230 (doi: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.12.004>)

PICCOLO M. et. al., *Fiber optics reflectance spectroscopy: a non-destructive technique for the analysis of works of art*, Edited by Martellucci et al., Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York, 2000.

POLACCO L., *Il museo di scienze archeologiche e d’arte dell’Università di Padova: storia e ordinamenti*, 1967, Stamperia di Venezia.

POLI T., ELIA A., CHIANTORE O., *Surface finishes and materials: fiber-optic reflectance spectroscopy (FORS) problems in cultural heritage diagnostics*, E-Preservation Science, 2009, pp. 174-179.

PORTALE E.C., “*Un fenomeno strano e inatteso*”: riflessioni sulla ceramica di Centuripe, in Pittura ellenistica in Italia e in Sicilia, Linguaggi e tradizioni. Atti del convegno di studi (Messina 2009) (a cura di) La Torre G., Torelli M., Giorgio Bretschneider Editore, Roma, 2011.

RADPOUR R., GATES G.A., KAKOULLI I., DELANEY J.K., *Identification and mapping of ancient pigments in a Roman Egyptian funerary portrait by application of reflectance and luminescence imaging spectroscopy*, Heritage Science, 2022 (doi: <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00639-5>)

REGGIANI N., *L’artigianato dei pigmenti colorati nell’antichità: note sul “blu” e “verde egizio” nelle testimonianze dei papiri*, in «Mediterraneo antico», XV, 1-2, 2012, pp. 393-40.

ROSSETTI C., TELLA P., *Rappresentazioni di fauna marina nella pittura romana*, in Annali della Facoltà di Lettere e Filosofia, Università di Siena, vol. XIV, Edizioni Cadmo, 1993, pp. 1-21.

SATHER M., *The Use of Egyptian Blue in Funerary Paintings from Roman Egypt*, in *Theses, Dissertations, and Student Creative Activity, School of Art, Art History and Design*, University of Nebraska, Lincoln, 2021.

SCHMIDT C.M., WALTON M.S., TRENTELMAN K., *Characterization of Lapis Lazuli Pigments Using a Multitechnique Analytical Approach: Implications for Identification and Geological Provenancing*, *Anal. Chem.* 2009, vol. 81, pp. 8513–8518 (doi: <https://doi.org/10.1021/ac901436g>)

SEYMOUR L.M. et al., *On the production of ancient Egyptian blue: Multi-modal characterization and micron-scale luminescence mapping*, Oksana Ostroverkhova, Oregon State University, 2020 (doi: <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0242549>)

SVOBODA M., CARTWRIGHT C. R., *Mummy Portraits of Roman Egypt* *Mummy Portraits of Roman Egypt Emerging Research from the APPEAR Project*, Getty Publications, Los Angeles, 2020.

THAVAPALAN S., WARBURTON D.A., *The Value of Colour: Material and economic aspects in the ancient world*, Edition Topoi, Berlin, 2019

SIDDALL R., *Not a day without a line drawn: Pigments and painting techniques of Roman Artists Article*, 2006 (doi: 10.22443/rms.inf.1.4)

TOMASELLA E., *Aspetti psicologici del collezionismo: le raccolte di ceramica greca e magnogreca antica e il problema dei falsi, il caso Merlin-Heike*, Tesi di Laurea Magistrale in Storia dell'Arte, Università degli Studi di Padova, 2022.

VANDENABEELE P., EDWARDS H.G.M., MOENS L., *A Decade of Raman Spectroscopy in Art and Archaeology*, *Chem. Rev.* 2007, vol. 107, n° 3, pp. 675–686 (doi: <https://doi.org/10.1021/cr068036i>)

VERRI G. et al., *Digital mapping of Egyptian blue: Conservation implications* in *Studies in Conservation* n° 55, 2010, pp. 220-224 (doi: [10.1179/sic.2010.55.Supplement-2.220](https://doi.org/10.1179/sic.2010.55.Supplement-2.220))

VERRI G., OPPER T., DEVIESE T., *The 'Treu Head': a case study in Roman sculptural polychromy*, in *The British Museum Technical Research Bulletin*, vol. 4, 2010.

VERRI G., *Broad-Band, Photo-Induced, Steady-State Luminescence Imaging in Practice* in *Conservation 360° - UV-Vis Luminescence Imaging techniques*, Editorial Universitat Politècnica de València, Spagna 2020.

WEN S., ZHENG Y., LU F., *Polarization Guided Specular Reflection Separation*, in IEEE transactions on image processing, vol. 30, 2021, pp. 7280-7291.

WISEMAN G., BARNES S., HELWIG K., Investigation of Egyptian Blue on a Fragmentary Egyptian Head Using ER-FTIR Spectroscopy and VIL Imaging, in Heritage n° 6, 2023, pp. 993-1006 (doi: <https://doi.org/10.3390/heritage6020056>)

ZAINA F. et al., *Archaeometric Characterization of a Blue Ingot from the Palace of Sargon II at Karkemish (Turkey) and the Distribution and Function of Egyptian Blue in the Near East during the Iron Age*, in Mesopotamia: rivista di archeologia, epigrafia e storia orientale antica, LIV, 2019 (doi: <https://www.researchgate.net/publication/341542151>)

ZANOVELLO P., CIAMPINI E. M., *Egitto in Veneto*, Cleup, Padova 2013.

ZECCHINA A., *Alchimie nell'arte – la chimica e l'evoluzione della pittura*, Zanichelli editore, Bologna 2012.

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare la Prof.ssa Deiana, il Prof. Zoleo, la Dott.ssa Menegazzi, il Dott. Zara e la Dott.ssa Giusti che mi hanno accompagnata nella realizzazione di questo lavoro e senza i quali non avrebbe potuto prendere vita. In particolare, desidero ringraziarli per i loro suggerimenti, per i loro spunti di riflessione e la loro costante disponibilità. Vi ringrazio per avermi accompagnata in questa avventura.

Ringrazio poi, in modo particolare, la Prof.ssa Deiana, che mi ha dato la possibilità di avvicinarmi a questo mondo scientifico, un mondo difficile ma estremamente affascinante e che permette di trovare delle risposte ai quesiti che noi archeologi siamo soliti porci. La ringrazio, dunque, per la sua passione nei confronti della materia e per riuscire a suscitare questa stessa passione nelle persone che le sono vicine.

Un altro ringraziamento speciale lo devo alla Dott.ssa Giusti, che ha saputo rispondere a tutte le mie domande e i miei dubbi a tutte le ore del giorno. Mi hai aiutata ad avvicinarmi ad una materia che era per me estranea, rendendola semplice e comprensibile, non potrò mai ringraziarti abbastanza.

Voglio poi ringraziare i miei genitori, che in tutti questi anni mi hanno sempre sostenuta, senza mai farmi pesare le mie scelte, giuste o sbagliate che fossero. Penso che non ci siano sufficienti parole per esprimere quanto io vi sia riconoscente e come vi abbia sempre ritenuti dei punti di riferimento fondamentali nel corso della mia vita. Se oggi sono qui, a scrivere questi ringraziamenti, lo devo a voi. Non penso che sarei quella che sono senza di voi, nel bene e nel male (come mi avete insegnato non esistono solo gli aspetti positivi nella vita). Mi avete fatto capire che se si vuole qualcosa la si può sempre ottenere e che non bisogna mai arrendersi nella vita, nonostante questo possa richiedere enormi sacrifici e nonostante si possano presentare nel nostro percorso degli ostacoli che sembrano insormontabili. Grazie ancora per essere la mia forza.

Vorrei poi ringraziare Linda che, come al solito, ha sopportato i miei scleri e le mie preoccupazioni. Sei la migliore ad ascoltare le persone e a volte mi sa che ne approfitto un po'. Mi fa piacere che Unipd ci abbia fatte conoscere (in modo estremamente particolare, questo è certo) e che la nostra amicizia sia continuata anche fuori.

Un ringraziamento lo voglio poi rivolgere a tutte quelle persone che sono entrate a far parte della mia vita nel corso di questi 5 anni. Tutte voi, in un modo o nell'altro, avete contribuito a rendermi la persona che sono oggi.

Infine, anche se può sembrare strano, voglio ringraziare me stessa. Tutti i sacrifici, le difficoltà, gli ostacoli... non mi hanno impedito di arrivare dove sono ora. Quindi, ringrazio la mia caparbia e la mia capacità di non mollare mai (nonostante qualche piccola crisi di nervi nel mentre). Posso affermare che la mia testardaggine è sia la mia rovina ma anche la mia forza maggiore.