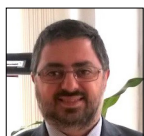


Le potenzialità delle diagnostiche ottiche e spettroscopiche per i beni culturali

Le diagnostiche ottiche e spettroscopiche, punto di eccellenza della divisione Tecnologie Fisiche per la sicurezza e la salute, offrono possibilità uniche di caratterizzazione di superfici in modalità non distruttiva o micro-distruttiva, con molteplici applicazioni in varie discipline. In particolare, le diagnostiche laser in situ e remote sono un esempio virtuoso di *cross fertilization* fra le applicazioni della ricerca in ambito nucleare e quelle per la tutela, conservazione, conoscenza e valorizzazione del patrimonio culturale.

DOI 10.12910/EAI2022-014



di Alessandro Dodaro, Direttore del Dipartimento Fusione e Sicurezza Nucleare, ENEA

Le attività del dipartimento FSN sono focalizzate su Fusione e Sicurezza Nucleare, con l'obiettivo di sviluppare al suo interno anche le diagnostiche di cui necessita. **Le diagnostiche ottiche e spettroscopiche, punto di eccellenza della divisione Tecnologie Fisiche per la sicurezza e la salute, offrono possibilità uniche di caratterizzazione di superfici in modalità non distruttiva o micro-distruttiva con molteplici applicazioni in varie discipline.** Un gruppo significativo di queste è relativo alla caratterizzazione di materiali per uso in presenza di radiazioni, sia in reattori a fissione che a fusione. Tecnologie e metodologie originariamente sviluppate in tale ambito [1] possono essere facilmente adattate a problematiche analoghe in diversi settori, dall'aerospaziale ai **beni culturali**, in quest'ultimo caso sono privilegiate le funzioni di utilizzo in-situ e remoto finalizzate

alla conservazione preventiva e al restauro di superfici. Altre applicazioni sono legate più in generale alle tematiche di Security CBRNe e alla protezione del territorio.

Lo sviluppo di laser scanner veloci, iniziato presso il centro ENEA di Frascati con il sistema IVVS (in-vessel viewing systems) per il monitoraggio delle superfici interne di reattori a fusione [2], ha portato alla realizzazione di sistemi ITR (Image Topological Radar) operanti ad alta risoluzione (millimetrica o sub millimetrica) fino ad oltre 30 m in aria, aggiungendo la capacità di colorimetria remota (RGB-ITR) a quella di analisi morfologica della superficie. L'alta risoluzione è stata ottenuta con la doppia modulazione di ampiezza, mentre l'imaging monocromatico è stato effettuato a singolo laser o con una combinazione ottica di tre lunghezze d'onda laser nel visibile [3]. Gli apparati

realizzati ed utilizzati sull'esperimento FTU (Frascati Tokamak Upgrade) e su superfici monumentali sono mostrati in figura 1, assieme ad un esempio di ricostruzione d'immagine.

Una particolare variante del sistema ITR monocromatico è risultata adatta ad indagini in acqua (Underwater-ITR), specializzando il prototipo per archeologia sottomarina, con operazione a singolo laser sul picco di trasmissione del segnale visibile in acqua (blue-verde secondo la trasparenza della medesima che consente misure fino a circa 15 m di distanza). Il payload U-ITR è stato realizzato per operazione da veicolo sottomarino filoguidato (ROV) operato dalla nave appoggio. **In questo caso, l'esperienza maturata per i Beni Culturali è tornata utile all'applicazione di sicurezza nucleare per la messa a punto di payload im-**



Fig. 1 In alto a sn il prototipo di IVVS realizzato per il monitoraggio dell'erosione delle piastrelle all'interno di FTU; a dx il modello 3D raccolto. In basso a sinistra il sistema RGB-ITR, a destra un particolare della volta di Pietro da Cortona scansionata ad alta risoluzione a 18 m da terra.

merso nella piscina del reattore di fissione sperimentale TRIGA (che si trova presso il Centro di ricerche ENEA della Casaccia), con lo scopo di monitorare la posizione delle barre di combustibile, per le quali risulterebbe critico un disallineamento originato da un evento catastrofico (es. terremoto) [4].

Lo sviluppo e l'applicazione dei sensori laser spettroscopici

Per lo sviluppo e l'applicazione dei sensori laser spettroscopici sono stati fondamentali due step: la miniaturizzazione delle sorgenti laser e la disponibilità di rivelatori per imaging spettroscopico ICCD sempre più sensibili, rendendone possibile l'uso sia in situ che remoto. L'applicazione remota della caratterizzazione analitica di superfici è stata realizzata nell'ambito di un progetto di Security a Frascati con sistema ILS (Integrated Laser System) capace di effettuare caratterizzazioni laser spettroscopiche di superfici mediante le tecniche Laser Raman, Laser Induced Fluorescence e Laser Induced Breakdown Spectroscopy.

In particolare, la LIBS è d'interesse per le sue capacità di stratigrafia sia nella caratterizzazione di superfici di beni culturali che in quella degli isotopi assorbiti sulla superficie delle Plasma Facing Components all'interno dei reattori di fusione. In sistema ILS è stato applicato con successo alla stratigrafia remota di ceramiche (esaminate alla distanza di 10 m) [5], mentre un suo derivato miniaturizzato, dedicato esclusivamente alla LIBS, è stato poi progettato ed allestito per operazione tramite un braccio robotico all'interno di FTU durante le operazioni di manutenzione [6]. Gli apparati realizzati e un esempio della rispettiva applicazione sono mostrati in Figura 2.

Sistemi spettroscopici per imaging remoto di fluorescenza, sia risolto in lunghezza d'onda che in tempo, sono stati sviluppati da oltre un decennio per ap-

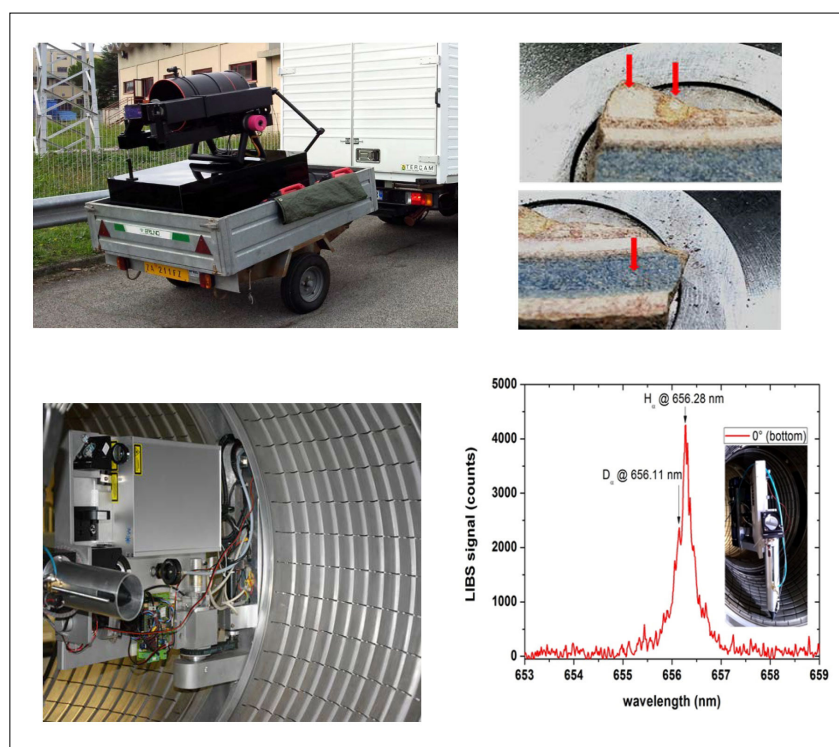


Fig. 2 In alto a sn il prototipo ILS in una dimostrazione sul campo per la rivelazione remota di tracce di esplosivi. In basso a sinistra il prototipo su un braccio robotico operante all'interno di FTU; a destra lo spettro ad alta risoluzione degli isotopi dell'idrogeno adsorbiti sulle mattonelle nella zona del divertore.

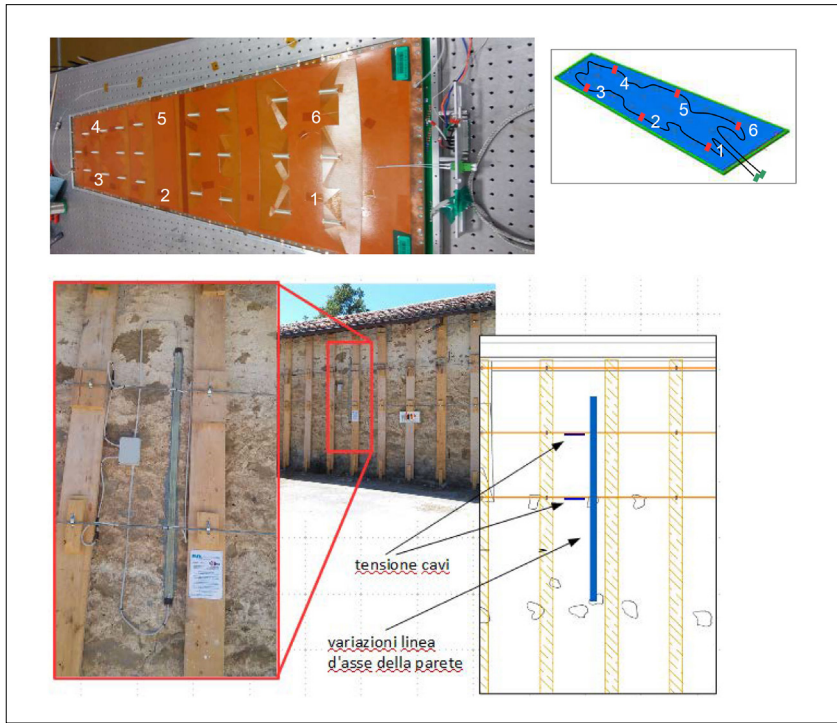


Fig. 3 In alto a sn sensori in fibra ottica FBG per la protezione di rivelatori di muoni nell'esperimento CMS (compact muon solenoid) presso il CERN; a destra lo schema di connessione del sistema distribuito dei 6 sensori FBG collegati in serie per monitorare in real-time la temperatura di componenti critici del rivelatore. In basso il sistema installato sulle opere provvisorie di sostegno alla Chiesetta di Santa Maria delle Grazie di Accumoli dopo il terremoto del 2016, con lo schema di funzionamento che ne evidenzia la sensibilità a diverse piccole variazioni in conseguenza di scosse di assestamento.

plicazioni ai beni culturali [7] con particolare riguardo alla possibilità di evidenziare tracce di restauri con materiali moderni e presenza di biodegrado.

La sensibilità di questi sistemi alle sostanze organiche polimeriche (plastiche di vario tipo) ne ha suggerito l'applica-

zione anche per indagini su larga scala per la Security per evidenziare le tracce di esplosivi improvvisati in scenari di post- esplosione [8]. In questo caso è stata privilegiata la velocità di acquisizione dati ed è stato realizzato un sistema rapido di imaging con eccitazione

laser UV e rivelazione lunghezze d'onda prefissate nel UV vicino e nel visibile (caratteristiche di varie tipologie di materiali). Il sistema è stato successivamente applicato con successo anche per la caratterizzazione di materiali lapidei (marmi) nei Beni Culturali, che presentano emissioni diverse nelle finestre spettrali prescelte [9].

Sistemi di monitoraggio formati da catene di sensori in fibra ottica

Anche sistemi di monitoraggio formati da catene di sensori in fibra ottica, basati su reticoli di Bragg a lettura laser, che consentono di monitorare sia piccoli spostamenti che variazioni di temperatura, hanno trovato nel dipartimento uno sviluppo in campo nucleare ed applicazioni significative per la tutela dei beni culturali, soprattutto in situazioni che richiedano un'efficace prevenzione sismica. Sulla base di una precedente esperienza maturata in un pluriennale collaborazione con il CERN, questi sensori sono stati adattati all'utilizzo su grandi impianti di fisica nucleare, e la loro installazione è prevista sulle nuove macchine a Frascati (dall'acceleratore TOP IMPLART al DTT)¹ per il controllo fine dell'allineamento di componenti interni. Nell'ambito dei beni culturali i sensori sono stati prevalentemente utilizzati in campagne di monitoraggio di opere monumentali in zone sismiche. Una coppia di esempi sono mostrati nella figura 3.

BIBLIOGRAFIA

1. R. Fantoni, S. Almaviva, L. Caneve, F. Colao, M. Ferri De Collibus, L. De Dominicis, M. Francucci, M. Guarneri, V. Lazic, A. Palucci "In situ and remote laser diagnostics for material characterization from plasma facing components to Cultural Heritage surfaces" *J. of Instrumentation* 14 (2019) C07004.
2. L. Bartolini, A. Bordone, A. Coletti, M. Ferri De Collibus, G.G. Fornetti, S. Lupini, C. Neri, M. Riva, L. Semeraro, C. Talarico 1998 "Amplitude modulated laser in vessel viewing system (LIVVS) for ITER/JET," *Fusion Technology*, 1, 685-688.
3. Fantoni R., Almaviva S., Caneve L., Caponero M., Colao F., De Collibus M.F., Fiorani L., Fornetti G., Francucci M., Guarneri M., Lazic V., Palucci A., Spizzichino V. 2017. "Laser scanners for remote diagnostic and virtual fruition of cultural heritage". *Optical and Quantum Electronics* 49, Article 120.
4. L. De Dominicis, M. Carta, M. Ciaffi, L. Falconi, M. Ferri de Collibus, M. Francucci, M. Guarneri, M. Nuvoli, and F. Pollastrone. "Radiation Tolerant 3D Laser Scanner for Structural Inspections in Nuclear Reactor Vessels and Fuel Storage Pools" *Science and Technology in Nuclear Installations*, 2021, Vol. 2021. Article ID 8237946 <https://doi.org/10.1155/2021/8237946>
5. Lazic V., Trujillo-Vazquez A., Sobral H., Márquez C., Palucci A., Ciaffi M., Pistilli M.. "Corrections for variable plasma parameters in laser induced breakdown spectroscopy: Application on archeological samples" *Spectrochim. Acta B* 122, 103–113, (2016).
6. G. Maddaluno, S. Almaviva, L. Caneve, F. Colao, V. Lazic, L. Laguardia, P. Gasior, M. Kubkowska, and the FTU team. Detection by LIBS of the deuterium retained in the FTU toroidal limiter. *Nucl. Mater. En.* 18 (2019) 208–211.
7. Fantoni R., Caneve L., Colao F., Fiorani L., Palucci A., Dell'Erba R., Fassina V.. "Laser-induced fluorescence study of medieval frescoes by Giusto de' Menabuoi" *J. Cult. Herit.* 14, S59–S65, (2013).
8. Caneve L., Colao F., Del Franco M., Palucci A., Pistilli M., Spizzichino V. 2016 "Multispectral imaging system based on laser-induced fluorescence for security applications" *Proc. SPIE 9995, Optics and Photonics for Counterterrorism, Crime Fighting, and Defence XII*, 999509 (doi: 10.1117/12.2240924).
9. Spizzichino, V., Bertani, L., Caneve, L. 2018 "Origin Determination of Mediterranean Marbles by Laser Induced Fluorescence". *Lecture Notes in Computer Science* 11196 LNCS, pp. 212-223.
10. M. Caponero et al., "Two years' test of a temperature sensing system based on fibre Bragg grating technology for the CMS GE1/1 detectors" *Journal of Physics: Conference Series*, 1561(2020), 012006. doi: 10.1088/1742-6596/1561/1/012006.
11. Caponero, M.A., Dell'Erba, D., Kropp, C. "Use of fibre optic sensors for structural monitoring of temporary emergency reinforcement of the church S. Maria delle Grazie in Accumoli" *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 9(2019), pp353–360. doi: 10.1007/s13349-019-00335-w.

1. TOP IMPLART (Terapia Oncologica con Protoni – Intensity Modulated Proton Linear Accelerator for RadioTherapy), è un acceleratore lineare per la protonterapia per la cura di alcune patologie tumorali, in via di realizzazione presso il centro di ricerche ENEA di Frascati. DTT è il Divertor Tokamak Test, una macchina sperimentale in costruzione presso il Centro di ricerche ENEA di Frascati, per la sperimentazione sulla fusione nucleare