

# L' ISTITUTO DI FISICA APPLICATA “NELLO CARRARA”

RICERCA, SVILUPPO E INNOVAZIONE  
NELL' ARCHEOMETRIA E NELLA CONSERVAZIONE

di Salvatore Siano, Roberto Olmi, Marcello Picollo,  
Valentina Raimondi e Roberto Pini

Una panoramica sulle tecniche diagnostiche, archeometriche e di conservazione utilizzate dal laboratorio dell'Istituto di Fisica Applicata “Nello Carrara”. Tradizione e innovazione si congiungono nell'IFAC per la sperimentazione di nuove tecnologie.



Fig. 1 - Scanner iperspettrale durante acquisizione misure sul dipinto “Annunciazione e Cacciata di Adamo ed Eva dal Paradiso Terrestre” (1450-1455) attribuito a Machiavelli Zano della Chiesa di San Martino a Mensola, Firenze, per lo studio della tecnica pittorica e dei materiali pittorici impiegati.

L'impegno del Consiglio Nazionale delle Ricerche nell'ambito dello studio, salvaguardia e valorizzazione del patrimonio culturale nasce circa cinquant'anni fa, nel contesto della straordinaria reazione della società della conoscenza di fronte ai danni dell'alluvione di Firenze. Un tale coinvolgimento delle scienze naturali e tecnologiche è cresciuto nei decenni successivi, fino all'importante traguardo delle circa 350 unità operative del Progetto Finalizzato “Beni Culturali” (1997-2001), ideato da Angelo Guarino (presidente del Progetto) e diretto da Umberto Baldini, protagonista dell'emergenza fiorentina e del dialogo multidisciplinare.

Fino da allora, IFAC ha fornito un contributo importante alla centralità di Firenze nella conservazione, attraverso i risultati di numerosi progetti di ricerca e sviluppo di nuove tecnologie per la caratterizzazione materica, il restauro, la musealizzazione e il monitoraggio di beni culturali, che hanno coinvolto istituzioni di tutela (Opificio delle Pietre Dure, Soprintendenze, Musei, Opere e altri), imprese di prodotti high-tech (El. En. S.p.A. e altre) e molte ditte di restauro. Al tempo stesso, il prolungato impegno in campagne archeometriche e conservative, gli hanno consentito di maturare competenze su una molteplicità di tematiche materiche riguardanti opere lapidee, manufatti metallici e dipinti. Tra i principali progetti dell'Istituto: ERA (1994-1998), Progetto Strategico e PF “Beni Culturali” (1995-2001), RIS+ Tuscany (2001), LiDo (2001-2004); COST Action G7 (2001-2006); OPTOCANTIERI (2002-2003); LASERSTONE (2002-2003); AUTHENTICO (2007-2009), ST@RT (2007-2010), POPART (2008-2012); TDT-BIOART (2009-2011), RIMIDIA (2009-2011), TEMART (2010-2012), PRIMARTE (2012-2015) e IPERION-CH (2015-2019).

L'Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara" (IFAC) del CNR di Firenze ha maturato storicamente una solida tradizione e continua a rivestire un ruolo primario nell'introduzione e nella sperimentazione di nuove tecnologie per lo studio e la conservazione di opere d'arte, applicate a capolavori scultorei e pittorici (ad es. di Michelangelo, Donatello, Masaccio) ed a monumenti di inestimabile valore storico ed artistico (ad es. Colosseo, Casa di Augusto), in collaborazione con i principali centri di restauro nazionali. Attualmente presso IFAC si sviluppano tecniche di spettroscopia integrata nelle regioni dell'UV-Vis-IR e THz-GHz per lo studio dei materiali costitutivi e dello stato di conservazione di beni culturali. La ricerca si concentra su dispositivi per la caratterizzazione materica non invasiva in situ e per l'imaging, nonché su procedure di analisi multivariata di dati spettrali. Tecniche di telerilevamento basate su LIDAR a fluorescenza sono state applicate per la prima volta all'indagine di monumenti da IFAC. Diagnostiche avanzate, come ad esempio LIPS (Laser Induced Plasma Spectroscopy) e microscopia 3D sono state originariamente sviluppate per studi archeometrici. Nel campo del restauro conservativo, IFAC è stato pioniere nello sviluppo di sistemi laser per la pulitura di opere d'arte in pietra, metallo e di superfici pittoriche, trasferendo tali tecnologie all'industria italiana, che ne è diventata leader mondiale.

### TECNICHE DIAGNOSTICHE E ARCHEOMETRICHE:

#### Spettroscopia di riflettanza e imaging iperspettrale

L'interesse dell'Istituto per il presente settore risale agli inizi degli anni '80, quando fu coinvolto per la caratterizzazione colorimetrica del ciclo pittorico di Masaccio, Masolino e Filippino Lippi nella Cappella Brancacci nella Chiesa del Carmine, nell'ambito delle indagini preliminari al restauro dell'opera. Successivamente, ha sviluppato diversi dispositivi e metodi di spettroscopia portatili nelle regioni UV, Vis, IR che operano su aree di ridotte dimensioni (tecniche puntuali) e permettono di ricavare informazioni su materiali costitutivi di una varietà di manufatti di interesse storico-artistico. Più recentemente ha sviluppato un prototipo di scanner iperspettrale operante nell'intervallo 400-1700 nm,



Fig. 2 - Misure FORS sul dipinto "Polittico di Badia" (c. 1300-01) di Giotto di Bondone, Galleria degli Uffizi, Firenze, per lo studio dei materiali pittorici durante l'intervento di restauro.

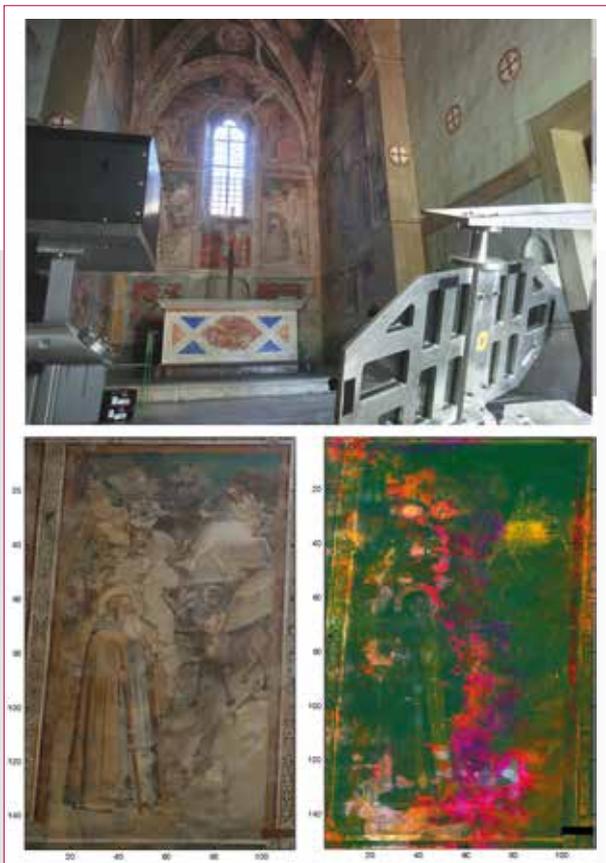


Fig. 3 - In alto: acquisizione di immagini iperspettrali di fluorescenza su superfici affrescate con strumentazione LIDAR: in primo piano, a destra, lo specchio di scansione dello strumento.

In basso: mappa di fluorescenza in falsi colori ottenuta applicando tecniche statistiche multivariate e finalizzata a evidenziare fenomeni di degrado e aree interessate da precedenti interventi di restauro.

con ottima risoluzione spettrale (circa 3 nm nell'intervallo 400-900 nm e 8 nm nella regione 950-1700 nm) e spaziale (rispettivamente, campionamento 11 punti/mm e 9 punti/mm). Lo strumento viene oggi utilizzato principalmente per la documentazione e l'identificazione dei pigmenti presenti in dipinti appartenenti a prestigiose collezioni museali, come ad esempio quelle della Galleria degli Uffizi e del Museo di San Marco a Firenze.

#### LIDAR

IFAC ha introdotto il LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) a fluorescenza per la caratterizzazione di superfici monumentali all'inizio degli anni '90. L'apparato è costituito da un laser impulsato a bassa energia, un telescopio e un sistema opportuno di dispersione e rivelazione e consente di eseguire indagini remote - a distanze di decine di metri - in piena luce solare. Il prototipo più recente della serie di LIDAR progettati e realizzati è dotato di un sistema di scansione che permette di ottenere immagini iperspettrali di fluorescenza della superficie in esame (vengono acquisite più di 500 immagini di fluorescenza ciascuna corrispondente a una diversa lunghezza d'onda). I dati possono essere poi elaborati per produrre mappe tematiche relative alla distribuzione di trattamenti protettivi, di biodeteriogeni fotoautotrofi (alghe, cianobatteri) e dei materiali costitutivi dell'opera in esame, sulla base delle diverse caratteristiche di fluorescenza. Il prototipo è stato impiegato nell'ambito di campagne di misure condotte su importanti edifici storici, quali il Battistero e la Cattedrale di Parma, il Colosseo, la Casa di Augusto al Palatino.

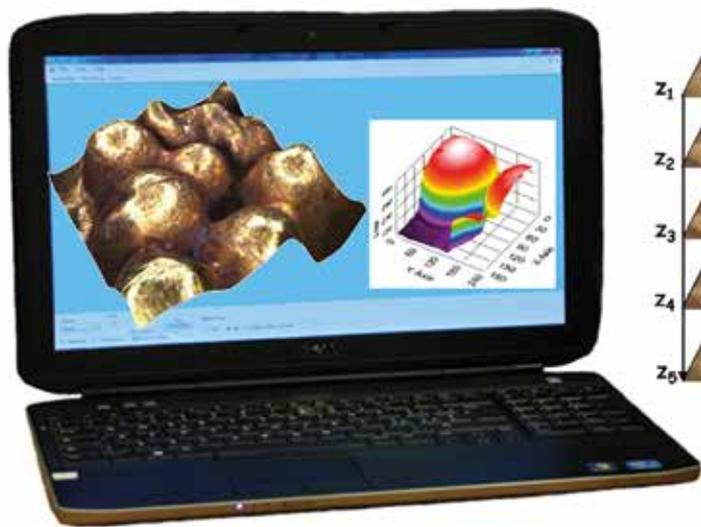


Fig. 4 - Microscopio 3D palmare a scansione di fuoco: esempio di rilievo di una granulazione su un gioiello antico.

### MICROSCOPIA DIGITALE 3D PORTATILE

L'ispezione microscopica delle superfici ha un'importanza primaria in tutte le fasi di studio e intervento sul bene. Per questo, il suo recente sviluppo digitale, che aggiunge la possibilità di valutazioni spaziali quantitative e permette la riduzione delle dimensioni e dei costi, è di grande interesse per il settore. IFAC sviluppa microscopi 3D palmari a bassi ingrandimenti concepiti per la caratterizzazione micromorfologica in situ di una varietà di superfici. Questi dispositivi sfruttano un allestimento compatto brevettato, costituito da un gruppo optoelettronico (camera CCD, obiettivo e illuminazione), uno stadio di traslazione, e un PC per l'acquisizione e analisi. La ricostruzione 3D della superficie in esame è ottenuta attraverso l'elaborazione di una sequenza di foto (tipicamente 50-100), acquisite al frame rate della CCD traslando il punto focale dell'obiettivo lungo l'asse ottico. I campi di vista, a seconda delle ottiche utilizzate, variano tra 1 e 10 mm con corrispondenti risoluzioni in profondità variabili da qualche micron ad alcune decine di micron. Il dispositivo è stato validato per l'ispezione microscopica durante trattamenti di ablazione laser e per l'esame tecnologico di manufatti metallici, ma può essere sfruttato in tutte quelle situazioni in cui il rilievo tessiturale quantitativo può risultare utile.

### DIELETTROMETRIA E TERMOGRAFIA

Acqua e sali solubili (ad esempio nitrati e solfati) costituiscono le principali cause di degrado di dipinti murali, manufatti lapidei e altre opere, attraverso fenomeni di ricristallizzazione. Per questo, la loro quantificazione e monitoraggio nel tempo è di grande ausilio nella conservazione preventiva.

A tal fine, l'Istituto ha sviluppato e brevettato lo strumento SUSI (Strumento per la misura di Umidità e Salinità Integrato), basato sulla dielettrometria in campo evanescente. La tecnica permette di misurare di ottenere valutazioni semi-quantitative del contenuto acquoso e salino superficiale in materiali porosi sulla base del contrasto dielettrico. SUSI è equipaggiato con un sensore risonante a microstriscia dotato di una testa di misura coassiale sviluppata appositamente. La misura dell'umidità e della presenza di sali solubili viene eseguita in tempo reale, mediante un analizzatore di reti scalare e un notebook. Il dispositivo è stato impiegato in numerose campagne di misura, in associazione a indagini termografiche ed NMR. In particolare, la combinazione della dielettrometria a microonde con la termografia nel medio infrarosso (7.5 - 13 micron) permette di rendere quantitativa la rilevazione dell'umidità che si ricava da quest'ultima. La misura puntuale assoluta mediante SUSI in specifiche zone del manufatto consente infatti di trasformare la mappa termica in una vera e propria mappa di umidità.

### TOMOGRAFIA A MICROONDE E THZ

Tra i possibili approcci alla verifica dello stato di conservazione di elementi architettonici lapidei o lignei, IFAC propone strumenti e metodi di misura basati sul RADAR FMCW e sulla riflettometria time-domain. I sistemi sviluppati operano in varie bande di frequenza (1-6 GHz, 10GHz, 24 GHz). Vengono studiati e implementati algoritmi per sfruttare le caratteristiche multifrequenza e nel dominio del tempo di detta strumentazione, in particolare al fine di ottenere immagini tomografiche e per aumentare la risoluzione spaziale.

L'estensione di questo approccio alla scala sub-millimetrica è rappresentato dalla spettroscopia THz nel dominio del tempo. L'Istituto dispone di un apparato spettroscopico che lavora tra 0.1 e 2.5 THz sul quale sono in fase di definizione implementazioni e metodologie appropriate per ottenere tomografie superficiali di stesure pittoriche, di strati di alterazione di elementi lapidei o di corrosione di manufatti in lega di rame.

### STRUMENTAZIONE PORTATILE PER L'ANALISI COMPOSIZIONALE

L'introduzione di strumenti portatili non invasivi per l'analisi elementare, molecolare e di fase nella caratterizzazione materica di manufatti di interesse culturale sta producendo una profonda trasformazione della pratica archeometrica, con il graduale superamento dall'approccio tradizionale basato sull'analisi di campioni materici prelevati dall'opera. Benché questo trend stia favorendo la crescita di uno specifico ambito di mercato degli strumenti scientifici,

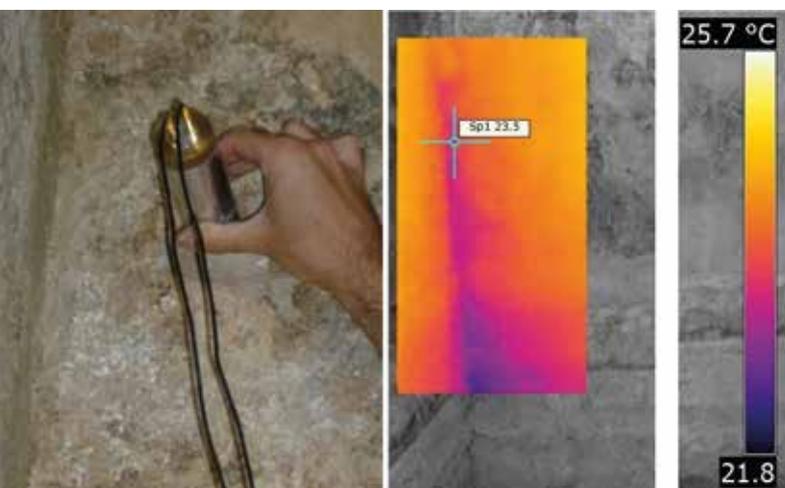


Fig. 5 - Uso dello strumento SUSI (a sinistra) per calibrare la misura termografica (a destra).

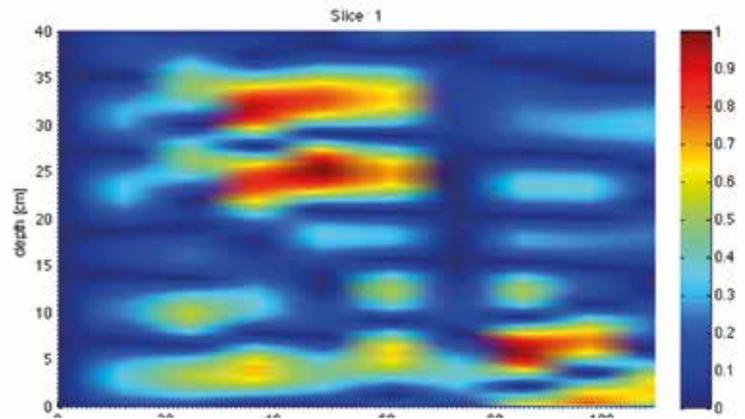


Fig. 6 - Indagine mediante tomografia a microonde (a destra) della sezione trasversa di una trave (a sinistra).

grazie anche alla sinergia con altri settori applicativi, le esigenze di affinamento tecnologico e metodologico mirato sono ancora molte e motivano l'impegno di IFAC nella prototipazione di nuovi dispositivi. Per questo, da oltre un decennio sviluppiamo dispositivi portatili di spettroscopia di plasma indotto da laser (LIPS o LIBS) e, più recentemente, di spettroscopia Raman controllata in temperatura. Essi implementano soluzioni tecnologiche sugli allestimenti ottici, la sensoristica di controllo e i software di gestione e analisi che li rendono largamente più efficienti, versatili ed economici rispetto ai corrispondenti strumenti commerciali e per questo si prestano al trasferimento tecnologico. Gli strumenti LIPS e Raman sono principalmente utilizzati, rispettivamente, per lo studio di manufatti metallici e la caratterizzazione di strati pittorici (identificazione di pigmenti e tecniche di stesure, studio di processi di invecchiamento di vernici e altro).

### RICERCA ARCHEOMETALLURGICA

Sono oggetto di sviluppo approcci innovativi allo studio dei manufatti metallici antichi e rinascimentali basati sulla diffrazione neutronica in tempo di volo, introdotta nel settore circa quindici anni fa, e la tomografia neutronica. Le campagne di misura sono state condotte presso varie stazioni di misura della sorgente di neutroni ISIS-RAL (Didcot, UK), e CONRAD-2, lo strumento di imaging presso HZB (Berlino). Esse hanno fin qui riguardato le collezioni etrusche, picene ed egizie dei Musei Archeologici Nazionali di Firenze, Chiusi e Ancona. Accanto alle tecniche neutroniche, le campagne archeometallurgiche comprendono l'utilizzo di metodi tradizionali e di altri approcci innovativi. Le competenze analitiche e tematiche sviluppate sono state utilizzate per

l'interpretazione dei procedimenti esecutivi di numerosi capolavori antichi e rinascimentali, quali ad esempio: Chimera e Minerva di Arezzo; gruppo equestre di Alessandro; Testa di Cavallo Medici-Riccardi; Busto di Antonino Pio; San Matteo, Sacrificio di Isacco e Porta del Paradiso del Ghiberti; Capitello del Pulpito, Amore Attis, San Ludovico, Pulpito della Resurrezione e David di Donatello; Predica del Battista del Rustici; Decollazione del Battista del Danti e altri. Lo studio di queste opere ha prodotto un sostanziale avanzamento nella conoscenza della fonderia artistica del passato, che rappresenta anche un valore aggiunto con notevoli potenzialità di sfruttamento nell'autenticazione e nella fruizione aumentata.

### TRATTAMENTI CONSERVATIVI: Dispositivi a microonde per trattamenti biocidi

Il BioMiT (Biodeteriogens Microwave Treatment) rappresenta l'ultimo dei sistemi a microonde sviluppati da IFAC per il controllo del biodegrado. Esso è costituito da un generatore a MO (2.45 GHz), disponibile in due configurazioni, rispettivamente con potenze regolabili da 30 a 300 W e da 80 a 1300 W. Il sistema è corredato di un misuratore di temperatura (a fibra ottica o a termocoppia) che permette di controllare la dose termica rilasciata al materiale, di una linea per il controllo delle potenze incidente e riflessa, software dedicato e PC. L'apparato è efficace sia per la disinfezione di opere lignee (tavole, strumenti musicali, strutture) da insetti xilofagi - applicazione sulla quale l'Istituto è stato pioniere sviluppando i primi strumenti dedicati - che per il trattamento del biodegrado lapideo. In quest'ultimo caso è stata anche sperimentata con successo la combinazione con l'ablazione laser.

Fig. 7 - Mappatura delle leghe del San Ludovico di Donatello mediante spettroscopia di plasma indotto da laser. La tecnica si può considerare non invasiva dal momento che la quantità di materiale rimosso è enormemente inferiore a quella di un'analisi tradizionale (un campionamento per un punto di analisi ICP-AES equivale a circa 300 punti di analisi LIPS, ognuno dei quali corrisponde a un depth profile di circa 1000 spettri).

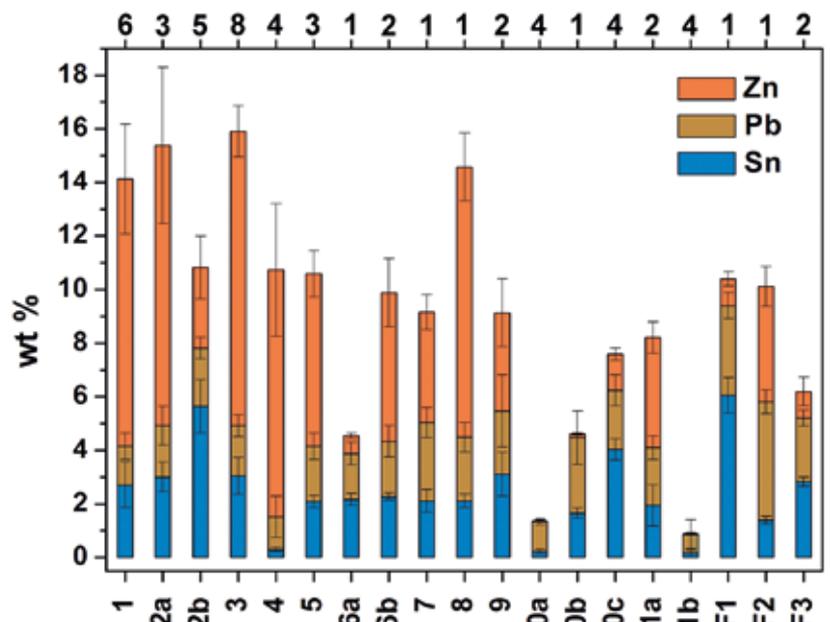
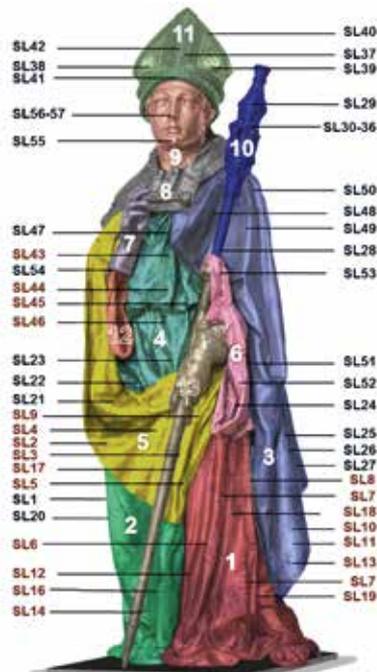




Fig. 8 - Sperimentazione del dispositivo biocida a microonde sulla Speranza di Odoardo Fantacchiotti.

### TRATTAMENTI LASER PER IL RESTAURO

Gli avanzamenti ottenuti negli ultimi due decenni sui trattamenti laser per il restauro hanno dato l'impulso decisivo alla diffusione di un tale approccio nella pratica della conservazione, in Italia e all'estero. Sulla base di studi approfonditi dei processi di ablazione, IFAC ha sviluppato sistemi laser Nd:YAG dedicati, che sono stati ingegnerizzati e commercializzati da El.En. S.p.A., e ne ha dimostrato l'efficacia in una lunga serie di interventi su opere di grande valenza storico-artistica. Tra queste ultime: facciate di Palazzo Rucellai e Mausoleo di Teodorico; Architrave di San Ranieri; Stucchi della Loggia della Mercanzia; Speranza di Odoardo Fantacchiotti; David di Andrea del Verrocchio; Profeta Abacuc, Amore Attis, Capitello e David di Donatello; Formelle del Campanile di Giotto di Andrea Pisano; Quattro Santi Coronati e Assunta di Nanni di Banco; Fonte Gaia di Jacopo della Quercia; Porta del Paradiso, Porta Nord e San Matteo di Lorenzo Ghiberti; Arringatore; busto di Antonino Pio; cicli pittorici murali della Sagrestia Vecchia e Cappella del Manto, del donjon del Castello di Quart, delle catacombe di Santa Tecla (in cui è stata scoperta l'icona più antica di San Paolo), del cubicolo "dei fornai" (catacombe di Domitilla); ritratto di un'allieva di Giacomo Balla; e molte altre.

Si tratta di un caso esemplare di sviluppo, trasferimento tecnologico e innovazione delle pratiche di conservazione del patrimonio materiale che accresce l'eccellenza italiana in questo settore.



Fig. 10 - Due recenti applicazioni esemplari dell'ablazione laser nel restauro: Gioia sputata dal mostro marino, arcosolio del cubicolo "dei fornai" nelle catacombe di Domitilla (sopra); recupero di un ritratto firmato "Annie Nathan 1910" sul retro di un dipinto di Giacomo Balla, esponente di spicco del Futurismo (sotto).

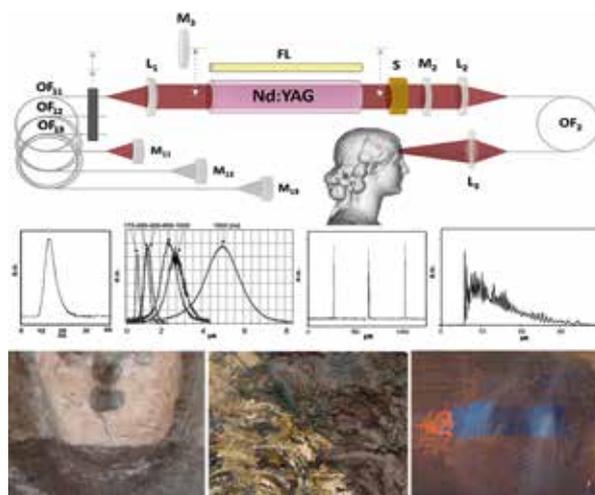


Fig. 9 - Rappresentazione schematica del sistema laser Nd:YAG a durata e forma di impulso selezionabile in funzione della specifica problematica di restauro da affrontare. Un tale approccio a durata di impulso ottimizzata si è dimostrato fin qui efficace per la rimozione di croste nere da manufatti lapidei, la pulitura di dorature, e l'ablazione selettiva di strati indesiderati da superfici pittoriche.

Un successo ottenuto anche grazie alla stretta collaborazione con OPD, Dipartimento di Scienze Ambientali di Siena, Soprintendenza Archeologia della Toscana, Polo Museale Fiorentino, altre istituzioni di tutela e numerose imprese di restauro, nell'ambito di una decina di progetti di R&D&I. L'impegno dell'Istituto ha fornito e continua a fornire un contributo cruciale alla diffusione delle tecniche laser nel restauro che rappresentano ormai un valore aggiunto tangibile in termini di strumenti commercializzati e nuovi servizi attivati.

La ricerca si concentra attualmente principalmente su: sfruttamento di nuovi sistemi laser ultracompatti mediante l'implementazione di sensori e software per il controllo automatizzato dei processi ablativi; studio approfondito e interpretazione degli effetti dell'irraggiamento di strati pittorici, carta e tessuti; esplorazione delle potenzialità applicative dei trattamenti laser su opere moderne e contemporanee, sperimentazione di trattamenti combinati basati su materiali nanostrutturati e irraggiamento laser.

L'articolo L'Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara" è il Terzo della serie tematica curata da Luca Papi (CNR) dedicata a cinque Laboratori del Consiglio Nazionale delle Ricerche, il più grande Ente Pubblico di Ricerca italiano. I direttori dei singoli laboratori sono chiamati a descrivere le competenze, le attività di ricerca, i progetti, le collaborazioni nazionali e internazionali delle strutture di cui sono responsabili.

### ABSTRACT

The Institute of Applied Physics "Nello Carrara" (IFAC) of CNR in Florence has matured historically a strong tradition and continues to play a leading role in the introduction and testing of new technologies for the study and conservation of works of art, applied to sculptures and paintings (eg. by Michelangelo, Donatello and Masaccio) and monuments of inestimable historical and artistic value (eg. the Colosseum, the House of Augustus), in collaboration with major national restoration centers.

Currently IFAC develop integrated spectroscopy techniques in the UV-Vis-IR and THz-GHz ranges for the study of the constituent materials and the state of conservation of cultural heritage. The research focuses on devices for non-invasive and in situ characterization of materials and for imaging, as well as on procedures of multivariate analysis of spectral data. Remote sensing techniques based on fluorescence LIDAR were applied for the first time in the survey of monuments by IFAC. Advanced diagnostic, such as LIPS (laser induced plasma spectroscopy) and 3D microscopy were originally developed for archeometric studies. In the field of restoration, IFAC has been a pioneer in the development of laser systems for cleaning of works of art made in stone, metal and painted surfaces, transferring these technologies to the Italian industry, which has become a world leader.

### PAROLE CHIAVE

IFAC; CNR; TECNOLOGIE APPLICATE; ARCHEOMETRIA; DIAGNOSTICA NON INVASIVA; CONSERVAZIONE; BENI CULTURALI

### AUTORE

SALVATORE SIANO, ROBERTO OLMI, MARCELLO PICOLLO VALENTINA RAIMONDI, ROBERTO PINI R.PINI@IFAC.CNR.IT - ISTITUTO DI FISICA APPLICATA "NELLO CARRARA" IFAC-CNR