

COLORAZIONE SIMIL-SINDONICA DI TESSUTI DI LINO TRAMITE RADIAZIONE NEL LONTANO ULTRAVIOLETTO

RIASSUNTO DEI RISULTATI OTTENUTI PRESSO IL CENTRO ENEA DI FRASCATI
NEGLI ANNI 2005 - 2010

P. DI LAZZARO, D. MURRA, A. SANTONI

ENEA - Unità Tecnica Sviluppo di Applicazioni delle Radiazioni
Laboratorio Sorgenti di Radiazioni
Centro Ricerche Frascati, Roma

E. NICHELATTI

ENEA - Unità Tecnica Tecnologie dei Materiali
Laboratorio Sviluppo e Realizzazione di Componenti Ottici
Centro Ricerche Casaccia, Roma

G. BALDACCHINI

Via G. Quattrucci, 246 - 00046 Grottaferrata (Roma)



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

COLORAZIONE SIMIL–SINDONICA DI TESSUTI DI LINO TRAMITE RADIAZIONE NEL LONTANO ULTRAVIOLETTO

Riassunto dei risultati ottenuti presso il Centro ENEA di Frascati
negli anni 2005 - 2010

P. DI LAZZARO, D. MURRA, A. SANTONI

ENEA - Unità Tecnica Sviluppo di Applicazioni delle Radiazioni
Laboratorio Sorgenti di Radiazioni
Centro Ricerche Frascati, Roma

E. NICHELATTI

ENEA – Unità Tecnica Tecnologie dei Materiali
Laboratorio Sviluppo e Realizzazione di Componenti Ottici
Centro Ricerche Casaccia, Roma

G. BALDACCHINI

Via G. Quattrucci, 246 - 00046 Grottaferrata (Roma)

I Rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina
<http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/rapporti-tecnici>

Questo rapporto è stato preparato e distribuito da: Servizio Edizioni Scientifiche - ENEA
UTFUS-DITE Centro Ricerche Frascati, C.P. 65 - 00044 Frascati, Rome, Italy

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e
non necessariamente quella dell'Agenzia.

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not
necessarily the opinion of ENEA.

COLORAZIONE SIMIL-SINDONICA DI TESSUTI DI LINO TRAMITE RADIAZIONE NEL LONTANO ULTRAVIOLETTO

Riassunto dei risultati ottenuti presso il Centro ENEA di Frascati negli anni 2005 – 2010

PAOLO DI LAZZARO, DANIELE MURRA, ENRICO NICHELATTI, ANTONINO SANTONI, GIUSEPPE BALDACCHINI

Riassunto

Presentiamo un riassunto dei risultati sperimentali di irraggiamento di tessuti di lino tramite impulsi laser eccimeri nell'ultravioletto e nel lontano ultravioletto effettuati negli anni 2005 - 2010 allo scopo di ottenere una colorazione simile a quella dell'immagine corporea visibile sulla Sindone di Torino. L'interesse di questi studi risiede nel fatto che i tentativi di replica dell'immagine sindonica sia con metodi chimici sia con metodi fisici si sono rivelati sinora inadatti a ottenere le caratteristiche dell'immagine stessa. In particolare, i metodi chimici a contatto non consentono di ottenere una delle più peculiari caratteristiche dell'immagine sindonica, ovvero lo spessore di colorazione estremamente sottile, pari ad un quinto di millesimo di millimetro. Mediante impulsi laser eccimeri abbiamo ottenuto una colorazione del lino estremamente superficiale e simil-sindonica solo in un ristretto intervallo dei parametri di irraggiamento. Abbiamo inoltre ottenuto una colorazione latente, invisibile dopo gli irraggiamenti, che appare solo a seguito di invecchiamento artificiale e/o naturale del lino. Il risultato forse più importante è aver individuato alcuni processi fotochimici in grado di spiegare sia la colorazione superficiale, sia il fenomeno della colorazione latente. È possibile che questi processi fotochimici abbiano contribuito alla formazione della immagine sulla Sindone.

Parole chiave: Sindone di Torino, Laser eccimero, Immagine latente, Profondità di colorazione, Fotochimica

SHROUD-LIKE COLORATION OF LINEN FABRICS BY VACUUM ULTRAVIOLET RADIATION

Summary of the results obtained at ENEA Frascati in the years 2005 – 2010

Abstract

The body image of the Turin Shroud has not yet been explained by traditional science and the attempts to obtain a similar image by chemical methods failed till now. As a consequence, a great interest in a possible mechanism of image formation still exists. We present a summary of the results of five-years experiments of excimer laser irradiation (spectrum of the emitted light in the ultraviolet and vacuum ultraviolet) of raw linen fabrics, seeking for a coloration similar to that of the body image embedded onto the Shroud of Turin. We achieved a very superficial Shroud-like coloration of linen yarns in a narrow range of irradiation parameters. We also obtained latent coloration that appears after artificial or natural aging of linen following laser irradiations that at first did not generate any visible effect. Most importantly, we have recognized distinct physical and photo-chemical processes that account for both coloration and latent coloration. These processes may have played a role in the generation of the body image on the Shroud of Turin.

Key words: *Shroud of Turin, Excimer Laser, Latent image, Coloration depth, Photo-chemistry*

INDICE

Prefazione	7
1. Introduzione	7
2. L'ipotesi radiativa	8
3. Risultati sperimentali con radiazione laser UV	9
4. Risultati sperimentali con radiazione laser VUV	11
5. Colorazione latente	13
6. Fluorescenza ultravioletta	14
7. Ulteriori esperimenti	15
7.1 Il nostro lino è diverso dal lino della Sindone?	15
7.2 La luce laser invecchia il lino?	16
7.3 La colorazione tramite luce laser eccimero è un effetto termico o fotochimico?	17
8. Analisi dei risultati	17
8.1 Processi chimici	18
8.2 Processi fisici	19
9. Riassunto e conclusioni	20
Ringraziamenti	22
Bibliografia e note	23

COLORAZIONE SIMIL-SINDONICA DI TESSUTI DI LINO TRAMITE RADIAZIONE NEL LONTANO ULTRAVIOLETTO: RIASSUNTO DEI RISULTATI OTTENUTI PRESSO IL CENTRO ENEA DI FRASCATI NEGLI ANNI 2005 - 2010

PREFAZIONE

Questo articolo riassume le ricerche effettuate presso il Centro ENEA di Frascati negli anni 2005 - 2010 allo scopo di comprendere meglio i meccanismi di formazione della misteriosa immagine corporea visibile sulla Sindone di Torino. Pur essendo scritto con intenti divulgativi, al lettore è richiesta una conoscenza di base dei meccanismi di interazione della luce con la materia, e delle caratteristiche della immagine sindonica. Per quanto concerne i concetti basilari dell'interazione luce-materia il lettore può consultare i testi di Fisica per i licei. Per quanto riguarda l'immagine sindonica, è possibile trovare numerosi testi divulgativi: uno dei più recenti e aggiornati è riportato nella referenza [1].

1. INTRODUZIONE

La doppia immagine (frontale e dorsale) di un uomo flagellato e crocifisso, visibile a malapena sul lenzuolo di lino della Sindone di Torino (vedi figura 1) presenta numerose caratteristiche fisiche e chimiche talmente peculiari [2] che rendono ad oggi impossibile ottenere in laboratorio una colorazione identica in tutte le sue sfaccettature, come discusso in numerosi articoli, elencati nelle referenze [3 - 21].

Questa incapacità di replicare (e quindi falsificare) l'immagine sindonica impedisce di formulare un'ipotesi attendibile sul meccanismo di formazione dell'impronta. Di fatto, ad oggi la Scienza non è ancora in grado di spiegare come si sia formata l'immagine corporea sulla Sindone. A parziale giustificazione, gli Scienziati lamentano l'impossibilità di effettuare misure dirette sul lenzuolo sindonico. Infatti, l'ultima analisi sperimentale *in situ* delle proprietà fisiche e chimiche dell'immagine corporea della Sindone fu effettuata nel lontano 1978 da un gruppo di 31 scienziati sotto l'egida dello Shroud of Turin Research Project, Inc. (STURP). Gli scienziati utilizzarono strumentazione all'avanguardia per l'epoca, messa a disposizione da diverse ditte produttrici per un valore commerciale di due milioni e mezzo di dollari, ed effettuarono numerose misure non distruttive di spettroscopia infrarossa, visibile e ultravioletta, di fluorescenza a raggi X, di termografia e pirolisi, di spettrometria di massa, di analisi micro-Raman, fotografia in trasmissione, microscopia, prelievo di fibrille e test microchimici [5 - 12]. Le analisi effettuate sul telo sindonico non trovarono quantità significative di pigmenti (coloranti, vernici) né tracce di disegni. Sulla base dei risultati delle decine di misure effettuate, i ricercatori STURP conclusero che l'immagine corporea non è dipinta, né stampata, né ottenuta tramite riscaldamento. Inoltre, la colorazione dell'immagine risiede nella parte più esterna e superficiale delle fibrille che costituiscono i fili del tessuto di lino, e misure effettuate recentemente su frammenti di telo sindonico [19] dimostrano che lo spessore di colorazione è estremamente sottile, pari a circa 200 nm = 200 miliardesimi di metro, ovvero un quinto di millesimo di millimetro, corrispondente allo spessore della cosiddetta parete cellulare primaria della singola fibrilla di lino. Ricordiamo che un singolo filo di lino è formato da circa 200 fibrille.

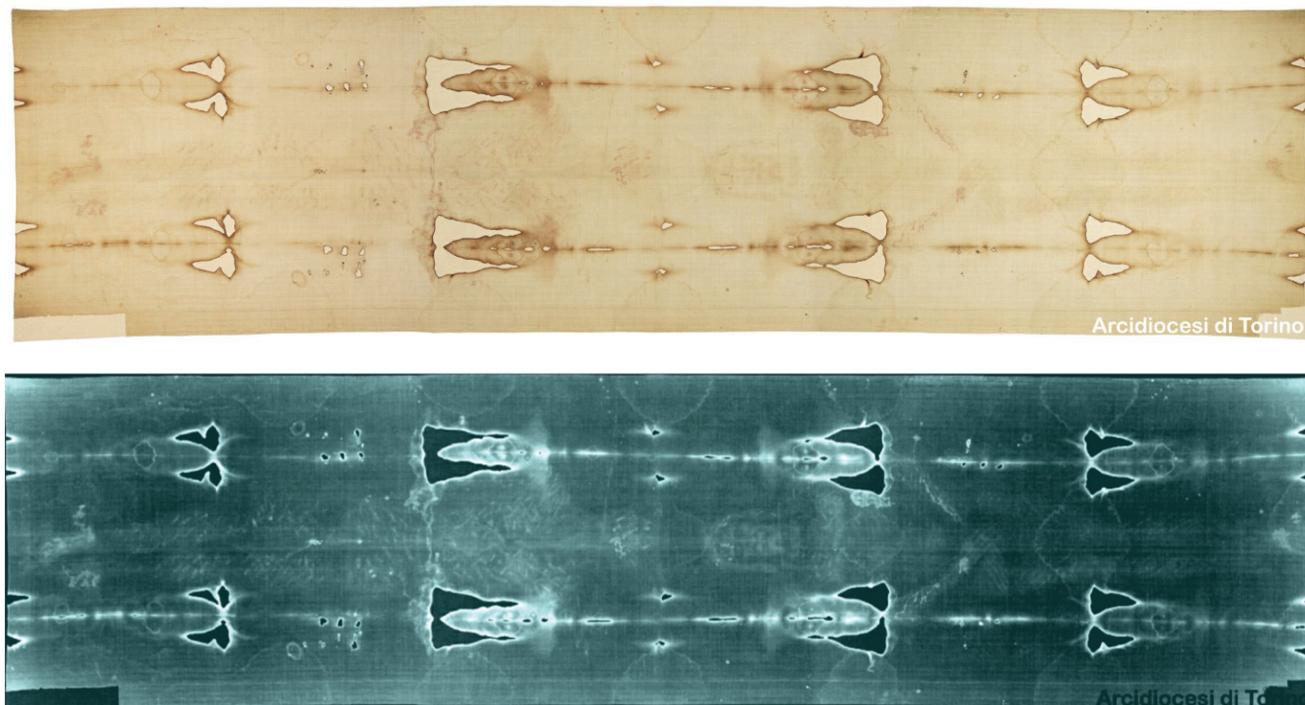


Figura 1. Fotografia della Sindone di Torino (dal sito www.sindone.org) e suo negativo bianco/nero ottenuto tramite software Jasc Paint Shop Pro7. Le dimensioni della Sindone sono di circa 441 cm in lunghezza e 113 cm in larghezza [2].

Altre importanti informazioni derivate dai risultati delle misure STURP sono le seguenti:

- a) Il sangue è umano, e non c'è immagine sotto le macchie di sangue [10, 12];
- b) la sfumatura del colore contiene informazioni tridimensionali del corpo;
- c) le fibre colorate (di immagine) sono più fragili delle fibre non colorate;

d) la colorazione superficiale delle fibrille di immagine deriva da un processo sconosciuto che ha causato ossidazione, disidratazione e coniugazione della struttura della cellulosa del lino [10]. In altre parole, la colorazione è conseguenza di un processo di invecchiamento accelerato del lino [12].

Come già accennato, fino ad oggi tutti i tentativi di riprodurre un'immagine su lino avente le medesime caratteristiche sono falliti. Alcuni ricercatori hanno ottenuto immagini aventi un aspetto simile all'immagine sindonica [7, 18, 20, 21] ma nessuno è mai riuscito a riprodurre simultaneamente tutte le caratteristiche microscopiche e macroscopiche. In questo senso, l'origine dell'immagine sindonica è ancora sconosciuta.

Questo sembra essere il nodo centrale del cosiddetto "mistero della Sindone": indipendentemente dall'età del lenzuolo sindonico, che sia medioevale (1260 - 1390) come risulta dalla controversa datazione al radiocarbonio [22, 23] o più antico come risulta da altre indagini [24], e indipendentemente dalla reale portata dei controversi documenti storici sull'esistenza della Sindone negli anni precedenti il 1260 [25 - 27], la domanda più importante, la "domanda delle domande" rimane la stessa: COME È STATA GENERATA L'IMMAGINE CORPOREA SULLA SINDONE?

Nel presente articolo ci avviciniamo a questo problema insoluto, riassumendo i principali risultati degli esperimenti di colorazione di lino effettuati presso il Centro ENEA di Frascati negli anni 2005 - 2010, allo scopo di individuare i processi fisici e chimici in grado di generare una colorazione simile a quella dell'immagine sindonica.

2. L' IPOTESI RADIATIVA

I risultati delle misure STURP brevemente riassunti nel paragrafo precedente hanno importanti conseguenze nella ricerca di possibili meccanismi di formazione dell'immagine. Elenchiamo alcune di queste conseguenze.

- Ci sono due possibilità su come il lenzuolo sindonico sia stato posto intorno al cadavere: posato sotto e sopra (non completamente a contatto con tutto il corpo irrigidito dal *rigor mortis*) oppure pigiato sul corpo e legato in modo da avere un contatto con quasi tutta la superficie corporea. La prima modalità è avvalorata dal fatto che esiste una precisa relazione tra l'intensità (sfumatura) dell'immagine e la distanza fra corpo e telo. Inoltre, l'immagine è presente anche nelle zone del corpo non a contatto con il telo, ad esempio immediatamente sopra e sotto le mani, e

intorno la punta del naso. La seconda modalità è meno probabile perché sono assenti le deformazioni geometriche tipiche di un corpo a tre dimensioni riportato a contatto su un lenzuolo a due dimensioni. Inoltre, manca l'impronta dei fianchi del corpo. Di conseguenza, possiamo dedurre che l'immagine non si è formata dal contatto del lino con il corpo. Questa considerazione, unita alla estrema superficialità della colorazione e all'assenza di pigmenti, rende estremamente improbabile ottenere una immagine simil-sindonica tramite metodi chimici a contatto, sia in un moderno laboratorio [20], sia a maggior ragione da parte di un ipotetico falsario medioevale.

- Sotto le macchie di sangue non c'è immagine. Questo significa che le tracce di sangue si sono depositate prima dell'immagine [12]. Quindi l'immagine si formò in un momento successivo alla deposizione del cadavere. Inoltre tutte le macchie di sangue hanno contorni ben definiti, senza sbavature, quindi si può ipotizzare che il cadavere non fu asportato dal lenzuolo.
- Mancano segni di putrefazione in corrispondenza degli orifizi, che si manifestano dopo circa 40 ore dalla morte. Di conseguenza, l'immagine non dipende dai gas di putrefazione e il cadavere non rimase nel lenzuolo per più due giorni.

Nel tentativo di soddisfare le condizioni poste da queste osservazioni sperimentali, alcuni lavori [14 - 17] hanno suggerito che una forma di energia elettromagnetica (ad esempio un lampo di luce a corta lunghezza d'onda) incidente su un tessuto di lino potrebbe avere i requisiti adatti a riprodurre le principali caratteristiche dell'immagine sindonica, quali la superficialità della colorazione, la sfumatura del colore, l'immagine anche nelle zone del corpo non a contatto con il telo e l'assenza di pigmenti sul telo.

I primi tentativi di riprodurre il volto sindonico tramite radiazione, utilizzarono un laser CO₂ che emette radiazione infrarossa (lunghezza d'onda $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, dove $1 \mu\text{m} =$ un milionesimo di metro) hanno prodotto una immagine su un tessuto di lino simile a livello macroscopico [21]. Tuttavia, l'analisi microscopica ha evidenziato una colorazione troppo profonda e molti fili di lino carbonizzati, caratteristiche incompatibili con l'immagine sindonica [2]. Una delle cause della carbonizzazione dei fili osservati in [21] è la lunghezza d'onda infrarossa della radiazione emessa dal laser CO₂. Infatti, la radiazione infrarossa a $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ eccita livelli energetici vibrazionali del materiale irraggiato, con conseguente rilascio di energia termica che riscalda istantaneamente la zona irraggiata del lino fino a carbonizzarla.

Al contrario, è noto che l'energia trasportata dalla radiazione a lunghezza d'onda corta (ultravioletto) agisce a livello fotochimico direttamente con i legami chimici del materiale irraggiato, senza indurre un riscaldamento significativo del materiale. Inoltre, tutti i materiali non metallici, incluso il lino, presentano un assorbimento molare che aumenta al diminuire della lunghezza d'onda della radiazione: di conseguenza, minore è la lunghezza d'onda della radiazione, più sottile è lo spessore del materiale che assorbe la stessa radiazione.

Con questi presupposti nel 2005 abbiamo considerato la radiazione ultravioletta (UV) come candidata in grado di ottenere due delle principali caratteristiche della immagine sindonica, ovvero un sottile spessore di colorazione e un processo di formazione dell'immagine a bassa temperatura [2, 10, 12]. Dapprima abbiamo irraggiato stoffe di lino con due laser eccimeri XeCl (lunghezza d'onda di emissione $\lambda = 0,308 \mu\text{m}$, cioè 34 volte più corta di quella del laser CO₂) che emettono impulsi di diversa durata, rispettivamente 120 nanosecondi e 33 nanosecondi a metà altezza [28 - 30]. L'analisi dei risultati ottenuti, riassunti nel paragrafo 3, ci ha suggerito che per ottenere una colorazione più simile a quella della Sindone avremmo dovuto utilizzare una radiazione a lunghezza d'onda ancora più corta, nello spettro del lontano ultravioletto (o ultravioletto da vuoto, VUV). La nostra scelta è stata di utilizzare il laser eccimero ArF che emette impulsi di elevata potenza di picco a $\lambda = 0,193 \mu\text{m}$ e i risultati degli irraggiamenti [31 - 33] sono descritti nel paragrafo 4.

3. RISULTATI SPERIMENTALI CON RADIAZIONE LASER UV

La figura 2 rappresenta lo schema di tutti gli irraggiamenti laser descritti in questo lavoro. Gli impulsi di luce emessi dal laser sono focalizzati (cioè concentrati, ridotti in dimensione) da una lente fino ad incidere su un tessuto di lino fissato e mantenuto in tensione su una cornice di legno. L'intensità degli impulsi laser (cioè l'energia per unità di tempo e per unità di superficie, incidente sul lino) viene variata cambiando la superficie del lino irraggiata, in pratica avvicinando o allontanando il tessuto dalla lente che concentra la radiazione laser, come mostrato in figura 2.

Quando abbiamo irraggiato i tessuti di lino con una sequenza di impulsi laser eccimero XeCl (lunghezza d'onda $\lambda = 0,308 \mu\text{m}$, energia laser 5 J/impulso, durata temporale di ciascun impulso 120 ns, dove $1 \text{ ns} = 1$ miliardesimo di

secondo), non siamo riusciti ad ottenere alcuna colorazione. Infatti, i tessuti irraggiati ad alta intensità risultavano carbonizzati, mentre a bassa intensità non presentavano alcuna modifica apprezzabile.

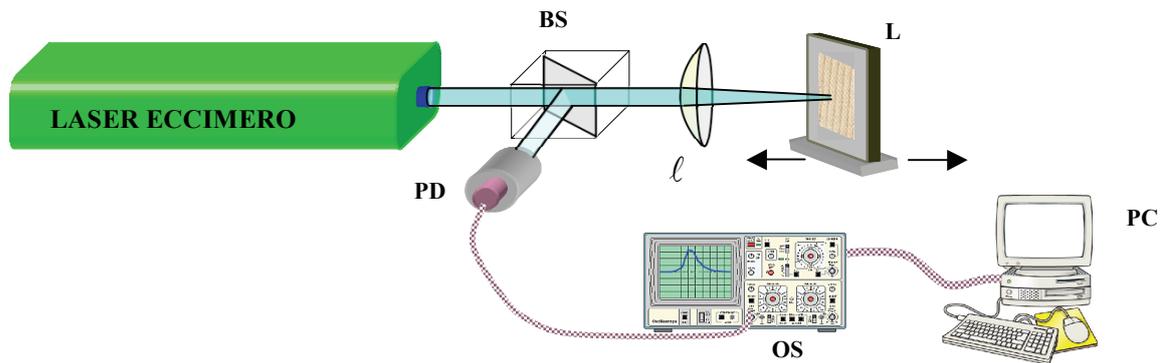


Figura 2. Schema degli irraggiamenti di tessuti di lino tramite laser. Gli impulsi di luce laser vengono concentrati dalla lente ℓ sul tessuto di lino L. L'intensità laser incidente sul lino viene variata muovendo L lungo l'asse ottico della lente. Una piccola parte dell'impulso laser viene prelevata dal divisore di fascio BS e monitorata dal fotodiodo PD e dall'oscilloscopio OS connesso con un personal computer PC, allo scopo di registrare in memoria la successione degli impulsi e quindi consentire l'elaborazione dei dati che tiene conto delle fluttuazioni da colpo a colpo dell'energia emessa dal laser. Schema tratto dalla referenza [29].

In seguito abbiamo irraggiato il lino con la radiazione emessa da un altro laser eccimero XeCl ($\lambda = 0,308 \mu\text{m}$, $0,4 \text{ J/impulso}$, 30 ns) che emette impulsi 4 volte più brevi ed una energia per impulso 12 volte minore rispetto al precedente laser. L'area irraggiata è stata scelta in modo da avere gli stessi valori di fluensa (energia per unità di superficie) laser incidenti sul lino dei precedenti irraggiamenti. In questa configurazione (stessa fluensa, durata temporale 4 volte più corta degli irraggiamenti precedenti) abbiamo ottenuto una colorazione permanente del lino in un ristretto intervallo di durata degli impulsi, di intensità e di sequenza (cioè numero impulsi laser e intervallo di tempo fra impulsi successivi). I risultati di questo esperimento sono dettagliati nella referenza [29]. In sintesi, abbiamo dimostrato che la combinazione di valori dei parametri laser necessaria a colorare il lino (in particolare la durata temporale degli impulsi laser, ma anche l'intensità, il numero di impulsi, la cadenza di ripetizione) è molto ristretta. Infatti, per ottenere la colorazione del lino gli impulsi devono avere una durata minore di 100 ns , e piccole variazioni degli altri parametri laser possono portare alla mancata colorazione del lino. Tuttavia, la tonalità della colorazione (marrone scuro o chiaro, a seconda dell'intensità laser e del numero di colpi, vedi figura 3) risultava più scura del giallo-seppia della immagine sindonica, e lo spessore della colorazione nei fili di lino era ben maggiore dei 200 nm delle fibre di immagine della Sindone [19].

Allo scopo di ottenere una colorazione più simile a quella sindonica, abbiamo usato un laser eccimero ArF che emette una lunghezza d'onda più corta, nello spettro VUV. In questo modo abbiamo ottenuto una colorazione più superficiale ed un miglior accordo con le caratteristiche volute, come descritto nel paragrafo seguente.



Figura 3. Foto al microscopio del tessuto di lino irraggiato con 100 impulsi laser XeCl ($\lambda = 0,308 \mu\text{m}$) e intensità sul lino $I = 16 \text{ MW/cm}^2/\text{impulso}$. Ricordiamo che $1 \text{ MW} = \text{un milione di Watt}$.

4. RISULTATI SPERIMENTALI CON RADIAZIONE LASER VUV

Il laser eccimero ArF ($\lambda = 0,193 \mu\text{m}$, $0,08 \text{ J/impulso}$, 12 ns) emette radiazione nella zona spettrale VUV con un'energia e una durata per impulso entrambi minori rispetto ai laser descritti nel paragrafo 3. In questo esperimento abbiamo utilizzato lo stesso schema di irraggiamento mostrato nella figura 2. Il lino è stato irraggiato in un ampio intervallo di intensità e numero di impulsi, e la Tabella riassume i principali risultati ottenuti.

Nella Tabella, le osservazioni a occhio nudo del lino irraggiato sono descritte in funzione del numero N di impulsi laser consecutivi, della intensità I per singolo impulso laser (quest'ultima mediata sulla superficie irraggiata) e della intensità totale I_T , definite come segue:

$$I = (1/A) \times \iint_{\sigma} I(x,y) dx dy, \quad (1)$$

e

$$I_T = (N/A) \times \iint_{\sigma} I(x,y) dx dy, \quad (2)$$

dove A = area della zona di lino irraggiata dal laser e $I(x,y)$ = intensità locale nei punti x,y della sezione σ del fascio laser. La Tabella dimostra che gli effetti della radiazione laser sul lino sono proporzionali alla intensità totale I_T e non sono correlati alla intensità di ciascun impulso I .

TABELLA. Riassunto dei principali risultati osservati sul lino in funzione dei parametri d'irraggiamento del laser eccimero ArF. 1 MW = un milione di Watt.

I (MW/cm ² /impulso)	N	I_T (MW/cm ²)	Risultati macroscopici sui lini
35	30	1050	Nessun cambiamento
14	100	1400	Modesta colorazione superficiale osservabile con luce radente
36	50	1800	Colorazione giallo-chiaro
10.5	200	2100	Colorazione gialla
11.2	200	2240	Colorazione gialla
6.6	402	2645	Colorazione giallo-seppia
6	600	3600	Colorazione giallo-seppia
13.3	500	6650	Ablazione

Una colorazione gialla come quella mostrata in figura 4 è ottenuta quando la combinazione di intensità di singoli impulsi (equazione 1) e di numero di impulsi genera un'intensità totale (equazione 2) nell'intervallo $I_T \approx (2000 - 4000) \text{ MW/cm}^2$. Quando $I_T > 4600 \text{ MW/cm}^2$ il lino è ablatato (parte del tessuto è vaporizzata e rimossa), e quando $I_T > 6000 \text{ MW/cm}^2$ il lino è sublimato (il tessuto è completamente vaporizzato e forato in corrispondenza del fascio laser).

Una proprietà interessante del lino irraggiato con laser ArF è la tonalità della colorazione, che varia continuamente dal giallo-chiaro al giallo-seppia all'aumentare di I_T . In altre parole, è possibile aggiustare il valore di RGB e le coordinate cromatiche [34] semplicemente variando la intensità laser totale, ad esempio tramite il numero degli impulsi laser.

A titolo esemplificativo, consideriamo la terza riga della Tabella. In questo caso abbiamo ottenuto una colorazione giallo-chiaro dopo 50 impulsi laser. Questo significa che ciascun impulso varia il contrasto ed il valore RGB della colorazione del lino di una quantità media molto piccola, pari a $1/50 \approx 2\%$, e di conseguenza abbiamo un controllo molto accurato della coordinate cromatiche. Infatti una variazione del 2% non può essere apprezzata a occhio nudo perché la colorazione dopo 50 impulsi (cioè il 100% di variazione di colore) è appena percepibile. Argomenti simili possono essere estesi dalla seconda fino alla settima riga della Tabella.

Le equazioni 1 e 2 mostrano che i valori delle intensità in Tabella sono mediati sull'area irraggiata. A causa del profilo spaziale dell'intensità del laser a "forma di campana", però, il valore dell'intensità locale $I(x,y)$ può differire in

modo sostanziale dall'intensità media I . Di conseguenza, in alcuni casi abbiamo osservato tutti i possibili effetti sul lino all'interno della stessa area irraggiata.

Ad esempio, la figura 5 mostra i fili di lino danneggiati nel centro della sezione del fascio laser (dove l'intensità è maggiore), mentre a un millimetro di distanza (dove l'intensità è minore) ci sono fili colorati gialli. Ad intensità ancora minori, vicino al bordo esterno della sezione del fascio laser, la figura 5 mostra che i fili sono inalterati.

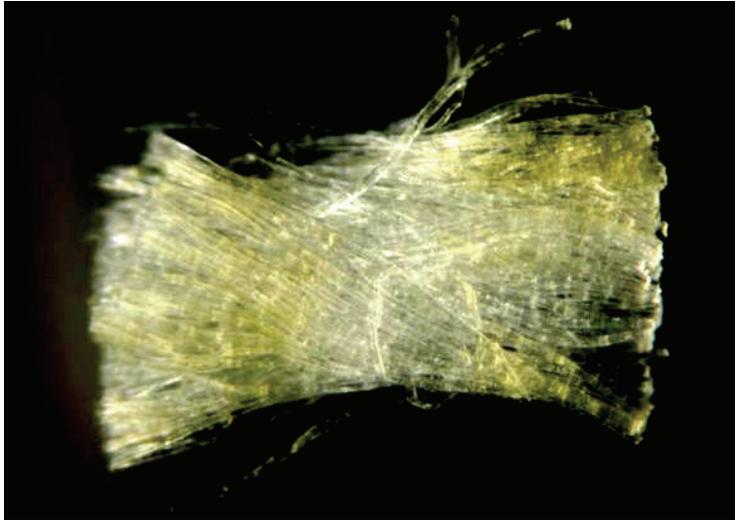


Figura 4. Microfotografia di un filo di ordito di lino irraggiato con laser ArF ($\lambda = 0,193 \mu\text{m}$) e una intensità laser totale $I_T = 2200 \text{ MW/cm}^2$. Il filo è stato schiacciato con una pinza per separare le fibrille e mettere in evidenza la colorazione gialla di alcune di esse. Al centro del filo si nota una zona non colorata a causa della copertura di un filo della trama che ha fatto ombra alla radiazione laser incidente. Foto tratta dalla referenza [33].



Figura 5. L'area del lino irraggiato dall'impulso del laser eccimero ArF mostra differenti caratteristiche che corrispondono ai valori locali della intensità $I(x,y)$. 1) area colorata; 2) area ablata; 3) area irraggiata al di sotto della soglia di colorazione. Foto tratta dalla referenza [32].

Per quanto riguarda la profondità della colorazione, le microfotografie (un esempio è mostrato nella figura 6a) mostrano spessori colorati compresi tra $7 \mu\text{m}$ e $26 \mu\text{m}$ nei fili irraggiati con differenti intensità totali [32]. Si tratta di un intervallo di spessori da 11 a 3 volte più sottili della profondità di colorazione raggiunta dalla radiazione a $\lambda = 0,308 \mu\text{m}$, vedi figura 6 [29, 30]. Questa evidenza sperimentale conferma che una minore lunghezza d'onda della radiazione laser produce una colorazione più superficiale. Poiché i fili del nostro tessuto di lino hanno un diametro medio di $0,3 \text{ mm}$ (pari a $300 \mu\text{m}$), si deduce che la luce laser a $\lambda = 0,193 \mu\text{m}$ penetra dal 2% al 9% del diametro del filo di lino a seconda delle specifiche condizioni di irraggiamento.

Abbiamo analizzato al microscopio un migliaio di fibrille su un totale di circa mezzo milione di fibrille irraggiate. Tra queste, ne abbiamo trovata una che mostra la parte interna (medulla) incolore, vedi figura 7, e in questo caso la

colorazione potrebbe interessare solo la pellicola più esterna della stessa fibra, la parete primaria cellulare, che ha uno spessore di circa 200 nm. Questo risultato si avvicina allo spessore di colorazione dell'immagine sindonica misurato nella referenza [19].

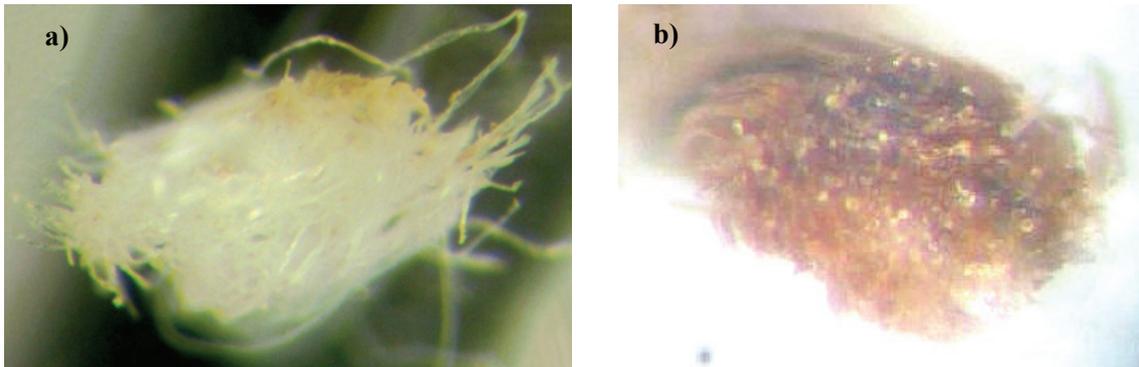


Figura 6. Microfotografie della sezione di due fili di lino rispettivamente colorati da irraggiamento laser ArF (a) e XeCl (b) con gli impulsi laser incidenti “dall’alto” rispetto alle foto. Il differente spessore di colorazione nei due casi è evidente: mentre nella foto a) gli impulsi laser VUV colorano una piccola parte superficiale del filo, corrispondente ad alcune fibrille in alto, nella foto b) gli impulsi laser UV colorano quasi tutta la sezione del filo. Entrambi i fili hanno un diametro medio di 300 μm . Foto tratta dalla referenza [32].



Figura 7. Immagine al microscopio di una singola fibrilla di lino colorata con il laser ArF. Il danneggiamento meccanico nella parte centrale mostra la parte interna della medulla incolore. Il diametro medio della fibrilla è di 20 μm . Questa immagine è stata ottenuta aumentando il contrasto di un dettaglio della Figura 8 nella referenza [32].

5. COLORAZIONE LATENTE

Il processo di invecchiamento (e conseguente disidratazione) può provocare una colorazione dei fili nella sola area irraggiata dalla luce laser anche quando non appare nessuna colorazione subito dopo l'irraggiamento, come descritto nel seguito. Abbiamo tagliato a metà una porzione di lino irraggiato con $I_T = 1400 \text{ MW/cm}^2$, cioè sotto la soglia di colorazione, vedi Tabella. Di conseguenza, il lino irraggiato non appare colorato. Abbiamo quindi scaldato una delle due parti con un ferro da stiro alla temperatura di $190 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ per 10 secondi, e una colorazione appare subito dopo il riscaldamento nella sola area irraggiata dal laser. La figura 8 mostra che il processo di riscaldamento, che simula invecchiamento, colora solo la superficie irraggiata sotto soglia, e non colora le zone non irraggiate. Inoltre, quando si riscalda un pezzo di stoffa irraggiato nelle condizioni della prima riga della Tabella, non si osserva alcuna colorazione latente dopo riscaldamento. Ciò significa che siamo al di sotto della soglia per questo fenomeno. Quindi siamo in grado di stabilire che l'intervallo della intensità totale per ottenere una colorazione latente è $I_T \approx (1100 - 1700) \text{ MW/cm}^2$, che corrisponde ad una fluena totale (energia totale irraggiata per unità di superficie) pari a $F_T \approx (13 - 20) \text{ J/cm}^2$. Infine, riscaldando un lino già colorato, cioè irraggiato sopra la soglia di colorazione, abbiamo osservato un maggiore contrasto, un rinforzamento della colorazione rispetto all'area circostante non irraggiata.

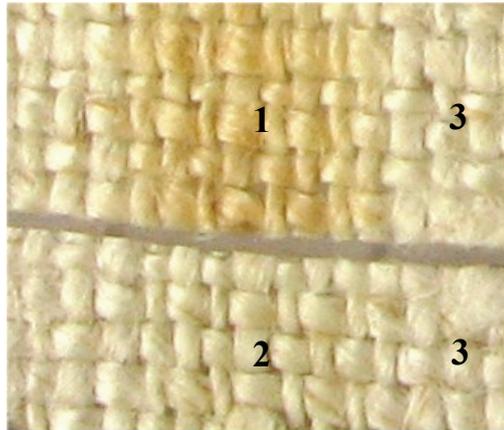


Figura 8. Tessuto di lino dopo irraggiamento laser ArF ad di sotto della soglia di colorazione. Il taglio divide a metà la zona irraggiata. 1) Area irraggiata e sottoposta a riscaldamento. 2) Area irraggiata non sottoposta a riscaldamento. 3) Area non irraggiata. Foto tratta dalla referenza [32].

Abbiamo ottenuto risultati analoghi a quello della figura 8 anche utilizzando il laser XeCl verificando che la colorazione latente appare dopo un invecchiamento naturale di oltre un anno, mantenendo il lino irraggiato sotto soglia in un cassetto al buio [29].

L'importanza di questi risultati di colorazione latente è duplice. Da una parte c'è l'interesse scientifico di un doppio meccanismo sinergico di colorazione (la luce UV e VUV che spezza alcuni legami chimici favorendo l'effetto ossidante e disidratante del calore) e che verrà discusso nel paragrafo 8.1. D'altra parte c'è l'interesse degli storici, attratti dalla possibilità che l'immagine sulla Sindone possa essersi resa visibile a distanza di tempo (anni) dal momento in cui si è formata la stessa immagine.

6. FLUORESCENZA ULTRAVIOLETTA

Il tessuto di lino, come tutti i materiali organici, emette luce fluorescente blu quando è illuminato da luce UV. Tuttavia, le fibrille di immagine della Sindone non emettono luce fluorescente [5, 7, 12]. Si tratta di una delle peculiari caratteristiche dell'immagine sindonica.

La figura 9a mostra un tessuto di lino già irraggiato dal laser eccimeri quando è illuminato con la luce UV di una lampada. La zona centrale a forma di ellisse, che è stata irraggiata e colorata dal laser, non fluoresce, a differenza del resto del lino. Questo risultato suggerisce che la radiazione VUV del laser ha modificato la struttura elettronica (in particolare la distribuzione di elettroni nelle bande di valenza e conduzione) dei fili di lino irraggiati in modo da inibire la fluorescenza tipica del tessuto. Le fibrille colorate della Sindone si comportano allo stesso modo.

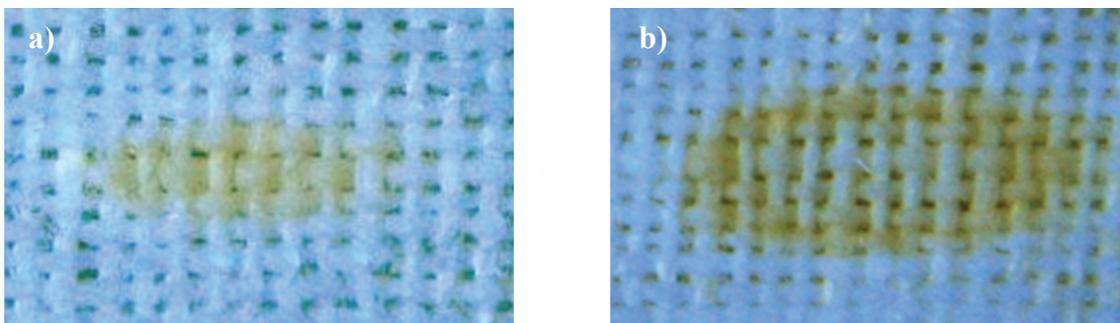


Figura 9. a) Fluorescenza blu indotta da lampada ultravioletta sul lino dopo irraggiamento con laser eccimeri ArF nel punto di lavoro della terza riga della Tabella. L'area irraggiata è riconoscibile dalla mancanza di fluorescenza. b) Fluorescenza blu indotta da lampada ultravioletta sul lino dopo irraggiamento con laser eccimeri ArF nel punto di lavoro della settima riga della Tabella. In questo caso la mancanza di fluorescenza non è uniforme su tutta la regione irraggiata. Foto tratte dalla referenza [33].

Analogamente a quanto osservato nel processo di colorazione, la mancanza di fluorescenza delle fibrille irradiate avviene solamente in un ristretto intervallo dei parametri di irraggiamento. Ad esempio, la figura 9b mostra che un

irraggiamento laser troppo intenso inibisce la fluorescenza solamente in un anello ellissoidale laddove gli impulsi laser, che presentano un profilo spaziale di intensità a forma di campana, avevano il giusto valore di I_T . All'interno di questa zona anulare la intensità laser è troppo forte, mentre al suo esterno è troppo debole per inibire la fluorescenza.

E' importante notare che l'intera ellisse della figura 9b appare uniformemente colorata giallo-seppia quando osservata alla luce del giorno (vedi la settima riga della Tabella). Ciò significa che la fluorescenza indotta dalla radiazione UV fornisce un'informazione più accurata e selettiva rispetto ad un'ispezione visuale. Infatti, essa permette di riconoscere regioni di lino colorate con intensità troppo elevate per ottenere l'inibizione della fluorescenza, ma che risultano ad occhio nudo comunque colorate giallo-seppia.

7. ULTERIORI ESPERIMENTI

A valle dei risultati ottenuti, ci siamo posti alcune domande, alle quali abbiamo dato risposta con ulteriori esperimenti descritti nel seguito.

7.1 Il nostro lino è diverso dal lino della Sindone?

In un esperimento di colorazione simil-sindonica è lecito domandarsi quanto sia diverso il tessuto di lino che si utilizza dal lino della Sindone, a parte ovviamente l'età. I nostri esperimenti sono di tipo ottico, quindi abbiamo effettuato misure atte a fornire le principali caratteristiche ottiche del nostro lino per confrontarle con quelle del lino della Sindone. A tale scopo, abbiamo misurato la riflettanza spettrale assoluta del nostro lino tramite uno strumento di elevata tecnologia, uno spettrofotometro Perkin-Elmer Lambda 950TM, equipaggiato con sfera integratrice da 15 cm di diametro. L'interno della sfera e il riferimento sono ricoperti di un materiale plastico denominato Spectralon, le cui caratteristiche di riflessione Lambertiana sono quasi pari al 100% e praticamente costanti su tutto lo spettro UV-visibile-vicino infrarosso. Inoltre, lo strumento dispone di una calibrazione interna del materiale Spectralon, che permette di ottenere direttamente spettri di riflettanza assoluta [35].

I risultati della misura spettrale della riflettanza assoluta emisferica $R(\lambda)$, cioè la percentuale di luce riflessa dal nostro lino rispetto a quella incidente sono riportati nella figura 10 insieme ai risultati di riflettanza spettrale misurati sul lino della Sindone come riportati nella referenza [5]. Si può notare che lo spettro di riflettanza del nostro lino è identico a quello del tessuto della Sindone. Quindi, dal punto di vista ottico, il nostro lino si comporta esattamente come il lino della Sindone.

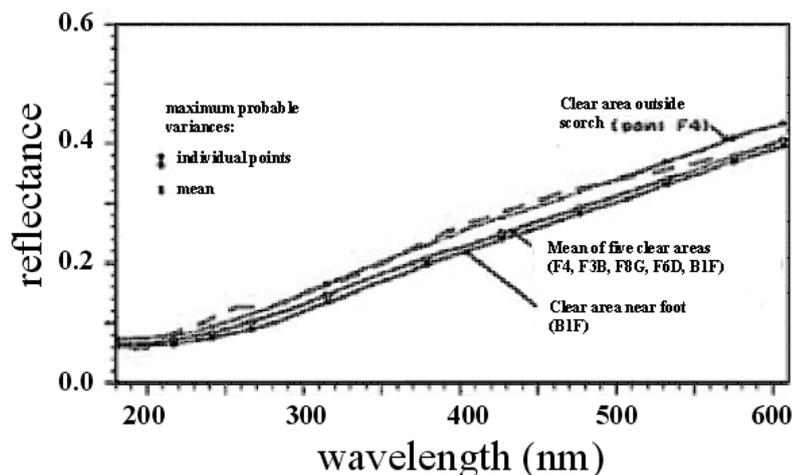


Figura 10. La linea tratteggiata mostra la riflettanza emisferica assoluta del lino utilizzato negli esperimenti descritti in questo lavoro in funzione della lunghezza d'onda λ in nm. Le linee continue mostrano la riflettanza assoluta del tessuto di lino della Sindone, nelle zone non di immagine, riportata in [5]. Figura tratta dalla referenza [32].

Questa inattesa identità tra i risultati della misura di riflettanza del lino effettuata dagli scienziati STURP e quelli ottenuti oggi con uno spettrofotometro molto più preciso ed avanzato di quello disponibile nel 1978 evidenzia la professionalità degli scienziati STURP e la estrema cura con la quale furono effettuate le misure *in situ* sulla Sindone.

Con lo stesso spettrofotometro abbiamo misurato anche la trasmittanza emisferica $T(\lambda)$ del lino (cioè la percentuale di luce trasmessa dal nostro lino rispetto a quella incidente) in funzione della lunghezza d'onda. Quindi, conoscendo $R(\lambda)$ e $T(\lambda)$ possiamo dedurre l'assorbanza spettrale $A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda)$ ovvero la quantità di luce assorbita dal lino in funzione della lunghezza d'onda, e i risultati sono riportati nella figura 11.

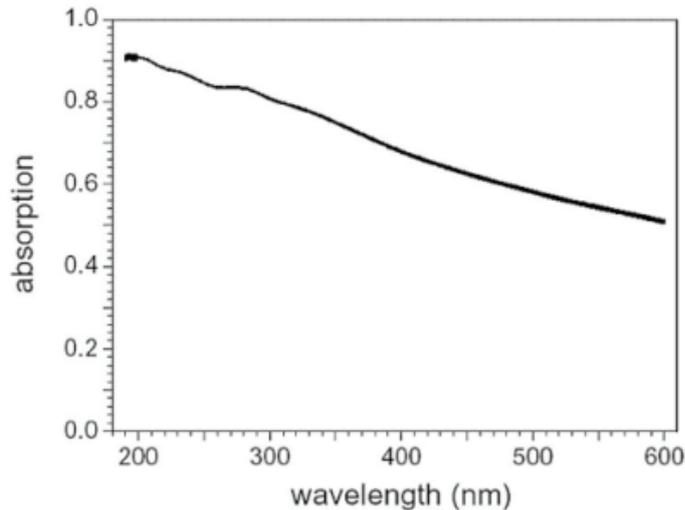


Figura 11. Grafico riassuntivo del valore assoluto dell'assorbanza del lino in funzione della lunghezza d'onda λ in nm. Questo grafico è stato ottenuto sottraendo ad 1 la riflettanza spettrale assoluta $R(\lambda)$ riportata in figura 10 e la trasmittanza spettrale $T(\lambda)$. Sia $R(\lambda)$ che $T(\lambda)$ sono state misurate dallo spettrofotometro Perkin-Elmer Lambda 950TM. Figura tratta dalla referenza [32].

7.2 La luce laser invecchia il lino?

Il processo di ossidazione e disidratazione che produce l'immagine sindonica può essere considerato una sorta di invecchiamento accelerato del lino [10]. Per verificare se l'irraggiamento laser comporta un analogo invecchiamento abbiamo osservato alcune fibre di lino poste tra due polarizzatori incrociati in un microscopio petrografico per rivelare eventuali cambiamenti nella struttura cristallina delle fibre indotte dall'irraggiamento laser. Il microscopio petrografico può mettere in evidenza un motivo di linee isocromatiche che dipendono da diversi parametri quali l'età del campione, gli stress meccanici, la presenza di difetti. Quando le fibre sono allineate all'asse di polarizzazione dell'analizzatore, appare un'area scura: infatti, in questo caso le fibre sono poste "ad estinzione", e la birifrangenza non è visibile [36]. Se una parte della fibra allineata ad estinzione viene danneggiata, questa diviene birifrangente e appare luminosa, perché la zona danneggiata ha un'orientazione cristallina differente rispetto al resto della fibra.

La figura 12 dimostra che solo la parte della fibra irraggiata presenta zone luminose, sintomo di fragilità e difetti e fratture indotte dalla radiazione laser, in analogia a quanto osservato sulle fibre di lino molto antiche, come quelle con cui sono state avvolte mummie egizie e come le fibre della Sindone [11, 37]. Possiamo quindi dedurre che la luce UV ad elevata intensità danneggia la struttura cristallina delle fibre di lino in modo analogo alle radiazioni di bassa intensità (radon, radioattività naturale, particelle secondarie da raggi cosmici) accumulate in millenni.

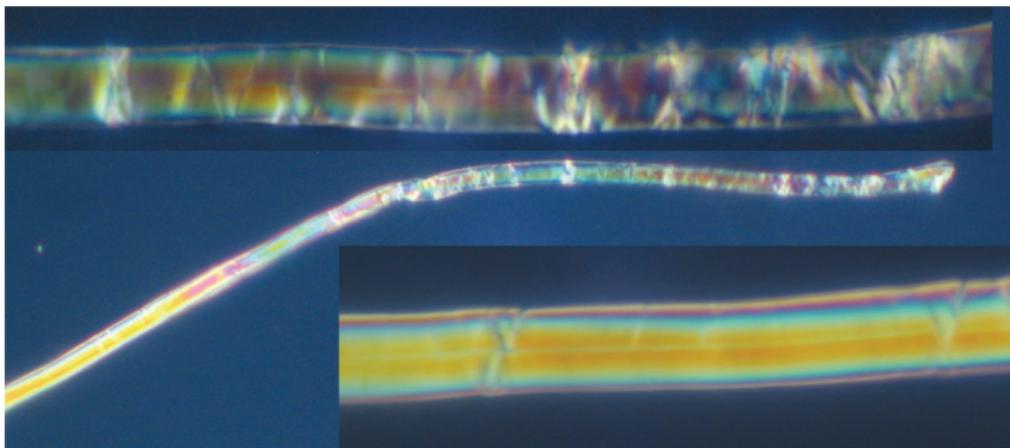


Figura 12. Osservazioni al microscopio petrografico di fibrille di lino. Al centro c'è una fibrilla parzialmente colorata, osservata in olio a indice 1,515 tra due polarizzatori incrociati. La parte sinistra della fibrilla è la zona non irraggiata, ingrandita nell'insero basso della figura. La parte destra della fibrilla è la zona irraggiata con laser XeCl, ingrandita nell'insero in alto della figura. Foto tratta dalla referenza [29].

7.3 La colorazione tramite luce laser eccimero è un effetto termico o fotochimico?

Come discusso nel paragrafo 2, uno dei motivi delle notevoli differenze visibili al microscopio tra le fibrille di immagine della Sindone e le fibrille colorate tramite laser CO₂ [21] risiede nel forte riscaldamento del lino indotto dalla luce infrarossa emessa dal laser CO₂. Allo scopo di verificare sperimentalmente se la luce UV e VUV dei nostri laser eccimeri interagisce in modo fotochimico con il lino, senza indurre un significativo riscaldamento del tessuto irraggiato, abbiamo utilizzato la fotocamera ThermoShot F30 [38] dotata di micro-bolometri sensibili all'infrarosso nell'intervallo spettrale 8 μm - 13 μm con incertezza ± 0,2 °C. La fotocamera è stata posta di fronte al tessuto durante gli irraggiamenti laser, monitorando in tempo reale la temperatura di tutto il tessuto di lino, sia nella zona irraggiata dagli impulsi laser che in quella non irraggiata.

Le figure 13a e 13b mostrano i risultati. Data la temperatura ambiente che oscilla tra 20 e 21 °C la zona irraggiata dal laser XeCl ($\lambda = 0,308 \mu\text{m}$) si scalda fino a 33 °C, mentre il lino irraggiato dal laser ArF ($\lambda = 0,193 \mu\text{m}$) si scalda appena a 25 °C. Ricordando che gli effetti termici in grado di colorare il lino necessitano di temperature prossime ai 200 °C [11], possiamo concludere senza ombra di dubbio che l'effetto di colorazione tramite laser eccimero è dovuto ad un processo fotochimico che non coinvolge effetti termici significativi.

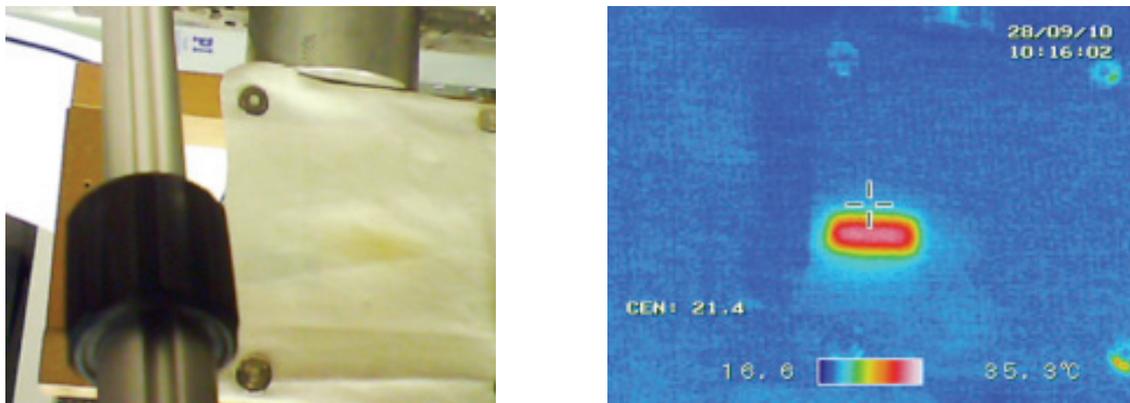


Figura 13a. A sinistra: foto in luce visibile del tessuto di lino durante irraggiamento con laser XeCl. Si può notare l'area irraggiata, leggermente ingiallita. A destra, stessa foto in luce infrarossa, dove si vede chiaramente l'area irraggiata dal laser XeCl. La scala cromatica in basso permette di appurare che la zona più calda del lino (al centro dello spot laser) raggiunge i 33 °C, mentre la zona non irraggiata si trova alla temperatura ambiente di 20 °C.

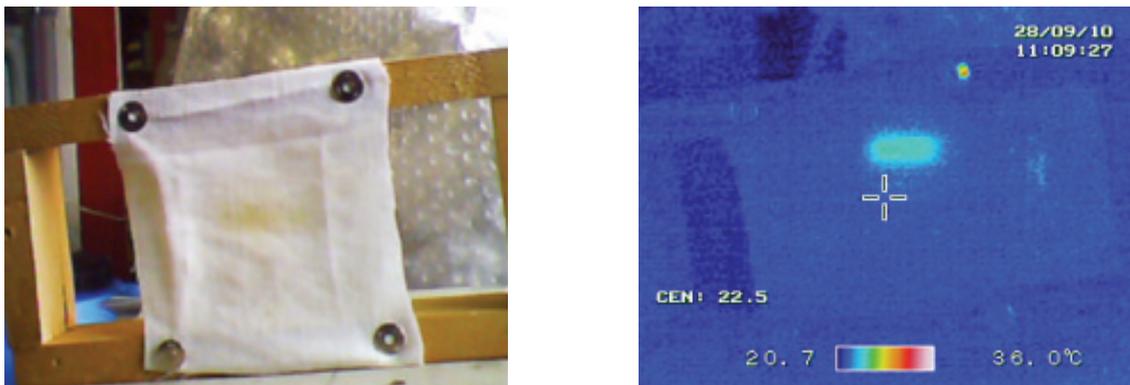


Figura 13b. A sinistra: foto in luce visibile del tessuto di lino durante irraggiamento con laser ArF. Si può notare l'area irraggiata, ingiallita. A destra, stessa foto in luce infrarossa, dove è facile riconoscere l'area irraggiata dal laser ArF. La scala cromatica rivela che la zona più calda del lino (al centro dello spot laser) raggiunge i 25 °C, mentre la zona non irraggiata si trova alla temperatura ambiente di 21 °C.

8. ANALISI DEI RISULTATI

Ricapitolando, siamo riusciti ad ottenere una colorazione del lino avente sia la tonalità di colore sia uno spessore di colorazione che si avvicinano a quelle della immagine impressa sulla Sindone di Torino. Abbiamo anche ottenuto una colorazione latente, cioè che appare a distanza di tempo dall'irraggiamento laser grazie ad un doppio meccanismo sinergico di colorazione (la luce UV e VUV che spezza alcuni legami chimici favorendo l'effetto ossidante e

disidratante del calore). Inoltre abbiamo dimostrato che la luce laser UV e VUV produce una fragilità e uno stress alle fibrille di lino equivalenti ad un invecchiamento accelerato del tessuto. Infine, abbiamo dimostrato che la colorazione non è dovuta ad un effetto termico, in analogia con le caratteristiche dell'immagine sindonica [2, 11, 12].

Ovviamente, nessuno può ipotizzare che l'immagine corporea della Sindone sia stata prodotta da una serie di lampi di luce VUV emessi da un laser. Piuttosto, i nostri risultati mostrano come il laser eccimeri è un potente strumento di indagine per simulare i processi fisici e chimici a cui potrebbe essere stata sottoposta la Sindone e che potrebbero aver causato la sua peculiare colorazione. Allo scopo di comprendere meglio questi processi, è necessario entrare nel dettaglio di alcune proprietà chimiche e fisiche dei tessuti di lino.

8.1 Processi chimici.

Ciascun filo di lino è costituito da circa 200 fibre elementari aventi una struttura cilindrica con lunghezza media di 30 millimetri e diametro medio di 20 micrometri, chiamate fibrille. Ciascuna fibrilla di lino presenta una parte interna (medulla) di pura cellulosa, e una sottilissima (0,2 μm) pellicola esterna composta di emicellulosa, cellulosa e altri componenti minori. Questa pellicola esterna è chiamata parete primaria cellulare [39, 40].

Le referenze [10, 11, 41] dimostrano che la colorazione estremamente superficiale della immagine sindonica è stata formata da un processo sconosciuto che ha causato ossidazione, disidratazione e coniugazione della struttura polisaccaride delle fibre di lino, fino a produrre un gruppo coniugato carbonile come cromoforo. In altre parole, la colorazione è conseguenza di un processo di invecchiamento accelerato del lino. La figura 14 mostra due differenti transizioni chimiche probabilmente coinvolte nella formazione dell'immagine sul lino della Sindone.

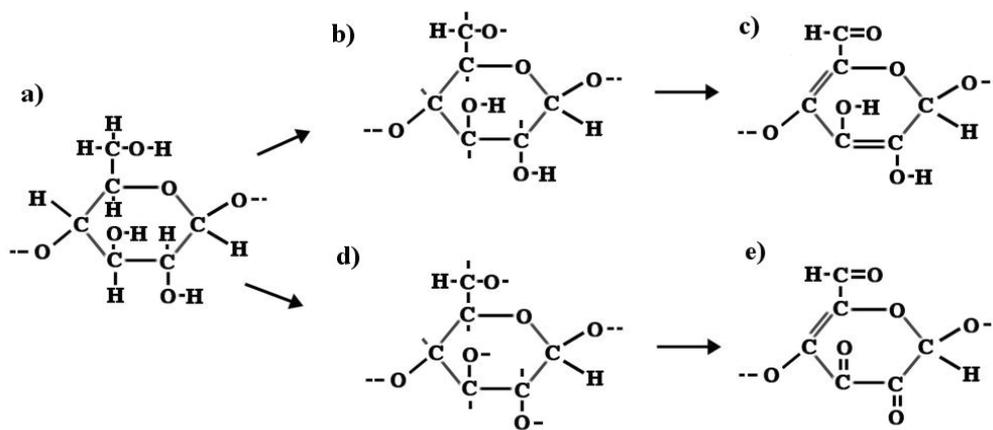


Figura 14. a) Principale struttura molecolare sia della cellulosa che della emicellulosa. Ci sono due possibili transizioni (a) → (b) → (c), e (a) → (d) → (e) che trasformano la cellulosa e l'emicellulosa in un cromoforo costituito da gruppi carbonili coniugati dopo aver subito processi di ossidazione e disidratazione. I doppi legami C=C in (c) ed (e) sono i principali responsabili della colorazione gialla delle fibre di immagine della Sindone di Torino. Figura rielaborata dalla referenza [41].

I differenti spessori di colorazione ottenuti con i laser eccimeri XeCl e ArF (vedi paragrafi 3 e 4 e figura 6) possono essere dovuti alla differente lunghezza d'onda. Infatti, una λ più corta penetra di meno nel tessuto e di conseguenza l'energia assorbita per unità di volume è maggiore. Tuttavia, in [31, 32] abbiamo mostrato sperimentalmente che c'è solo una differenza dell'11% nell'assorbimento del lino tra 0,193 μm e 0,308 μm , come mostrato nella figura 11. Allora è necessario individuare un meccanismo addizionale per spiegare i differenti spessori di penetrazione della luce nelle fibrille e la differente colorazione, cioè giallo o giallo-seppia dopo irraggiamento a 193 μm e marrone-chiaro o marrone dopo irraggiamento a 308 μm .

Questo meccanismo addizionale potrebbe essere promosso dalla banda di assorbimento al di sotto di 0,260 μm dei gruppi carbonili chetonici (-C=O) che promuovono l'ingiallimento della emicellulosa nella parete primaria cellulare [39, 41, 42]. In altre parole, la radiazione VUV a 0,193 μm è assorbita dai carbonili chetonici e conduce alla degradazione fotolitica dell'emicellulosa, causando la dissociazione dei legami molecolari che promuove le reazioni chimiche schematizzate nella figura 14. A livello macroscopico, tali reazioni producono la colorazione gialla simil-sindonica (figure 4, 5, 6a, 7).

Si noti che la radiazione UV a 0,308 μm è troppo lunga per rientrare nella banda di assorbimento dei carbonili chetonici, mentre può essere assorbita dai gruppi aldeidi (-CHO) [42]. Quindi, la radiazione UV non è in grado di

iniziare il processo a molti passi sopra descritto che conduce all'ingiallimento della cellulosa ed emicellulosa. Infatti sperimentalmente la radiazione UV a $0,308 \mu\text{m}$ produce una colorazione marroncina del lino (vedi figura 3) e una maggiore fragilità evidenziata dalla birifrangenza (figura 12).

In questo contesto, la formazione delle immagini latenti descritte nel paragrafo 5 può essere spiegata dalla ossidazione e disidratazione della cellulosa (causata dal calore) che modifica i "nuovi" legami chimici indotti dall'irraggiamento laser facilitando la formazione delle strutture coniugate insature che sono parte essenziale delle due transizioni chimiche descritte nella figura 14. Questa sinergia tra calore e luce UV è ben descritta nella referenza [43] che mostra come il processo di colorazione della cellulosa iniziato dalla esposizione alla radiazione UV è accelerato e rinforzato dal calore.

8.2 Processi fisici.

Una importante questione riguarda il diverso ruolo della densità di potenza (intensità) e della densità di energia (fluenza) della radiazione laser nella colorazione del tessuto di lino. Abbiamo mostrato nel paragrafo 3 che due impulsi laser eccimeri XeCl aventi la stessa fluenza ma differenti durate di impulso, producono differenti risultati di colorazione. Questo risultato suggerisce che l'intensità è il parametro chiave. Tuttavia, la Tabella mostra che impulsi laser successivi sommano i loro effetti, e se da una parte la Tabella conferma che l'intensità totale è il parametro chiave, d'altra parte, essendo la durata dell'impulso costante, la variazione dell'intensità totale si ottiene da una proporzionale variazione della fluenza totale. Quindi, il parametro dominante potrebbe essere il numero totale dei fotoni per unità di superficie (cioè la fluenza totale).

Questa apparente dicotomia testimonia il fatto che stiamo osservando un processo fotochimico complesso, dove l'intensità e la fluenza possono giocare a turno un ruolo dominante, a seconda della durata degli impulsi, del numero dei fotoni per impulso, del numero degli impulsi consecutivi e della frequenza di ripetizione degli impulsi laser.

Cerchiamo ora di comprendere perché è così difficile ottenere la colorazione della sola parete primaria cellulare della fibra di lino (vedi figura 7). Come già riportato in sezione 4, il profilo di intensità del fascio del laser eccimeri non è uniforme, e mostra fluttuazioni spaziali di frequenza elevata, che possono essere rivelate e misurate da una camera CCD ad alta risoluzione spaziale, come illustrato nella figura 15.

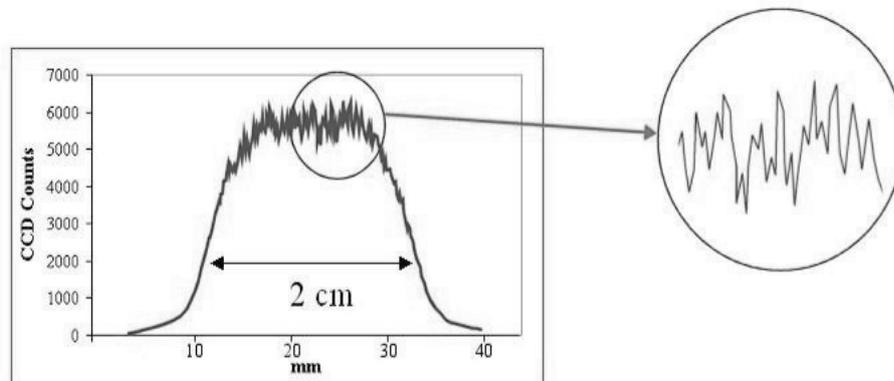


Figura 15. Profilo unidimensionale dell'intensità di un fascio laser misurato da una camera CCD, modello Andor DV-430UV, con una risoluzione di singolo pixel pari a $22 \mu\text{m} = 0,0022 \text{ cm}$. L'inserto mostra un ingrandimento delle fluttuazioni spaziali di alta frequenza. Figura tratta dalla referenza [33].

Le fluttuazioni di intensità in figura 15 hanno un periodo irregolare, con gradienti di intensità (derivata spaziale dell'intensità) fino a $350 \text{ MW}/\text{cm}^2$ per centimetro. In altre parole, il valore di intensità laser incidente su due punti del lino distanti un millimetro può variare fino a $35 \text{ MW}/\text{cm}^2$. Questo enorme valore del gradiente di intensità può spiegare il motivo per cui sia possibile ottenere il "giusto" valore di intensità per una colorazione sub-micrometrica solamente in una zona limitata, difficile da individuare tramite microfotografie.

Passiamo ora a commentare una importante differenza tra la colorazione del lino tramite laser VUV e l'immagine sindonica. Microfotografie e campioni mostrano che la sfumatura dell'immagine sindonica (cioè il passaggio da zone più colorate ad altre contigue meno colorate) è il risultato della diversa concentrazione di fibre colorate alternate a fibre non colorate e NON da fibrille colorate in modo diverso [2, 7, 44]. Inoltre, la colorazione dell'area di immagine possiede una distribuzione discontinua lungo i fili intrecciati della Sindone, e sono presenti striature [44]. Queste caratteristiche non si riscontrano nei nostri tessuti irraggiati con laser, che presentano fluttuazioni di colorazione su

distanze più ampie delle singole fibrille, vedi figura 5. Tuttavia, sarebbe possibile ottenere queste caratteristiche tramite impulsi laser aventi una peculiare forma spaziale di intensità, simile al profilo a “dente di sega” con periodo variabile. Per ottenere tali impulsi, grazie all’attuale stato dell’arte dell’ottica diffrattiva, è possibile oggi modulare la distribuzione spaziale dei fasci laser in modo da creare un profilo di intensità in grado di riprodurre striature e una distribuzione discontinua di fibre colorate lungo la trama dei lini.

In linea di principio, dunque, un esperimento condotto con un sistema laser eccimeri associato a ottiche diffrattive opportunamente progettate e collegate ad un computer e a un sistema di movimentazione micrometrica XY consentirebbe di replicare con precisione le caratteristiche dell’immagine della Sindone. Uno sforzo in tal senso, però, andrebbe ben oltre lo scopo delle nostre ricerche. Infatti il nostro obiettivo non è la perfetta riproduzione della intera immagine sindonica con un laser eccimeri, ma vuole piuttosto essere un contributo alla migliore comprensione dei processi fisici e chimici che hanno portato all’immagine corporea impressa sulla Sindone.

9. RIASSUNTO E CONCLUSIONI

In questo lavoro abbiamo riassunto brevemente lo stato dell’arte delle conoscenze sulla immagine sindonica, e spiegato i motivi dell’estrema difficoltà nel riprodurre una immagine avente le stesse caratteristiche fisiche e chimiche, con la conseguenza che ad oggi la Scienza non è ancora in grado di spiegare come si sia formata l’immagine corporea sulla Sindone. Alla luce di queste elevate difficoltà tecnologiche e scientifiche, l’ipotesi di un falsario medioevale non sembra ragionevole.

Abbiamo quindi riepilogato gli studi e le attività sperimentale svolti presso i laboratori del Centro Ricerche ENEA di Frascati che hanno dimostrato la capacità di impulsi di luce VUV della durata di alcuni nanosecondi di colorare solo la parte più esterna del tessuto di lino, che è una delle caratteristiche dell’immagine sindonica più difficili da replicare.

Questa capacità della luce UV e VUV di colorare il lino in modo similisindonico è un risultato importante, perché permette di chiarire in modo definitivo i termini di una polemica a distanza tra due dei maggiori scienziati STURP: da una parte John Jackson che già nel 1990 prevedeva la possibilità di colorare il lino tramite radiazione VUV [15], dall’altra Ray Rogers convinto che un irraggiamento laser avrebbe scaldato e vaporizzato il lino, senza colorarlo [45]. L’opinione di Rogers era basata sul fallimento dei tentativi di colorazione di tessuti di lino tramite laser eccimeri negli esperimenti effettuati dai suoi collaboratori a Los Alamos, ma i nostri risultati dimostrano che la mancata colorazione era dovuta ad una durata dell’impulso laser (50 miliardesimi di secondo) troppo lunga e ad una intensità fuori il giusto intervallo di valori.

Per comodità, proviamo a suddividere le conseguenze dei nostri risultati in “dirette” e “indirette”.

Conseguenza dirette

1. Il processo di colorazione ottenuto è di tipo fotochimico, in quanto il riscaldamento termico associato all’irraggiamento laser sia UV sia VUV è di pochi gradi centigradi e quindi irrilevante ai fini della colorazione, vedi figura 13. Questo risultato ben si accorda con le risultanze degli studi STURP che avevano escluso un processo di colorazione a temperature elevate, superiori ai 200 °C [11, 12].
2. La colorazione del lino si può ottenere solo in un ristretto intervallo di parametri laser: in particolare, la durata temporale del singolo impulso laser deve essere più breve di 50 - 100 miliardesimi di secondo [28, 29].
3. I risultati più interessanti sono stati ottenuti con luce VUV. La colorazione permanente è un effetto a soglia, cioè la colorazione si ottiene solo se l’intensità totale laser supera un certo valore (stiamo parlando di alcune migliaia di megawatt per centimetro quadro). Per intensità superiori al “giusto” intervallo di valori il lino viene vaporizzato, per intensità inferiori a 1100 MW/cm² il lino non si colora affatto. Anche quando l’intensità totale è sopra la soglia, non tutte le fibrille irradiate sono colorate (figura 5) a causa delle fluttuazioni spaziali di intensità degli impulsi laser mostrate nella figura 15.
4. Abbiamo osservato una fibrilla colorata nella sola parete primaria cellulare [32, 33] paragonabile con la sottile penetrazione del colore osservata nelle fibrille di immagine della Sindone di Torino [10, 19].
5. La tonalità del colore dipende da due parametri: la lunghezza d’onda λ della radiazione e il numero degli impulsi incidenti sul lino (proporzionali all’intensità totale). Irraggiamenti a $\lambda = 0,308 \mu\text{m}$ generano una colorazione marroncina, mentre a $\lambda = 0,193 \mu\text{m}$ i fotoni inducono una colorazione gialla, vedi figura 4, simile al colore della

immagine sindonica. In entrambi i casi il contrasto della colorazione aumenta con il numero degli impulsi laser, permettendo un accurato controllo del valore RGB variando l'intensità totale.

6. La diversa colorazione del lino ottenuta dai laser UV e VUV è dovuta a differenti catene di reazioni fotochimiche. La radiazione VUV a $\lambda = 0,193 \mu\text{m}$, grazie al picco di assorbimento dei carbonili chetonici, induce una degradazione fotolitica della cellulosa del lino che promuove la formazione di cromofore aventi un doppio legame C=C che determina la colorazione gialla delle fibrille [10, 12, 41, 42].

Conseguenze indirette

- I. Dopo irraggiamenti laser che non producono una colorazione visibile, appare una colorazione latente per invecchiamento artificiale del lino (figura 8), oppure un anno più tardi per invecchiamento naturale [29, 31, 32, 43]. La colorazione latente è importante sia per il doppio meccanismo sinergico di colorazione, sia per gli storici, attratti dalla possibilità che l'immagine sulla Sindone possa essersi resa visibile a distanza di tempo (anni) dal momento in cui si è formata.
- II. La mancanza di fluorescenza indotta da luce UV osservata nelle zone irraggiate dal laser eccimero (figura 9) è un'ulteriore caratteristica della nostra colorazione analoga all'immagine sindonica. La fluorescenza indotta è anche in grado di riconoscere selettivamente l'uniformità della colorazione, vedi figure 9a e 9b.
- III. La luce UV e VUV che colora il lino è compatibile con l'assenza di colorazione sotto le macchie di sangue della Sindone (l'emoglobina anche in spessori sottili di sangue assorbe completamente la luce UV e VUV) e secondo alcuni studiosi [46] la luce UV potrebbe essere responsabile di un'altra caratteristica molto particolare della Sindone, il colore rosso delle macchie di sangue a distanza di così tanto tempo dalla loro deposizione.
- IV. Usando un microscopio petrografico, abbiamo osservato alcuni difetti indotti dalla radiazione UV nella struttura cristallina delle fibrille di lino irraggiate con laser, vedi figura 12, analogamente a quanto osservato in tessuti molto antichi, incluse le fibrille di immagine della Sindone [11, 37].
- V. Assumendo per un attimo che l'ipotesi di Jackson [15] sul corpo emettente luce sia corretta, la luce VUV che colora il lino è compatibile con l'assenza di immagini laterali del corpo sulla Sindone, perché i fotoni VUV vengono assorbiti dall'aria, sicché maggiore è la distanza in aria che deve percorrere la luce VUV, minore sarà la percentuale di luce che arriva sul lino e minore la probabilità che questa luce residua abbia una intensità sufficiente a colorare il lino (ricordiamo che la colorazione è un effetto a soglia di intensità, vedi punto 3 delle conseguenze dirette). Essendo i fianchi del corpo maggiormente distanti dal telo rispetto alla zona frontale e dorsale, è ovvio che la presunta luce emessa dai fianchi ha una bassa probabilità di colorare il lino.

Ut breviter dicam, i nostri risultati dimostrano che un brevissimo e intenso lampo di radiazione VUV direzionale può colorare un tessuto di lino in modo da riprodurre molte delle peculiari caratteristiche della immagine corporea della Sindone di Torino, incluse la tonalità del colore, la colorazione superficiale delle fibrille più esterne della trama del lino, e l'assenza di fluorescenza. Tuttavia, va sottolineato che la potenza totale della radiazione VUV richiesta per colorare istantaneamente la superficie di un lino corrispondente ad un corpo umano di statura media, pari a

$$I_T \times \text{superficie corporea} = 2000 \text{ MW/cm}^2 \times 17000 \text{ cm}^2 = 34 \text{miliardi di Watt}$$

rende oggi impraticabile la riproduzione dell'intera immagine sindonica usando un singolo laser eccimero, poiché questa potenza non può essere prodotta da nessuna sorgente di luce VUV costruita fino ad oggi (le più potenti reperibili sul mercato arrivano ad alcuni miliardi di Watt). Piuttosto, il lavoro riassunto in questo Rapporto Tecnico ha dimostrato che la radiazione laser è uno strumento adatto a studiare in dettaglio i processi fisici e chimici che potrebbero essere alla base della produzione della immagine corporea della Sindone, indipendentemente dalla sorgente di radiazione (o energia) che può aver generato questa immagine.

L'immagine sindonica presenta alcune caratteristiche che non siamo ancora riusciti a riprodurre, per esempio la sfumatura dell'immagine dovuta ad una diversa concentrazione di fibrille colorate gialle alternate a fibrille non colorate. Esistono sofisticate ottiche diffrattive che permetterebbero di replicare anche queste caratteristiche, ma questo va ben oltre le nostre intenzioni: il nostro scopo infatti non è dimostrare che una batteria di diecimila laser eccimeri possono riprodurre esattamente l'immagine corporea della Sindone. Il nostro scopo principale è effettuare esperimenti accurati, controllati e riproducibili, adatti a comprendere il dettaglio dei meccanismi fisici e chimici che hanno prodotto l'immagine sindonica, grazie ad un potente e versatile strumento quale il laser eccimero. In questo

senso, i nostri dati sperimentali possono essere di aiuto agli studiosi che cercano di colorare il lino con esperimenti che coinvolgono la luce VUV ma che sono difficili da controllare, riprodurre e caratterizzare, quali le scariche corona [18] o scariche elettrostatiche e radon emesso durante eventi sismici [47].

Non siamo alla conclusione, stiamo componendo i tasselli di un puzzle scientifico affascinante e complesso. L'enigma dell'origine dell'immagine della Sindone di Torino rimane ancora *“una provocazione all'intelligenza”* [48].

RINGRAZIAMENTI

Gli Autori ringraziano il Prof. Giulio Fanti (Università di Padova) per il supporto fornito per le microfotografie di fili e fibrille, per le foto della figura 13 e per una lettura critica del manoscritto.

BIBLIOGRAFIA E NOTE

1. E. Marinelli, M. Marinelli: *Alla scoperta della Sindone* (Edizioni Messaggero Padova, 2010).
2. G. Fanti, J.A. Botella, F. Crosilla, F. Lattarulo, N. Svensson, R. Schneider, A. Wanger: “*List of evidences of the Turin Shroud*” Atti dell’ International Workshop on the Scientific approach to the Acheiropoietos Images, IWSAI 2010, edito da P. Di Lazzaro (ENEA, 2010) pp. 67-75. ISBN 978-88-8286-232-9 Disponibile in rete su www.acheiropoietos.info/proceedings/proceedings.php
3. B.J. Culliton: “*The mystery of the Shroud challenges 20th-century science*” *Science* **201**, 235-239 (1978).
4. J. Allday: “*The Turin Shroud*” *Phys. Educ.* **40**, 67-73 (2005).
5. R. Gilbert, M. Gilbert: “*Ultraviolet visible reflectance and fluorescence spectra of the Shroud of Turin*” *Appl. Opt.* **19**, 1930-1936 (1980).
6. E.J. Jumper, W. Mottern: “*Scientific Investigation of the Shroud of Turin*” *Appl. Opt.* **19**, 1909-1912 (1980).
7. S.F. Pellicori: “*Spectral properties of the Shroud of Turin*” *Appl. Opt.* **19**, 1913-1920 (1980).
8. J.S. Accetta, J.S. Baumgart: “*Infrared reflectance spectroscopy and thermographic investigations of the Shroud of Turin*” *Appl. Opt.* **19**, 1921-1929 (1980).
9. R.A. Morris, L.A. Schwalbe, J.R. London: “*X-ray fluorescence investigation on the Shroud of Turin*” *X-Ray Spectrometry* **9**, 40-47 (1980).
10. J.H. Heller, A.D. Adler: “*A chemical investigation of the Shroud of Turin*” *Can. Soc. Forens. Sci. J.* **14**, 81-103 (1981).
11. L.A. Schwalbe, R.N. Rogers: “*Physics and chemistry of the Shroud of Turin, a summary of the 1978 investigation*” *Analytica Chimica Acta* **135**, 3-49 (1982).
12. E.J. Jumper, A.D. Adler, J.P. Jackson, S.F. Pellicori, J.H. Heller, and J.R. Druzik, “*A comprehensive examination of the various stains and images on the Shroud of Turin*”, *Archaeological Chemistry III: ACS Advances in Chemistry* **205**, edito da J.B. Lambert (American Chemical Society, Washington, 1984), pp. 447-476.
13. W.C. Mc Crone: “*The Shroud image*” *The Microscope* **48**, 79-85 (2000).
14. J.P. Jackson, E.J. Jumper, W.R. Ercoline: “*Correlation of image intensity on the Turin Shroud with the 3-D structure of a human body shape*” *Appl. Opt.* **23**, 2244-2270 (1984).
15. J.P. Jackson: “*Is the image on the Shroud due to a process heretofore unknown to modern science?*” *Shroud Spectrum International* **34**, 3-29 (1990).
16. G. Fanti, M. Moroni: “*Comparison of luminance between face of Turin Shroud Man and experimental results*” *J. Imaging Sci. Technol.* **46**, 142-154 (2002).
17. G. Fanti, R. Maggiolo: “*The double superficiality of the frontal image of the Turin Shroud*” *J. Opt. A* **6**, 491-503 (2004).
18. G. Fanti, “*Can corona discharge explain the body image of the Turin Shroud?*” *J. Imaging Sci. Technol.* **54** 020508–020508-11 (2010).
19. G. Fanti, J. Botella, P. Di Lazzaro, R. Schneider, N. Svensson: “*Microscopic and macroscopic characteristics of the Shroud of Turin image superficiality*” *J. Imaging Sci. Technol.* **54**, 040201-040201(8) (2010).
20. L. Garlaschelli: “*Life-size Reproduction of the Shroud of Turin and its Image*” *J. Imaging Sci. Technol.* **54**, 040301-040301(14) (2010). Vedi anche la revisione critica dei risultati di questo lavoro su: T. Heimburger, G. Fanti: “*A scientific comparison between the Turin Shroud and the first handmade whole copy*” Atti dell’International Workshop on the Scientific approach to the Acheiropoietos Images, IWSAI 2010, edito da P. Di Lazzaro (ENEA, 2010) pp. 19-28. ISBN 978-88-8286-232-9 Disponibile in rete su www.acheiropoietos.info/proceedings/proceedings.php
21. F. Ferrero, F. Testore, C. Tonin, R. Innocenti: “*Surface degradation of linen textiles induced by laser treatment*” *AUTEX Research Journal* **2**, 109-114 (2002).

22. P.E. Damon, D.J. Donahue, B.H. Gore, A.L. Hatheway, A.J. T. Jull, T.W. Linick, P.J. Sercel, L.J. Toolin, C.R. Bronk, E. T. Hall, R.E.M. Hedges, R. Housley, I.A. Law, C. Perry, G. Bonani, S. Trumbore, W. Woelfli, J.C. Ambers, S. G. E. Bowman, M. N. Leese, M.S. Tite: “Radiocarbon dating of the Shroud of Turin” *Nature* **337**, 611-615 (1989).
23. R. Van Haelst: “A critical review of the radiocarbon dating of the Shroud of Turin” Atti dell’International Workshop on the Scientific approach to the Acheiropietos Images, IWSAI 2010, edito da P. Di Lazzaro, (ENEA 2010) pp. 267-273. ISBN 978-88-8286-232-9
Disponibile in rete alla pagina www.acheiropietos.info/proceedings/proceedings.php
24. R.N. Rogers: “Studies on the radiocarbon sample from the Shroud of Turin” *Thermochimica Acta* **425**, 189-194 (2005).
25. D. Scavone: “Documenting the Shroud’s missing years”, Atti dell’International Workshop on the Scientific approach to the Acheiropietos Images, IWSAI 2010, edito da P. Di Lazzaro, (ENEA 2010) pp. 87-94. ISBN 978-88-8286-232-9 Disponibile in rete su www.acheiropietos.info/proceedings/proceedings.php
26. A. Piana: “Missing years of the Holy Shroud” Atti dell’International Workshop on the Scientific approach to the Acheiropietos Images, IWSAI 2010, edito da P. Di Lazzaro, (ENEA 2010) pp. 95-102. ISBN 978-88-8286-232-9 Disponibile in rete su www.acheiropietos.info/proceedings/proceedings.php
27. A. Nicolotti: “I Templari e la Sindone. Storia di un falso” (Salerno ed., Roma 2011) capitoli 1, 3 e 4.
28. G. Baldacchini, P. Di Lazzaro, D. Murra, G. Fanti: “Colorazione di tessuti di lino con laser ad eccimeri e confronto con l’immagine sindonica” Rapporto Tecnico ENEA RT/2006/70/FIM (2006).
29. G. Baldacchini, P. Di Lazzaro, D. Murra, G. Fanti: “Coloring linens with excimer lasers to simulate the body image of the Turin Shroud” *Appl. Opt.* **47**, 1278-1285 (2008).
30. P. Di Lazzaro, G. Baldacchini, G. Fanti, D. Murra, A. Santoni: “Colouring fabrics with excimer lasers to simulate encoded images: the case of the Shroud of Turin” Atti SPIE vol. 7131 (2009) pp. 71311R-1–71311R-6.
31. P. Di Lazzaro, G. Baldacchini, G. Fanti, D. Murra, E. Nichelatti, A. Santoni: “A physical hypothesis on the origin of the body image embedded into the Turin Shroud” Atti dell’International Conference on The Shroud of Turin: Perspectives on a Multifaceted Enigma, edito da G. Fanti (Edizioni Libreria Progetto Padova 2009) pp. 116-125. ISBN 978-88-96477-03-08 01-12. www.ohioshroudconference.com/papers/p01.pdf
32. P. Di Lazzaro, D. Murra, A. Santoni, G. Fanti, E. Nichelatti, G. Baldacchini: “Deep Ultraviolet radiation simulates the Turin Shroud image” *J. of Imaging Sci. Technol.* **54**, 040302-040302(06) (2010).
33. P. Di Lazzaro, D. Murra, A. Santoni, G. Baldacchini: “Sub-micrometer coloration depth of linens by vacuum ultraviolet radiation”, Atti dell’International Workshop on the Scientific approach to the Acheiropietos Images, IWSAI 2010, edito da P. Di Lazzaro (ENEA, 2010) pp. 3-10. ISBN 978-88-8286-232-9 Disponibile in rete su www.acheiropietos.info/proceedings/proceedings.php
34. <http://it.wikipedia.org/wiki/RGB>
35. E. Nichelatti: “Caratterizzazione spettrofotometrica di due tessuti di lino” Rapporto tecnico interno, non pubblicato (Aprile 2008).
36. <http://it.wikipedia.org/wiki/Birifrangenza>
37. R.N. Rogers: “The Shroud of Turin: radiation effects, aging and image formation” <http://www.shroud.com/pdfs/rogers8.pdf> (2005).
38. <http://www.nec-avio.co.jp/en/products/ir-thermo/pdf/catalog-f30-e.pdf>
39. S. Perez, K. Mazeau: Chapter 2 of *Polysaccharides: structural diversity and functional versatility*, S. Dumitriu Editor (M. Dekker Inc. 2004).
40. L’emicellulosa è un polisaccaride simile alla cellulosa, ma consiste di catene più corte (500-3000 molecole di glucosio) in confronto alle 7,000 - 15,000 molecole di glucosio per polimero osservate nella cellulosa.
41. G. Novelli: “La Sindone e la scienza chimica” Proc. of the Worldwide Congress *Sindone 2000* edito da A. Russi e E. Marinelli. (Gerni Editori, 2002) pp. 175-181.

42. A. Bos: “*The UV spectra of cellulose and some model compounds*” J. Appl. Polymer Science **16**, 2567-2576 (1972).
43. M. Yatagai, S.H. Zeronian: “*Effect of ultraviolet light and heat on the properties of cotton cellulose*” Cellulose **1**, 205-214 (1994).
44. S.F. Pellicori and M.S. Evans: “*The Shroud of Turin through the microscope*” Archaeology **34**, 34-43 (1981).
45. R. Rogers: “*Testing the Jackson "theory" of image formation*” <http://www.shroud.com/pdfs/rogers6.pdf> (2004).
46. C. Goldoni: “*The Shroud of Turin and the bilirubin blood stains*” Atti dell’International Conference on The Shroud of Turin: Perspectives on a Multifaceted Enigma, edito da G. Fanti (Edizioni Libreria Progetto Padova 2009) pp. 442-445. <http://www.ohioshroudconference.com/papers/p04.pdf>
47. G. De Liso: “*Shroud-like experimental image formation during seismic activity*”, Atti dell’International Workshop on the Scientific approach to the Acheiropoietos Images, IWSAI 2010, edito da P. Di Lazzaro, (ENEA 2010) pp. 11-18. ISBN 978-88-8286-232-9 Disponibile in rete su www.acheiropoietos.info/proceedings/proceedings.php
48. “La Sindone è provocazione all'intelligenza. Essa richiede innanzitutto l'impegno di ogni uomo, in particolare del ricercatore, per cogliere con umiltà il messaggio profondo inviato alla sua ragione ed alla sua vita. Il fascino misterioso esercitato dalla Sindone spinge a formulare domande sul rapporto tra il sacro lino e la vicenda storica di Gesù. Non trattandosi di una materia di fede, la Chiesa non ha competenza specifica per pronunciarsi su tali questioni. Essa affida agli scienziati il compito di continuare ad indagare per giungere a trovare risposte adeguate agli interrogativi connessi con questo lenzuolo che, secondo la tradizione, avrebbe avvolto il corpo del nostro Redentore quando fu deposto dalla croce. La Chiesa esorta ad affrontare lo studio della Sindone senza posizioni precostituite, che diano per scontati risultati che tali non sono; li invita ad agire con libertà interiore e premuroso rispetto sia della metodologia scientifica sia della sensibilità dei credenti”. Tratto dalla omelia di Giovanni Paolo II a Torino il 24 Maggio 1998.

Edito dall' **ENEA**
Unità Comunicazione

Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma

www.enea.it

Stampa: Tecnografico ENEA - CR Frascati
Pervenuto il 8.11.2011

Finito di stampare nel mese di novembre 2011