

# UN APPROCCIO SCIENTIFICO ALLA FORMAZIONE DELL'IMMAGINE DELLA SINDONE DI TORINO

## (Seconda parte)

Paolo Di Lazzaro

Fisico, Dirigente di Ricerca presso il Centro Ricerche ENEA di Frascati

<http://www.ucronline.it/2011/10/30/un-approccio-scientifico-alla-formazione-dell%E2%80%99immagine-della-sindone-ii%C2%B0-parte/>

30 Ottobre 2011

**Riassunto della prima parte** Nella prima parte di questo contributo (20 Ottobre 2011) abbiamo discusso le caratteristiche dell'immagine corporea sulla Sindone di Torino. Queste caratteristiche sono talmente peculiari da rendere molto difficile la riproduzione di un'altra immagine avente le stesse proprietà. Di fatto, sinora tutti i tentativi di replica dell'immagine sinora effettuati con le più moderne tecnologie sono falliti, e ad oggi la Scienza non è ancora in grado di spiegare come si sia formata l'immagine sulla Sindone. In particolare, i metodi chimici a contatto si sono rivelati inadatti a ottenere alcune delle più singolari caratteristiche dell'immagine sindonica, in particolare lo spessore di colorazione estremamente sottile, pari ad un quinto di millesimo di millimetro. Viceversa, in linea di principio un processo fotochimico generato da un impulso di luce con le opportune caratteristiche di spettro, durata e intensità potrebbe generare una colorazione molto simile a quella dell'immagine sindonica, incluso lo spessore di colorazione e l'immagine nelle zone del lino non a contatto con il corpo.

In questa seconda parte presentiamo i principali risultati sperimentali di irraggiamento di tessuti di lino tramite impulsi laser eccimeri atti a verificare se e in che misura la radiazione nell'ultravioletto e nel lontano ultravioletto è adatta ad ottenere una colorazione simile a quella dell'immagine della Sindone di Torino.

### RISULTATI SPERIMENTALI OTTENUTI IRRAGGIANDO TESSUTI DI LINO CON LUCE LASER UV e VUV

Tutti i sistemi laser sono costituiti da un mezzo attivo, una sorgente di pompaggio e una cavità ottica (<http://it.wikipedia.org/wiki/Laser>). Nel caso dei laser eccimeri, il mezzo attivo è una miscela di gas, pompata da una potente scarica elettrica che genera la cosiddetta inversione di popolazione e quindi l'emissione di luce ultravioletta (UV) [http://it.wikipedia.org/wiki/Laser\\_a\\_eccimeri](http://it.wikipedia.org/wiki/Laser_a_eccimeri).

Nei nostri esperimenti, gli impulsi di luce emessi dal laser eccimeri vengono focalizzati da una lente fino a colpire su un tessuto di lino fissato sopra una cornice. L'intensità degli impulsi laser (cioè l'energia per unità di tempo e per unità di superficie, incidente sui tessuti) può essere variata cambiando la superficie del lino che riceve l'impulso laser, in pratica avvicinando o allontanando il tessuto dalla lente che concentra la luce laser [Baldacchini 2008].

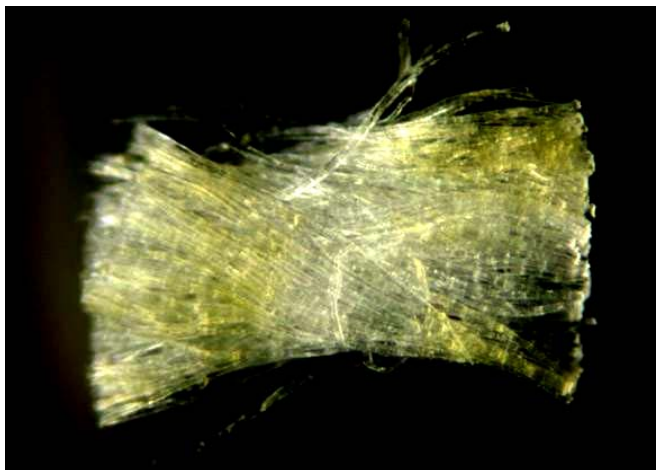
Quando abbiamo irraggiato le stoffe di lino con una sequenza di impulsi laser eccimeri XeCl (lunghezza d'onda  $\lambda = 0,308 \mu\text{m}$ , energia laser 5 Joule/impulso, durata temporale di ciascun impulso 120 miliardesimi di secondo), non siamo riusciti ad ottenere alcuna colorazione. Infatti, i tessuti irraggiati ad alta intensità risultavano carbonizzati, mentre a minore intensità non presentavano alcuna modifica apprezzabile. Questo "fallimento" o mancanza di colorazione era già stata riscontrata da precedenti tentativi di colorazione di lino tramite laser eccimeri effettuati anni prima presso i laboratori di Los Alamos [Rogers 2002, Rogers 2004].

Non ci siamo arresi, e abbiamo irraggiato i lini con la radiazione emessa da un altro laser eccimeri XeCl che emette impulsi 4 volte più brevi ed una energia per impulso 12 volte minore rispetto al precedente laser. In questa nuova configurazione siamo riusciti ad ottenere una colorazione permanente del lino. I risultati di questo esperimento sono dettagliati negli articoli [Baldacchini 2006, Baldacchini 2008]. In sintesi, abbiamo dimostrato che la durata temporale degli impulsi laser è un parametro critico: per ottenere la colorazione del lino gli impulsi devono avere una durata minore di 50 miliardesimi di secondo, e siamo riusciti a trovare la combinazione di parametri laser (intensità, numero di impulsi, frequenza di ripetizione) più adatta a colorare il lino. Tuttavia, la tonalità della colorazione (marrone scuro o chiaro, a seconda dell'intensità laser e del

numero di colpi) risultava più scura del giallo-seppia della immagine sindonica, e la profondità della colorazione nei fili di lino era maggiore dei  $0,2 \mu\text{m}$  delle fibrille di immagine della Sindone [Fanti 2010a].

Allo scopo di ottenere una colorazione più simile a quella sindonica, abbiamo usato un laser eccimeri ArF che emette una lunghezza d'onda più corta ( $\lambda = 0,193 \mu\text{m}$ ) nello spettro dell'ultravioletto da vuoto (VUV). Gli effetti della radiazione laser ArF sul lino sono proporzionali all'intensità totale  $I_T$  data dal prodotto "numero impulsi per intensità laser" e non sono correlati alla intensità di ciascun impulso.

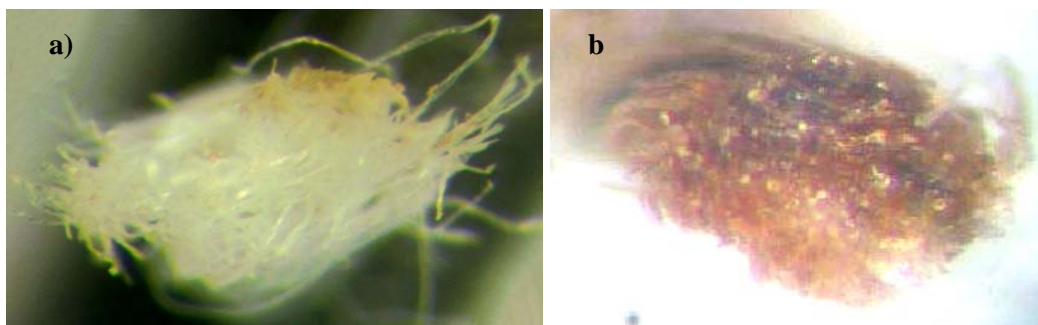
Una colorazione gialla come quella mostrata nella figura 1 è ottenuta quando la combinazione di intensità di singoli impulsi e di numero di impulsi è tale da generare un'intensità totale  $I_T \approx (2000 - 4000) \text{ MW/cm}^2$ . Ricordiamo che  $1 \text{ MW} =$  un milione di watt. Quando  $I_T > 4500 \text{ MW/cm}^2$  il lino è ablatato (cioè, una 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 dell'area irraggiata dalla radiazione laser).



**Figura 1.** Microfotografia di un filo di ordito del tessuto 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 dall'articolo [Di Lazzaro 2010a].

La tonalità della colorazione del lino irraggiato con luce VUV varia continuamente dal giallo-chiaro al giallo-seppia all'aumentare di  $I_T$ . In altre parole, è possibile aggiustare il valore di RGB (vedi <http://it.wikipedia.org/wiki/RGB>) semplicemente variando la intensità laser totale, ad esempio tramite il numero degli impulsi laser.

Per quanto riguarda lo spessore della colorazione, le microfotografie (un esempio è mostrato nella figura 2a) mostrano spessori colorati compresi tra  $7 \mu\text{m}$  e  $26 \mu\text{m}$  nei fili irraggiati con differenti intensità totali  $I_T$  [Di Lazzaro 2010b]. Si tratta di un intervallo di profondità di colorazione da 11 a 3 volte più sottile della profondità raggiunta dagli impulsi a  $\lambda = 0,308 \mu\text{m}$  [Baldacchini 2008] vedi figura 2b.



**Figura 2.** Microfotografie di sezioni di fili di lino rispettivamente colorati da irraggiamento laser VUV (a) e UV (b) con gli impulsi laser incidenti "dall'alto" rispetto alle foto. La differente profondità 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  $0,3 \text{ mm}$ . Foto tratta dall'articolo [Di Lazzaro 2010b].

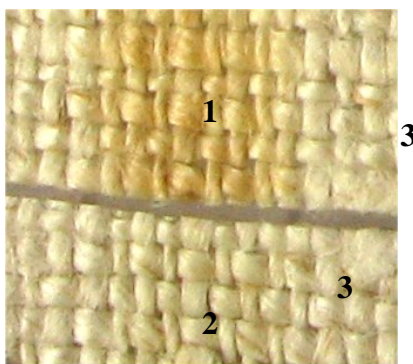
Questa evidenza sperimentale conferma che una minore lunghezza d'onda della radiazione laser produce una colorazione più superficiale. Poiché i fili del nostro tessuto di lino hanno un diametro medio di 0,3 mm, deduciamo che la luce laser a  $\lambda = 0,193 \mu\text{m}$  penetra dal 2% al 9% del diametro 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 foto negli articoli Di Lazzaro 2010a, Di Lazzaro 2010b), e in questo caso la colorazione interessa solo la pellicola più esterna della stessa fibrilla, la parete primaria cellulare, che ha uno spessore di circa  $0,2 \mu\text{m}$ . Questo risultato si avvicina alla profondità di colorazione della immagine sindonica misurata nell'articolo [Fanti 2010a].

### **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. In altre parole, è possibile ottenere una colorazione latente, che si manifesta uno o più anni dopo l'irraggiamento.

Abbiamo tagliato a metà una porzione di lino già irraggiata con  $I_T = 1400 \text{ MW/cm}^2$ , cioè sotto la soglia di colorazione, (il lino irraggiato non appare colorato). Abbiamo quindi scaldato una delle due parti con un ferro da stiro alla temperatura di  $190 \text{ }^\circ\text{C}$  per 10 secondi, e una colorazione appare subito dopo il riscaldamento nella sola area irraggiata dal laser. La figura 3 mostra che il processo di riscaldamento (che simula invecchiamento) colora solamente l'area irraggiata sotto soglia e non colora le zone non irraggiate.



**Figura 3.** Tessuto di lino dopo irraggiamento laser 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 dall'articolo [Di Lazzaro 2010b].

Abbiamo ottenuto risultati analoghi a quello della figura 3 anche utilizzando luce UV, verificando che la colorazione latente appare dopo un invecchiamento naturale di oltre un anno, mantenendo il lino irraggiato sotto soglia (non colorato) in un cassetto al buio [Baldacchini 2008].

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). D'altra parte c'è l'interesse degli storici, attratti dalla possibilità che l'immagine sulla Sindone possa essersi manifestata e resa visibile a distanza di tempo (anni) dal momento in cui si è formata la stessa immagine.

### **FLUORESCENZA ULTRAVIOLETTA**

I tessuti di lino, come tutti i materiali organici, emettono luce visibile di fluorescenza quando sono illuminati da luce UV. Tuttavia, le fibrille di immagine della Sindone non emettono luce fluorescente [Gilbert, Pellicori 1981, Jumper]. Si tratta di una delle peculiari caratteristiche dell'immagine sindonica.

Abbiamo illuminato il tessuto di lino irraggiato dal laser eccimeri con la luce UV di una lampada. Tutto il tessuto di lino fluoresce, ad eccezione della zona irraggiata e colorata dal laser [Di Lazzaro 2010a, Di Lazzaro 2010b] in modo analogo a quanto avviene per le fibrille colorate della Sindone. Questo risultato suggerisce che la radiazione laser VUV ha modificato la struttura delle fibrille di lino irraggiate in modo da inibire le transizioni elettroniche che determinano la fluorescenza del tessuto.

Analogamente a quanto osservato nel processo di colorazione, la mancanza di fluorescenza delle fibrille irraggiate avviene solamente in un ristretto intervallo dei parametri di irraggiamento. Ad esempio, un irraggiamento laser troppo intenso inibisce la fluorescenza solamente in un anello, laddove l'intensità degli impulsi laser, che hanno un profilo spaziale 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 [Di Lazzaro 2010a].

## ULTERIORI ESPERIMENTI

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

### Il nostro lino è diverso dal lino della Sindone?

In un esperimento di colorazione simil-sindonica è logico domandarsi: quanto è diverso il tessuto di lino che si utilizza rispetto al lino della Sindone, a parte ovviamente l'età?

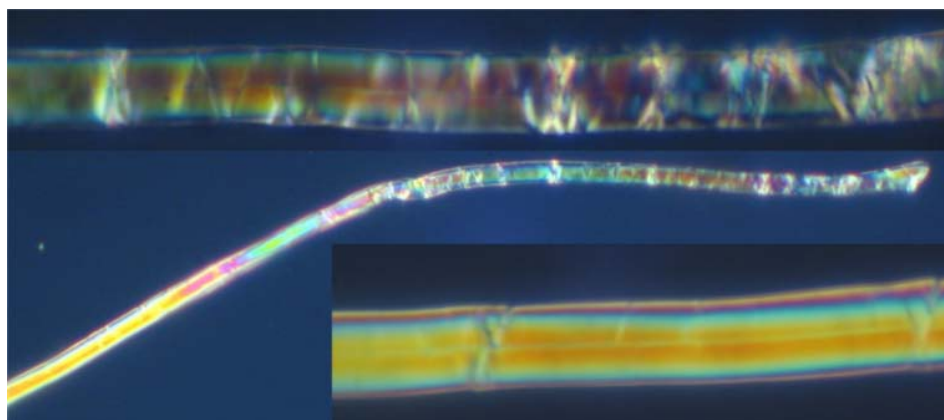
I nostri esperimenti sono essenzialmente di tipo ottico, quindi abbiamo effettuato misure atte a fornire le principali caratteristiche ottiche del nostro lino per confrontarle con quelle del lino della Sindone. A tale scopo, abbiamo misurato la riflettanza spettrale assoluta del nostro lino tramite uno strumento di elevata tecnologia, uno spettrofotometro Perkin-Elmer Lambda 950<sup>TM</sup>. I risultati della misura della riflettanza assoluta in funzione della lunghezza d'onda (cioè la percentuale di luce riflessa dal nostro lino rispetto a quella incidente) hanno dato dei risultati in perfetto accordo con quelli delle analoghe misure effettuate sul lino della Sindone [Gilbert]. Quindi, dal punto di vista ottico, il nostro lino si comporta esattamente come il lino della Sindone [Di Lazzaro 2010a, Di Lazzaro 2010b].

Ma c'è una conseguenza forse ancora più importante. 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 la dice lunga sul valore assoluto degli scienziati STURP e sulla estrema cura con la quale furono effettuate le misure *in situ* sulla Sindone.

### 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 [Heller]. Per verificare se l'irraggiamento laser comporta un analogo invecchiamento abbiamo osservato alcune fibrille di lino poste tra due polarizzatori incrociati in un microscopio petrografico, [http://it.wikipedia.org/wiki/Microscopio\\_polarizzatore](http://it.wikipedia.org/wiki/Microscopio_polarizzatore). Quando le fibrille sono allineate all'asse di polarizzazione dell'analizzatore, appare un'area scura: infatti, in questo caso le fibrille sono poste "ad estinzione", e la birifrangenza non è visibile. Se una parte della fibrilla allineata ad estinzione viene danneggiata, questa diviene birifrangente e appare luminosa.

La figura 4 dimostra che nel nostro esperimento solo nella parte della fibrilla irraggiata ci sono diverse zone luminose, sintomo di fragilità e difetti indotti dalla radiazione laser, in analogia a quanto osservato sulle fibrille di lino molto antiche, in particolare sulle fibrille della Sindone [Schwalbe, Rogers 2005].



**Figura 4.** Osservazioni al microscopio petrografico di una fibrilla di lino. Al centro c'è una fibrilla parzialmente colorata, osservata 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 dall'articolo [Baldacchini 2008].

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

Allo scopo di verificare se la luce UV e VUV interagisce in modo fotochimico con il lino, senza indurre un significativo riscaldamento del tessuto irraggiato, abbiamo utilizzato una fotocamera sensibile all'infrarosso, fornita dal Prof. G. Fanti, che permette di misurare la temperatura di un oggetto con un errore  $\pm 0,2$  °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. Durante queste misure la temperatura ambiente era tra 20 e 21 °C. I risultati mostrano che la zona irraggiata con impulsi laser UV si scalda fino a 33 °C, mentre quella irraggiata con impulsi laser VUV si scalda appena a 25 °C. Possiamo quindi concludere che l'effetto di colorazione in entrambi i casi è dovuto ad un processo fotochimico che non coinvolge effetti termici significativi [Di Lazzaro 2011].

### **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 (figure 1 e 2). Inoltre abbiamo dimostrato che la radiazione laser UV e VUV produce una fragilità e uno stress alle fibrille di lino equivalenti ad un invecchiamento accelerato del tessuto (figura 4). Abbiamo anche ottenuto una colorazione latente (figura 3), 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). Infine, abbiamo dimostrato che la colorazione non è dovuta ad un effetto termico, in analogia con le caratteristiche dell'immagine sindonica [Schwalbe, Jumper, Fanti 2010b, Rogers 2002].

Ovviamente, nessuno può ipotizzare che l'immagine corporea della Sindone sia stata prodotta da una serie di lampi di luce nel VUV emessi da un laser. Piuttosto, i nostri risultati mostrano come il laser eccimero è un potente strumento di indagine per simulare i processi chimici e fisici che potrebbero aver causato la peculiare colorazione dell'immagine sindonica. Allo scopo di comprendere meglio questi processi, è necessario ora entrare nel dettaglio dell'interazione della luce UV e VUV con il lino.

#### Processi chimici.

Un filo di lino è formato da circa 200 fibre elementari aventi una struttura cilindrica con lunghezza media di 30 millimetri e diametro medio di 20 micrometri, chiamate fibrille. Le fibrille sono costituite da una parte interna (medulla) di pura cellulosa, e da una sottile (0,2  $\mu\text{m}$ ) pellicola esterna composta da emicellulosa, cellulosa e altri componenti minori, chiamata "parete primaria cellulare" [Perez]. Ricordiamo che l'emicellulosa è un polisaccaride simile alla cellulosa, ma consiste di catene più corte (da 500 a 3000 unità di glucosio) in confronto alle 7.000 – 15.000 molecole di glucosio per polimero osservate nella cellulosa.

Le differenti profondità di colorazione ottenute con luce UV e VUV (vedi figura 2) possono essere dovute alla differente lunghezza d'onda  $\lambda$ . Tuttavia, nell'articolo [Di Lazzaro 2010b] abbiamo mostrato sperimentalmente che c'è solo una differenza dell'11% nell'assorbimento del lino tra  $\lambda = 0,193$   $\mu\text{m}$  e  $\lambda = 0,308$   $\mu\text{m}$ . Allora è necessario individuare un meccanismo addizionale per spiegare i differenti spessori di penetrazione e colorazione, cioè giallo o giallo-seppia dopo irraggiamento VUV a 0,193  $\mu\text{m}$  e marrone-chiaro dopo irraggiamento UV a 0,308  $\mu\text{m}$ .

Questo meccanismo addizionale potrebbe essere causato dal picco di assorbimento spettrale al di sotto di 0,26  $\mu\text{m}$  dei gruppi carbonili chetonici ( $-\text{C}=\text{O}$ ) che promuovono l'ingiallimento della emicellulosa nella parete primaria cellulare [Bos, Perez]. In altre parole, la luce a  $\lambda = 0,193$   $\mu\text{m}$  è assorbita dai carbonili chetonici e conduce alla degradazione fotolitica dell'emicellulosa, causando la dissociazione dei legami molecolari che promuove le reazioni chimiche necessarie alla formazione del cromoforo. A livello macroscopico, tali reazioni producono la colorazione gialla simil-sindonica (figura 1).

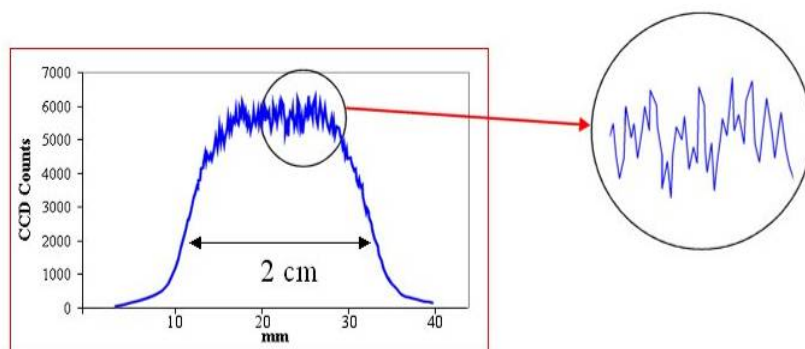
Si noti che la radiazione a 0,308  $\mu\text{m}$  non rientra nella banda di assorbimento dei carbonili chetonici, mentre può essere assorbita dai gruppi aldeidi ( $-\text{CHO}$ ) [Bos]. Quindi, la radiazione a 0,308  $\mu\text{m}$  non è in grado di iniziare il processo a molti passi sopra descritto che conduce all'ingiallimento della cellulosa ed emicellulosa. Infatti, sperimentalmente la radiazione UV produce una colorazione marroncina del lino e una maggiore fragilità evidenziata dalla birifrangenza (figura 4).



In questo contesto, la formazione delle immagini latenti può essere spiegata dalla ossidazione della cellulosa (causata dal calore) che produce strutture coniugate insature che vanno a rinforzare l'effetto disidratante della radiazione UV e VUV. Infatti il processo di colorazione iniziato dalla esposizione alla radiazione UV e VUV è accelerato e rinforzato dal calore, come descritto nell'articolo [Yatagai].

#### Processi fisici.

Cerchiamo ora di comprendere perché è difficile ottenere la colorazione della sola parete primaria cellulare della fibrilla di lino. Il profilo di intensità del fascio del laser eccimeri non è uniforme, e mostra fluttuazioni spaziali di frequenza elevata, che possono essere misurate da una camera CCD ad alta risoluzione spaziale, come illustrato nella figura 5.



**Figura 5.** Profilo unidimensionale dell'intensità di un fascio laser misurato da una camera CCD, con una risoluzione di singolo pixel pari a  $22 \mu\text{m} = 0.022 \text{ mm}$ . L'insetto mostra un ingrandimento delle fluttuazioni spaziali di alta frequenza. Figura tratta dall'articolo [Di Lazzaro 2010a].

Le fluttuazioni di intensità in figura 5 hanno un periodo irregolare, con gradienti di intensità (derivata spaziale dell'intensità) fino a  $350 \text{ MW/cm}^2$  per centimetro. In altre parole, il valore di intensità laser incidente su due punti del lino distanti un solo millimetro può variare fino a  $35 \text{ MW/cm}^2$ . 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 discutere le principali differenze tra la nostra colorazione del lino tramite luce laser e l'immagine sindonica. Le microfotografie della Sindone mostrano che il passaggio da zone più colorate a zone meno colorate (la sfumatura dell'immagine) è il risultato della diversa concentrazione di fibrille colorate gialle alternate a fibrille non colorate [Pellicori, Rogers 2002, Fanti 2010a, Fanti 2010b] e NON da fibrille colorate in modo diverso. Inoltre la colorazione dell'area di immagine possiede una distribuzione discontinua lungo i fili intrecciati della Sindone, e sono presenti striature [Pellicori]. Queste caratteristiche non si riscontrano nei tessuti irraggiati con laser, che presentano fluttuazioni di colorazione su distanze più ampie delle singole fibrille.

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. 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 fibrille colorate lungo la trama dei lini. In linea di principio, dunque, un esperimento condotto con luce laser VUV associata a opportune ottiche diffrattive collegate ad un computer e a un sistema di movimentazione micrometrica consentirebbe di replicare con grande 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, ma vuole piuttosto essere un contributo alla migliore comprensione dei processi fisici e chimici che hanno portato all'immagine impressa sulla Sindone.

#### **RIASSUNTO E CONCLUSIONI**

Nella prima parte di questo contributo abbiamo riassunto 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 in grado di spiegare come si sia formata l'immagine corporea sulla Sindone. Alla luce di queste difficoltà tecnologiche, l'ipotesi di un falsario medioevale non sembra ragionevole.

Nella seconda parte abbiamo riepilogato gli esperimenti svolti presso i laboratori del Centro Ricerche ENEA di Frascati che hanno dimostrato la possibilità di colorare tessuti di lino in modo similindonico tramite la luce UV e VUV di un laser eccimeri impulsato della durata di alcuni miliardesimi di secondo.

Questa capacità della luce UV e VUV di colorare il lino in modo similindonico è un risultato assai importante, perché permette di chiarire in modo definitivo i termini di una polemica a distanza tra due dei maggiori scienziati STURP: da una parte Jackson che nel 1990 già prevedeva la possibilità di colorare il lino tramite radiazione VUV [Jackson 1990], dall'altra Rogers convinto che un irraggiamento laser avrebbe scaldato e vaporizzato il lino, senza colorarlo [Rogers 2002, Rogers 2004]. 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 associato all'irraggiamento laser sia UV sia VUV è di pochi gradi centigradi e quindi irrilevante ai fini della colorazione. 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 [Schwalbe, Jumper].
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 miliardesimi di secondo [Baldacchini 2006, Baldacchini 2008].
3. I risultati più interessanti sono stati ottenuti con luce VUV. La colorazione permanente risulta essere 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/cm<sup>2</sup> il lino non si colora affatto. Anche quando l'intensità totale è sopra la soglia, non tutte le fibrille irradiate sono colorate, a causa delle fluttuazioni spaziali di intensità degli impulsi laser mostrate nella figura 5.
4. Abbiamo osservato una fibrilla colorata nella sola parete primaria cellulare [Di Lazzaro 2010a, Di Lazzaro 2010b] paragonabile con la sottile penetrazione del colore osservata nelle fibrille di immagine della Sindone di Torino [Heller, Rogers 2002, Fanti 2010a].
5. La tonalità del colore dipende da due parametri: la lunghezza d'onda  $\lambda$  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 1, 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 [Heller, Jumper, Bos].

#### Conseguenze indirette

- I. Dopo irraggiamenti laser che non producono una colorazione visibile, appare una colorazione latente per invecchiamento artificiale del lino (figura 3), oppure un anno più tardi per invecchiamento naturale [Baldacchini 2008, Di Lazzaro 2010a, Di Lazzaro 2010b, Yatagai]. 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 eccimeri 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.
- 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 (vedi ad esempio [Goldoni]) 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 4, analogamente a quanto osservato in tessuti molto antichi, incluse le fibrille di immagine della Sindone [Schwalbe, Rogers 2005].

*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.

L'immagine sindonica: presenta alcune caratteristiche che non siamo riusciti a riprodurre, per esempio le striature e 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 eccimeri. 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 [Fanti 2010b] o scariche elettrostatiche e radon emesso durante eventi sismici [de Liso].

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”* [Giovanni Paolo II].

## **RINGRAZIAMENTI**

Doverosi e sentiti ringraziamenti vanno ai Colleghi che hanno collaborato al lavoro di ricerca riassunto in questo contributo: in ordine alfabetico, Baldacchini Giuseppe, Fanti Giulio, Murra Daniele, Nichelatti Enrico, Santoni Antonino. Senza il loro prezioso contributo professionale e la loro disponibilità a lavorare come *team* i risultati descritti non sarebbero stati ottenuti.

## **BIBLIOGRAFIA**

Baldacchini G., 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).

Baldacchini G., P. Di Lazzaro, D. Murra, G. Fanti: *“Coloring linens with excimer lasers to simulate the body image of the Turin Shroud”* Applied Optics **47**, 1278-1285 (2008).

Bos A.: *“The UV spectra of cellulose and some model compounds”* J. Applied Polymer Science **16**, 2567-2576 (1972).

De Liso G.: *“Shroud-like experimental image formation during seismic activity”*, Atti dell'International Workshop on the Scientific approach to the Acheiropietos Images, IWSAI 2010, edito da P. Di Lazzaro, (ENEA 2010) pp. 11-18. ISBN 978-88-8286-232-9 Disponibile in rete su [www.acheiropietos.info/proceedings/proceedings.php](http://www.acheiropietos.info/proceedings/proceedings.php)

Di Lazzaro P., 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 a) pp. 3-10. ISBN 978-88-8286-232-9 Disponibile in rete su [www.acheiropoietos.info/proceedings/proceedings.php](http://www.acheiropoietos.info/proceedings/proceedings.php)

Di Lazzaro P., D. Murra, A. Santoni, G. Fanti, E. Nichelatti, G. Baldacchini: “*Deep Ultraviolet radiation simulates the Turin Shroud image*” Journal of Imaging Science and Technology **54**, 040302-(6) (2010 b).

Di Lazzaro P., D. Murra, E. Nichelatti, A. Santoni, G. Baldacchini: “*Colorazione similindonica di tessuti di lino tramite radiazione nel lontano ultravioletto: riassunto dei risultati ottenuti presso il Centro ENEA di Frascati negli anni 2005-2010*” Rapporto Tecnico ENEA (2011). In stampa.

Fanti G., J. Botella, P. Di Lazzaro, R. Schneider, N. Svensson: “*Microscopic and macroscopic characteristics of the Shroud of Turin image superficiality*” Journal of Imaging Science and Technology **54**, 040201-(8) (2010 a)

Fanti G., J. 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 b) pp. 67-75. ISBN 978-88-8286-232-9 Disponibile in rete su [www.acheiropoietos.info/proceedings/proceedings.php](http://www.acheiropoietos.info/proceedings/proceedings.php)

Fanti G., “*Can corona discharge explain the body image of the Turin Shroud?*” J. Imaging Science Technology **54** 020508–020508-11 (2010b).

Gilbert R., M. Gilbert: “*Ultraviolet visible reflectance and fluorescence spectra of the Shroud of Turin*” Applied Optics **19**, 1930-1936 (1980).

Giovanni Paolo II, omelia a Torino il 24 Maggio 1998: “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”.

Goldoni C.: “*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>

Heller J., A. Adler: “*A chemical investigation of the Shroud of Turin*” Canadian. Society Forensic Science J. **14**, 81-103 (1981).

Jackson J.P.: “*Is the image on the Shroud due to a process heretofore unknown to modern science?*” Shroud Spectrum International **34**, 3-29 (1990).

Jumper E., A. Adler, J. Jackson, S. Pellicori, J. Heller, and J. 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. Lambert (American Chemical Society, Washington, 1984), pp. 447-476.

Pellicori S., M. Evans: “*The Shroud of Turin through the microscope*” Archaeology January-February issue 35-43 (1981).

Perez S., K. Mazeau: “*Conformation, structure and morphologies of cellulose*” Capitolo 2 di Polysaccharides: structural diversity and functional versatility (M. Dekker Inc. 2004).

Rogers R., Arnoldi A. “*Scientific method applied to the Shroud of Turin, a review*” <http://www.shroud.com/pdfs/rogers2.pdf> (2002)

Rogers R. “*Testing the Jackson "theory" of image formation*” <http://www.shroud.com/pdfs/rogers6.pdf> (2004)

Rogers R.: “*The Shroud of Turin: radiation effects, aging and image formation*” <http://www.shroud.com/pdfs/rogers8.pdf> (2005).

Schwalbe L., R. Rogers: “*Physics and chemistry of the Shroud of Turin, a summary of the 1978 investigation*” Analytica Chimica Acta **135**, 3-9 (1982).

Yatagai M., S. Zeronian: “*Effect of ultraviolet light and heat on the properties of cotton cellulose*” Cellulose **1**, 205-214 (1994).