

Scuola di Scienze  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Corso di Laurea in Fisica

APPLICAZIONE DELLA TOMOGRAFIA CON RAGGI X  
PER LA LETTURA VIRTUALE DI ANTICHI  
MANOSCRITTI VENEZIANI

Relatore:

Dott.ssa Maria Pia Morigi

Presentata da:

Luca Fiorini

Correlatori:

Dott.ssa Eva Peccenini

Dott. Matteo Bettuzzi

Dott.ssa Fauzia Albertin

Sessione II  
Anno Accademico 2015/2016



# Abstract

Questo lavoro di tesi si inserisce in un progetto di ricerca internazionale denominato “*Venice Time Machine*” dove collaborano fianco a fianco l’Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne e l’Università Cà Foscari di Venezia. Grazie al coinvolgimento dell’Archivio di Stato di Venezia, decine di chilometri di documenti verranno digitalizzati e indicizzati, al fine di creare un database open access da utilizzare per la ricerca e l’istruzione. Molti di questi documenti tuttavia sono particolarmente fragili oppure, come nel caso di diversi testamenti, non sono mai stati aperti, per cui le tecniche tradizionali di digitalizzazione non sono applicabili. Di qui deriva l’interesse per sperimentare nuove tecniche non invasive al fine di digitalizzare e quindi rendere fruibili al pubblico anche questi documenti altrimenti inaccessibili.

Lo scopo dell’analisi tomografica è quello di creare un modello 3D del documento, su cui effettuare successive elaborazioni al fine di ottenere una separazione virtuale delle pagine e quindi permetterne la lettura anche se il manoscritto è chiuso e non può essere aperto.

In particolare in questo lavoro di tesi sono stati analizzati due testamenti: un testamento del 1679, usato come campione di prova per verificare la migliore sorgente di raggi X ai fini della ricostruzione tomografica e anche per valutare l’efficacia della tecnica, e il testamento Alchier-Spiera (dai nomi dei testatori), datato 1634, di maggiore interesse poiché ancora chiuso.

I risultati ottenuti sono molto soddisfacenti, poiché elaborando le ricostruzioni tomografiche è possibile la lettura virtuale sia di parole che di intere frasi. Questo risultato porta nuova linfa al progetto che, di base, si pone l’obiettivo di convertire in formato digitale decine di km di testi conservati in Archivio, ma che ha trovato, in questo tipo di testamenti chiusi, un ostacolo molto difficile da superare.

# Indice

<b>Introduzione .....</b>	<b>5</b>
<b>Capitolo 1 - I raggi X .....</b>	<b>6</b>
1.1 <i>La natura dei raggi X.....</i>	6
1.2 <i>Il tubo a raggi X.....</i>	7
1.3 <i>Lo spettro di un tubo a raggi X.....</i>	9
1.4 <i>L'interazione con la materia.....</i>	10
<b>Capitolo 2 - La tecnica tomografica .....</b>	<b>15</b>
2.1 <i>I principi della tecnica radiografica .....</i>	15
2.2 <i>La tomografica assiale computerizzata.....</i>	16
2.3 <i>I componenti di un sistema tomografico .....</i>	16
2.4 <i>Il metodo di ricostruzione tomografico.....</i>	20
<b>Capitolo 3 - Il progetto VTM .....</b>	<b>25</b>
3.1 <i>Le origini e lo scopo del progetto .....</i>	25
3.2 <i>I Testamenti Veneziani .....</i>	26
3.3 <i>I componenti del sistema tomografico.....</i>	28
3.3.1 <i>La sorgente di raggi X.....</i>	30
3.3.2 <i>Il rivelatore.....</i>	31
3.3.3 <i>Il sistema di movimentazione.....</i>	32
3.3.4 <i>I parametri di acquisizione.....</i>	33
3.3.5 <i>I software di elaborazione e rendering 3D .....</i>	35
<b>Capitolo 4 - L'analisi dei dati .....</b>	<b>39</b>
4.1 <i>Il Testamento campione.....</i>	39
4.4.1 <i>Le sorgenti di raggi X a confronto.....</i>	39
4.4.2 <i>Ulteriori risultati dell'elaborazione.....</i>	41
4.2 <i>Il Testamento Alchier-Spiera.....</i>	42
<b>Conclusioni .....</b>	<b>47</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>48</b>

# Introduzione

Il presente lavoro di tesi si inserisce nell'ambito di un progetto internazionale chiamato *Venice Time Machine*, il cui scopo è quello di trasformare in formato digitale, ad accesso libero, tutti o quasi i documenti presenti nell' "Archivio di Stato" di Venezia. Alcuni di questi documenti tuttavia sono particolarmente fragili oppure, come nel caso di diversi testamenti, non sono mai stati aperti, per cui le tecniche tradizionali di digitalizzazione non sono applicabili. Uno degli obiettivi del progetto è quindi quello di sperimentare nuove tecniche non invasive, quali la tomografia computerizzata con raggi X, al fine di digitalizzare e quindi rendere fruibili al pubblico anche questi documenti altrimenti inaccessibili.

Nei laboratori di ricerca del gruppo "X-ray imaging", presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, si sono effettuate analisi tomografiche su alcuni dei testamenti provenienti dal suddetto Archivio, grazie alle quali, dopo un'attenta rielaborazione, è stato possibile ricostruire tridimensionalmente ogni testamento esaminato. Per quanto riguarda questa tesi, due sono i principali testi oggetti di studio: un testamento del 1679, già aperto e analizzato dai ricercatori e per questo ripiegato e riutilizzato come campione di prova per la prima indagine tomografica, e il testamento Alchier-Spiera datato 1634 facente parte di un set di testamenti chiusi, di maggiore interesse per cui l'analisi delle ricostruzioni tomografiche diventa necessaria e fondamentale per la prosecuzione del progetto.

Quello che interessa in particolare la ricerca, infatti, è la possibilità di leggere attraverso le pagine di manoscritti chiusi e nel presente caso di indagine si sono ottenuti buoni risultati, grazie soprattutto all'uso di software di elaborazione e rendering 3D come Parrec e VGstudioMax 2.1.

La tesi è suddivisa in quattro capitoli: Il primo capitolo contiene una veloce descrizione dei raggi X, i quali sono fondamentali per la radiografia e la tomografia, tecniche diagnostiche che si basano principalmente sull'interazione di questi ultimi con la materia.

Nel secondo capitolo si espongono i concetti base della radiografia e del metodo di ricostruzione tomografico di cui vengono illustrati i passaggi principali.

Nel terzo capitolo si descrivono il progetto, i due manoscritti oggetti di studio e gli strumenti utilizzati per l'acquisizione e ricostruzione tomografica.

Infine nell'ultimo capitolo vengono analizzati i risultati, ottenuti con le ricostruzioni tomografiche e le successive elaborazioni con software *ad hoc*.

# Capitolo 1

## I raggi X

Le tecniche radiografiche e tomografiche si basano principalmente sul fenomeno dell'interazione di raggi X con la materia. A tal proposito la prima parte di questa tesi viene dedicata ad una introduzione dei raggi X, soffermandosi in particolar modo sui loro metodi di produzione e sui processi di interazione con la materia.

### 1.1 La natura dei raggi X

I raggi X, per definizione, sono radiazioni elettromagnetiche ionizzanti aventi una lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) che varia all'incirca tra  $10$  e  $10^{-3}$  nm e una frequenza ( $\nu$ ) compresa fra  $3 \cdot 10^{16}$  e  $3 \cdot 10^{20}$  Hz. In base al valore della loro lunghezza d'onda i raggi X vengono classificati in due categorie: da un lato i raggi X "moll", con  $\lambda$  superiore a  $0.1$  nm e dall'altro, nel caso di  $\lambda$  inferiori, i raggi X "duri".

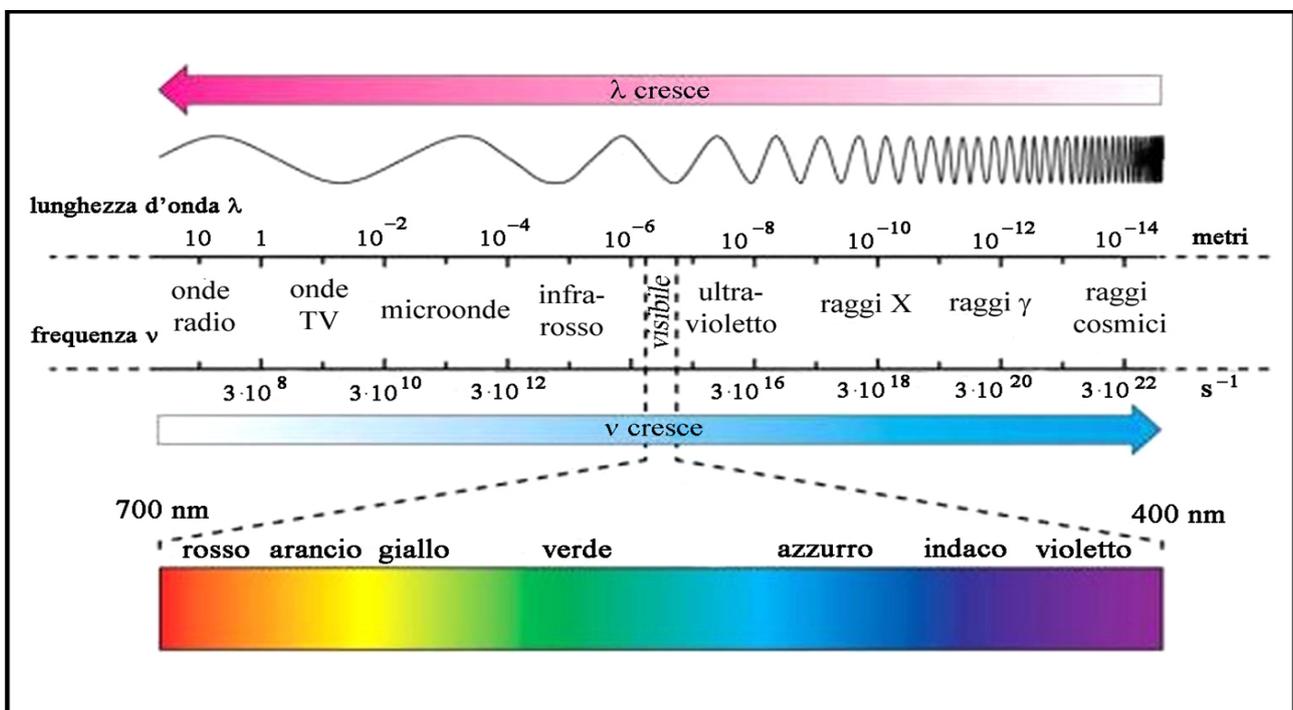


Figura 1.1 – Lo Spettro Elettromagnetico

Disponendo di una piccola lunghezza d'onda e, quindi, di un'elevata energia, i raggi X sono considerati ancora oggi uno strumento e una risorsa indispensabile per poter analizzare internamente la struttura di un corpo o di un qualsivoglia oggetto in maniera non distruttiva, trovando in tal senso applicazione in svariati ambiti di ricerca e lavoro come quello medico, industriale o dei beni culturali.

## 1.2 Il tubo a raggi X

Lo strumento più utilizzato nella produzione di fasci di raggi X si chiama “tubo radiogeno” o più comunemente “tubo a raggi X”. Esso è composto internamente da una ampolla di vetro in cui viene fatto il vuoto spinto contenente un catodo e un anodo ad alta tensione, i quali rappresentano rispettivamente il polo negativo e quello positivo.

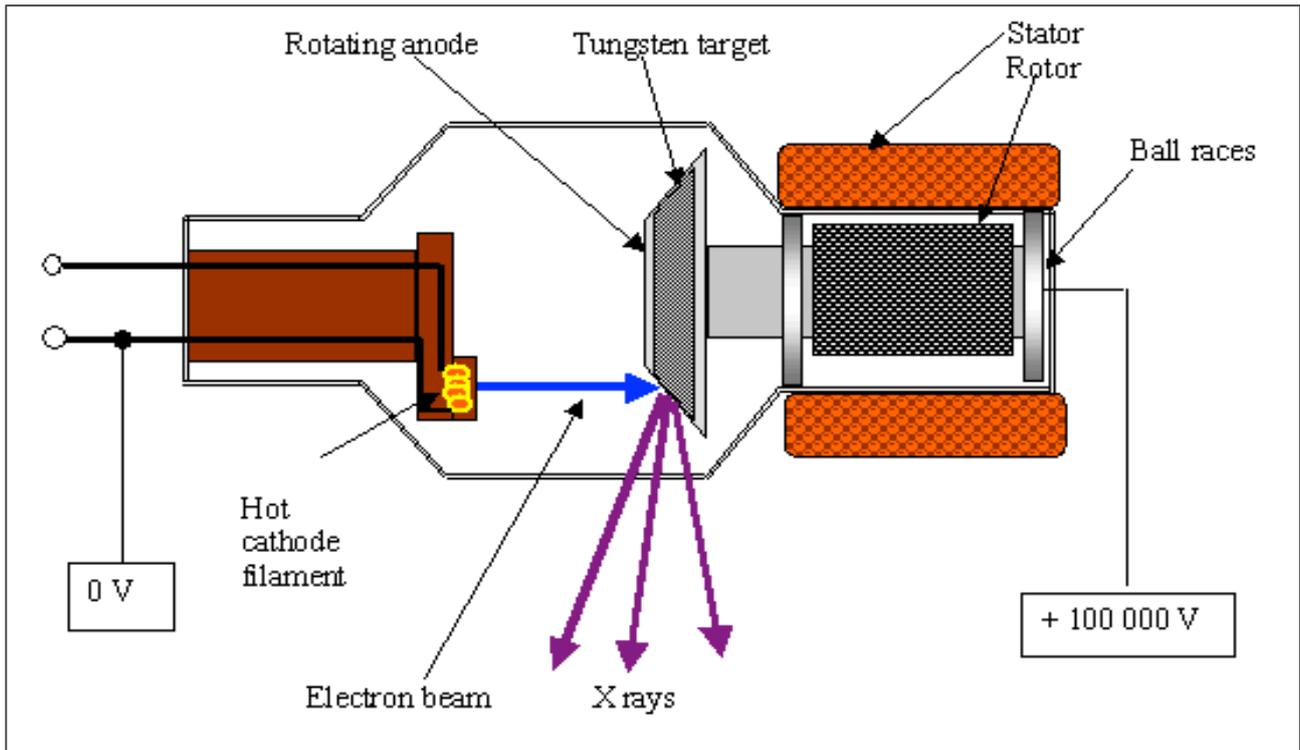


Figura 1.2 – Il Tubo Radiogeno

Il catodo è costituito da un lungo filamento metallico, tipicamente di tungsteno, e da una coppa di focalizzazione, mentre l'anodo, situato al capo opposto, è formato da un disco di materiale ad alto numero atomico, fisso o ruotante. Di solito viene scelto il tungsteno per il suo alto punto di fusione e per lo Z elevato, in modo da aumentare l'efficienza di produzione di raggi X. Il catodo è percorso da corrente ed emette elettroni per effetto termoionico; gli elettroni vengono accelerati e convergono verso l'anodo a causa dell'alta differenza di potenziale tra quest'ultimo e la coppa focalizzatrice, di potenziale ovviamente negativo. Sperimentalmente sappiamo che solo il 5% dell'energia degli elettroni dà luogo alla produzione di raggi X, mentre il resto viene convertito in calore che può causare il deterioramento o persino la fusione dell'anodo. Per tali motivi, soprattutto in campo medico, vengono utilizzati tubi radiogeni formati da anodi rotanti i quali distribuiscono il calore su di un'area più estesa e su una massa più grande a causa dell'incidenza del fascio di elettroni su punti diversi.

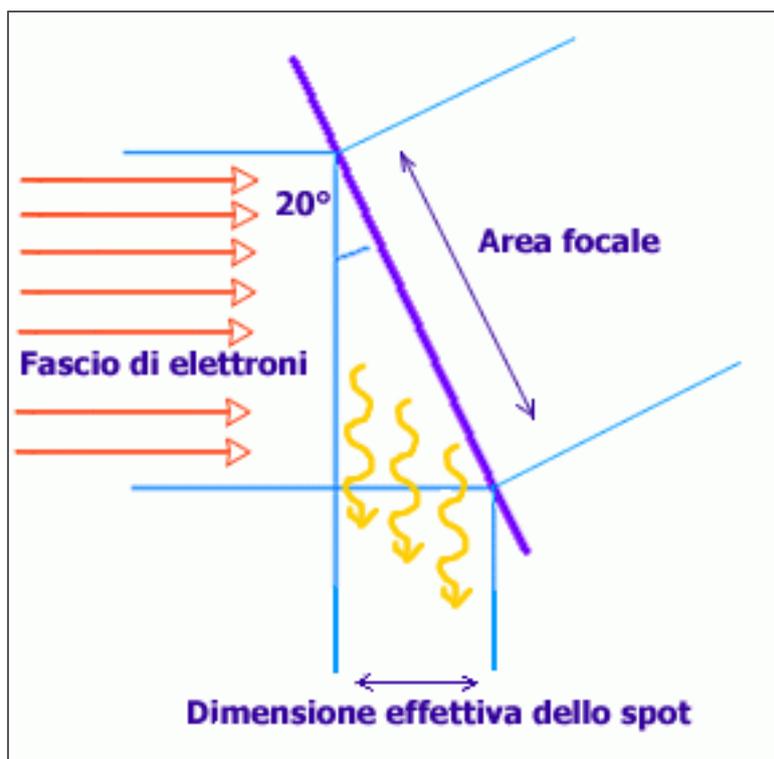


Figura 1.3 - Area e Macchia Focale di un tubo a raggi X

L'area dell'anodo colpita dal fascio di elettroni provenienti dal catodo viene chiamata "target" e non è perfettamente perpendicolare rispetto al fascio elettronico, ma risulta inclinata di un angolo di circa  $20^\circ$ , in modo tale da far interagire gli elettroni con un'area rettangolare, detta "area focale", più grande rispetto alla cosiddetta "macchia focale" o "spot focale effettivo", come illustrato in *Figura 1.3*. La dimensione della macchia focale è molto importante ai fini della risoluzione spaziale nell'immagine radiografica, a causa dell'effetto "penombra". Una macchia focale di dimensioni micrometriche riduce questo effetto e migliora la nitidezza dei contorni nelle immagini. I tubi radiogeni standard generalmente hanno macchie focali di qualche mm, ma esistono sul mercato anche tubi microfocus o nanofocus con macchie focali molto più piccole

## 1.3 Lo spettro di un tubo a raggi X

Lo spettro, ovvero la distribuzione in energia delle radiazioni emesse dal tubo radiogeno, è formato principalmente da due tipi di radiazioni:

- La **radiazione di frenamento** o “Bremsstrahlung”: ottenuta dal processo di decelerazione degli elettroni liberi, che interagendo con il campo elettrico del nucleo di un atomo del target perdono energia sotto forma di radiazione X. Lo spettro di questa radiazione risulta essere continuo variando da 0 ad un valore massimo pari all’energia cinetica degli elettroni;
- La **radiazione caratteristica**: ottenuta dall’emissione di fotoni creati dall’interazione tra un elettrone libero accelerato e un elettrone legato a uno dei livelli più interni dell’atomo. In questo processo l’elettrone legato viene emesso e il suo livello viene istantaneamente occupato da un elettrone appartenente a un livello più esterno. I fotoni emessi, quindi, possiedono un’energia pari alla differenza fra le energie di legame degli elettroni coinvolti nella transizione ed è per questo motivo che lo spettro è a righe ed è caratteristico per ogni elemento.

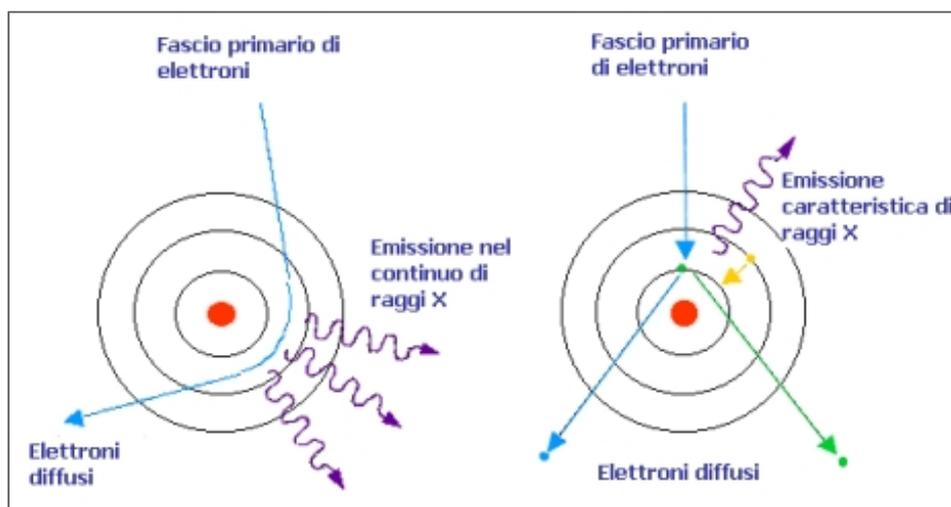


Figura 1.4 – Rappresentazione dei processi di produzione di raggi X

Lo spettro che si ottiene dalla combinazione dei precedenti è proprio quello del tubo a raggi X, il quale viene facilmente modificato tramite l’uso di filtri, tipicamente di alluminio o rame. La filtrazione è principalmente praticata per rimuovere la parte meno energetica del fascio perché, facendo ad esempio riferimento al campo medico, i fotoni a bassa energia sono completamente assorbiti dal corpo del paziente e quindi inutili per la formazione dell’immagine radiografica e tomografica. Come conseguenza della filtrazione si verifica il

cosiddetto “indurimento del fascio” ( o “beam hardening”), ovvero un aumento dell’energia media del fascio di raggi X.

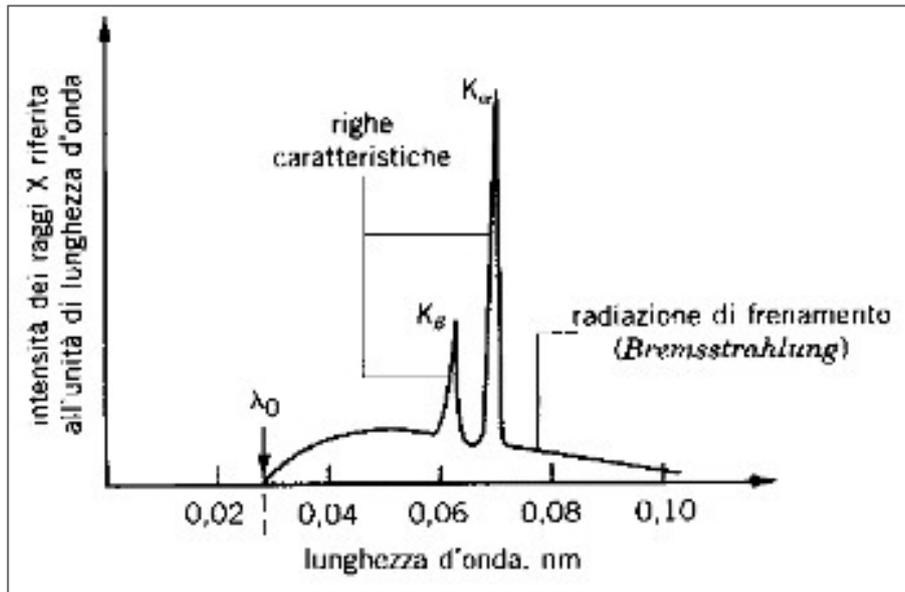


Figura 1.5 – Spettro dei raggi X

## 1.4 L'interazione con la materia

Durante il processo di penetrazione di un fascio di fotoni nella materia, vi è una probabilità che il fotone venga assorbito dalla materia riducendo conseguentemente il numero (intensità) di fotoni del fascio uscente. Per quanto riguarda le modalità di interazione si possono considerare principalmente tre tipologie:

- L'effetto Compton;
- L'effetto fotoelettrico;
- La produzione di coppie.

La probabilità che avvenga una determinata interazione dipende dalla natura e dal numero atomico del materiale bersaglio e dall'energia dei fotoni, come mostrato in *Figura 1.6*.

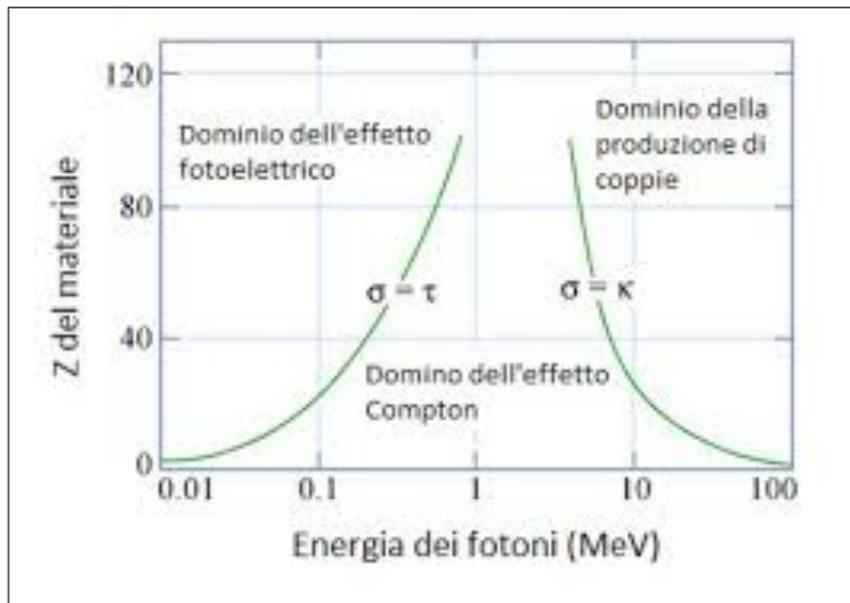


Figura 1.6 - Dominio degli effetti nell'interazione con la materia

Risulta chiaro come l'effetto fotoelettrico sia dominante per le basse energie fotoniche mentre la produzione di coppie diventa rilevante nel caso opposto; nel range di energie intermedie predomina l'effetto Compton ma l'ampiezza di questa regione decresce al crescere del numero atomico. Di seguito vengono illustrati tutti e tre i fenomeni.

L'**effetto Compton** consiste essenzialmente nell'urto anelastico di un fotone con un elettrone appartenente ad un orbitale esterno di un atomo del materiale attraversato. In seguito all'interazione il fotone è deviato e cede parte della sua energia all'elettrone, che acquistando energia viene messo in moto. A causa della perdita di energia del fotone il processo viene considerato "anelastico" e potendo riferirci ad un'interazione tra fotone e singolo elettrone, il processo è denominato "incoerente".

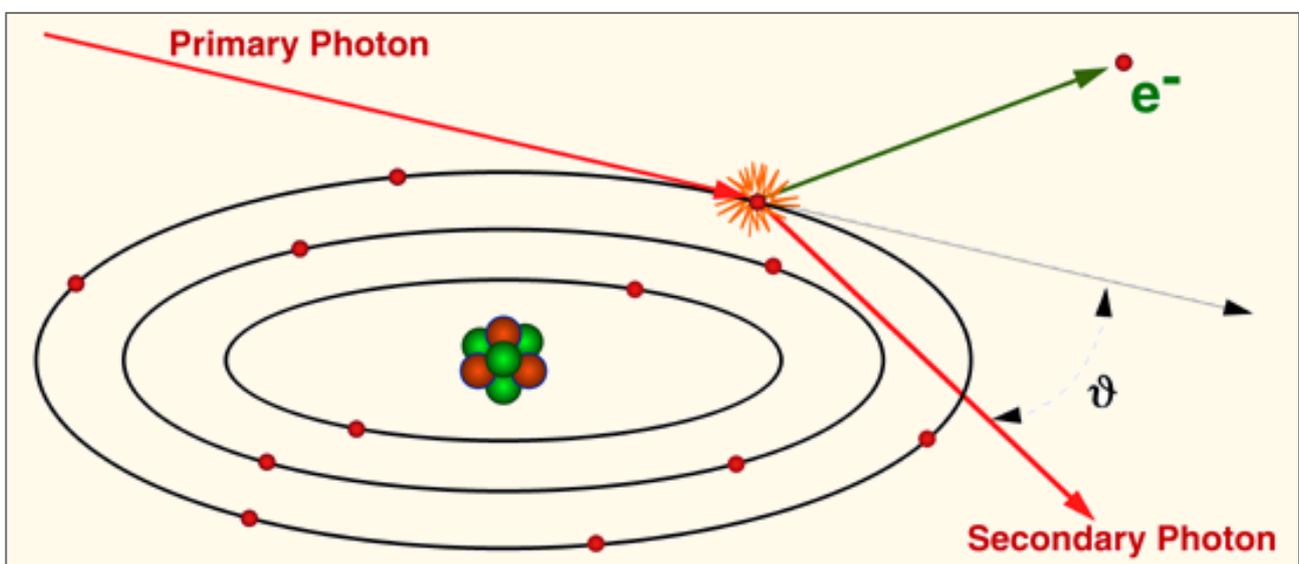


Figura 1.7 - La rappresentazione dell'effetto Compton

Analizzando in dettaglio l'effetto Compton per mezzo delle leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto, si nota come l'energia finale del fotone ( $E_f = hv'$ ) dipende da quella iniziale ( $E_i = hv$ ) e dall'angolo di diffusione ( $\theta$ ) tramite la legge:

$$E_f = \frac{E_i}{1 + \gamma(1 - \cos\theta)} \quad \text{dove: } \gamma = \frac{hv}{mc^2}$$

Si può ricavare l'energia cinetica dell'elettrone attraverso la formula:

$$E_{e^-} = E_i - E_f = E_i \left[ \frac{\gamma(1 - \cos\theta)}{1 + \gamma(1 - \cos\theta)} \right]$$

Alle basse energie la distribuzione angolare dei fotoni diffusi è isotropa, mentre al crescere dell'energia i fotoni sono deviati con angoli sempre più piccoli. Anche l'angolo di emissione degli elettroni dipende dall'energia, ma a differenza dei fotoni, sono emessi con angoli minori di  $90^\circ$ . Studiando infine la sezione d'urto, ovvero la probabilità d'interazione per effetto Compton tra fotone e materia, è possibile osservare un legame di proporzionalità con il numero atomico del materiale ( $\sigma_C \propto Z$ ).

L'**effetto fotoelettrico** avviene quando un fotone di energia medio bassa interagisce con un elettrone delle orbite più interne di un atomo del materiale attraversato. Nell'urto il fotone perde la sua energia e viene completamente assorbito permettendo l'emissione di un elettrone (fotoelettrone) con energia pari alla differenza tra energia del fotone e quella di legame ( $E_b$ ):

$$E_{e^-} = E_i - E_b$$

L'atomo poi si riassetta dal punto di vista energetico portando elettroni dei livelli più esterni nella posizione precedentemente occupata dall'elettrone emesso, con conseguente emissione di raggi X caratteristici.

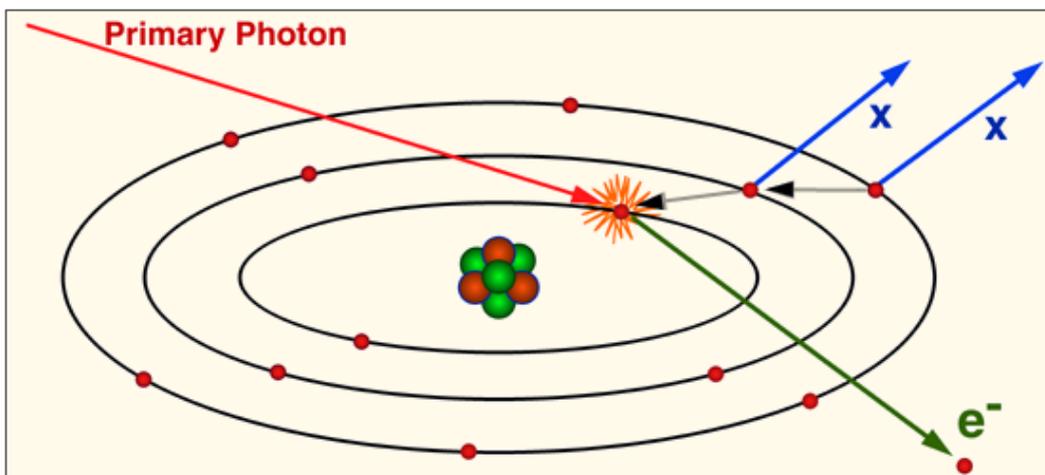


Figura 1.8 - La rappresentazione dell'effetto fotoelettrico

Questo effetto è tanto più probabile quanto più l'elettrone è legato all'atomo, pertanto avviene più frequentemente per elettroni dell'orbita più interna che costituiscono circa l'80% di tutti i fotoelettroni emessi e per ogni orbitale la probabilità aumenta quando l'energia del fotone è tale da strappare l'elettrone dall'atomo. La sezione d'urto per l'effetto fotoelettrico risulta essere  $\sigma_{fe} \propto Z^4 \cdot (h\nu)^{-3.5}$ . Tuttavia in corrispondenza dell'energia di soglia del processo per le differenti orbite si hanno discontinuità improvvise nel suo andamento, ricavabili per mezzo della legge di Moseley (evidenti nei materiali con Z elevato):

$$E = 13.6 \frac{(Z - \sigma)^2}{n^2} eV$$

dove n è il numero quantico principale e  $\sigma$  è un numero che considera lo schermo creato dagli elettroni delle orbite più interne.

La **produzione di coppie** è un processo di assorbimento in cui un fotone si materializza in un elettrone ed un positrone. Tale processo si verifica, nel campo del nucleo, soltanto quando l'energia del fotone è tale da permettergli di sfuggire all'interazione con la nube elettronica, arrivando in prossimità del nucleo dell'atomo bersaglio e risentendo quindi del suo effetto.

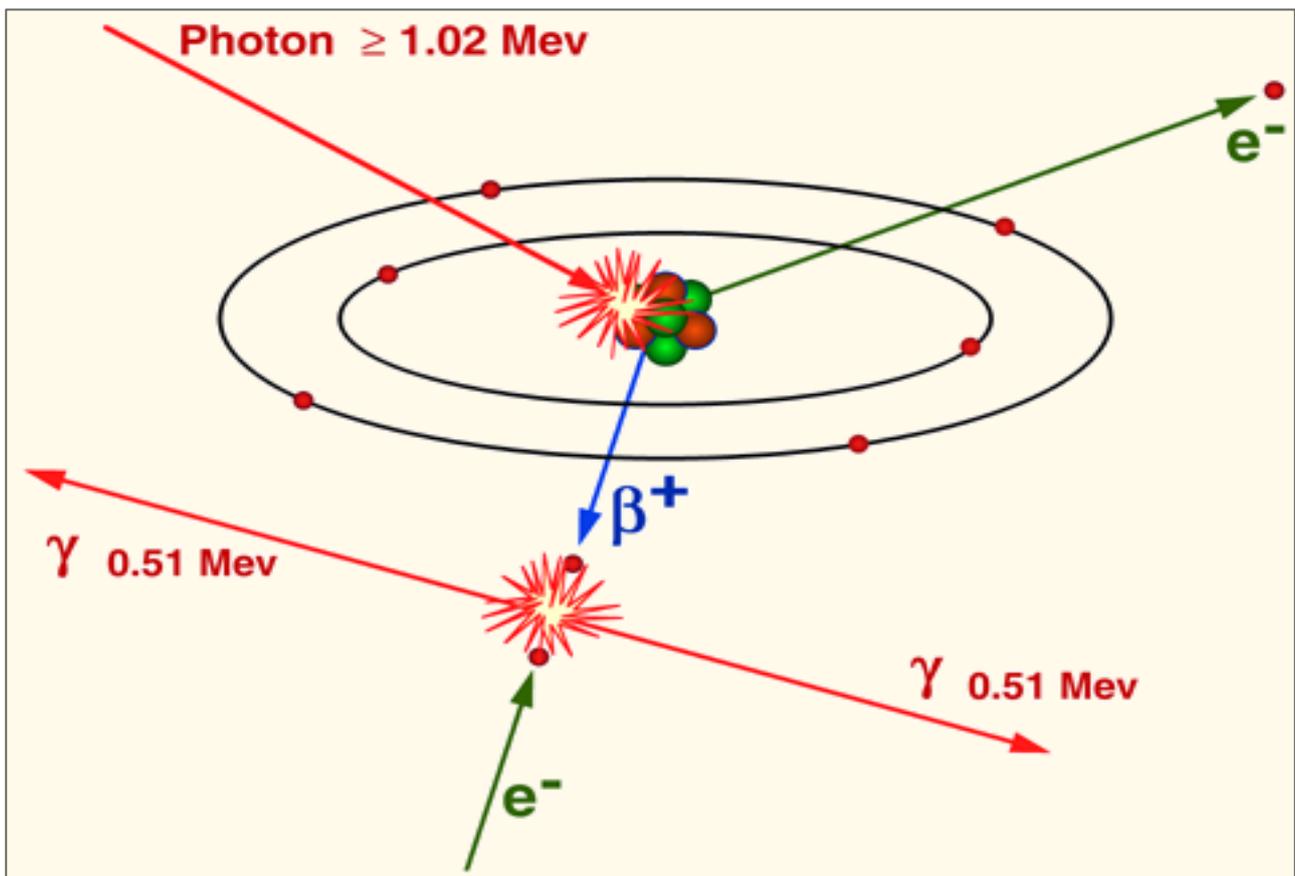


Figura 1.9 – La rappresentazione della produzione di coppie

Nella creazione di coppie il fotone viene assorbito e la sua energia viene in parte trasferita in massa di quiete della coppia e in parte trasformata in energia cinetica delle due particelle, per cui la somma delle due energie cinetiche delle particelle risulterà essere pari alla differenza tra l'energia del fotone incidente e le energie a riposo delle due particelle ( $2mc^2$ ):

$$E_{e^+} + E_{e^-} = E_i - 2mc^2$$

Tuttavia l'energia non si distribuisce in parti uguali, ma, a causa della repulsione nucleare, il positrone ne riceve una quantità leggermente superiore. La sezione d'urto per la produzione di coppie risulta proporzionale al quadrato del numero atomico ( $\sigma_{pc} \propto Z^2$ ).

Volendo calcolare la sezione d'urto totale relativa all'interazione tra raggi X e materia, trascurando gli effetti meno rilevanti, si possono sommare le tre diverse sezioni d'urto degli effetti appena discussi, trovando che:

$$\sigma_{tot} = \sigma_C + \sigma_{fe} + \sigma_{pc}$$

# Capitolo 2

## La tecnica tomografica

La tecnica tomografica consiste nell'acquisizione di più radiografie a varie angolazioni dell'oggetto da studiare e nella sua successiva ricostruzione tridimensionale mediante algoritmi matematici ad hoc. Attraverso software di rendering 3D si può ricostruire l'intero volume, operando tagli virtuali per poter studiare, nel particolare, la struttura interna. Qui a seguire vengono descritti i principi base della radiografia e della tomografia presentando in breve il metodo di ricostruzione e i principali componenti di un sistema tomografico.

### 2.1 I principi della tecnica radiografica

La radiografia è una tecnica abbastanza semplice che permette di analizzare un oggetto internamente senza distruggerlo, mediante l'utilizzo di raggi X. Un'immagine radiografica riproduce una mappa bidimensionale dell'assorbimento subito dai raggi X durante l'interazione con l'oggetto. Un fascio di raggi X, che ha attraversato un determinato spessore  $\chi$  di un oggetto omogeneo, subisce un processo di assorbimento esponenziale rappresentato in termini di intensità come:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu\chi}$$

(dove  $I_0$  è l'intensità iniziale del fascio di raggi X)

Questa intensità dipenderà, fissata l'energia, sia dallo spessore attraversato ( $\chi$ ) sia dal coefficiente di attenuazione del materiale ( $\mu$ ). Nel caso in cui il materiale non sia omogeneo e quindi abbia una composizione eterogenea, l'intensità uscente può essere calcolata attraverso integrali di linea lungo la direzione del fascio:

$$I = I_0 \cdot e^{-\int_a^b \mu(\chi)\chi d\chi}$$

Se il fascio, infine, è policromatico come quello di un tubo radiogeno, bisogna anche tenere conto del fatto che il coefficiente di attenuazione lineare nel punto  $\chi$  è funzione dell'energia E:

$$I = \int I_0(E) \cdot e^{-\int_a^b \mu(x) dx} dE$$

L'immagine radiografica si ottiene proprio dall'interazione dei raggi X con la materia, come già discusso nello scorso capitolo. Per un contrasto ottimale dell'immagine solo i raggi X che non hanno subito alcun tipo di interazione dovrebbero raggiungere il rivelatore; infatti i raggi X che hanno subito interazione per effetto Compton e hanno raggiunto il rivelatore contribuiscono ad un peggioramento della qualità dell'immagine, poiché questi hanno perso parte della loro energia e/o hanno subito una deviazione dalla loro direzione iniziale. Le informazioni sulla struttura interna dell'oggetto vengono così ottenute dal rapporto fra fotoni assorbiti e fotoni trasmessi.

## 2.2 La tomografia assiale computerizzata

L'immagine radiografica si limita a proiezioni bidimensionali di oggetti tridimensionali non permettendo interpretazioni sulla profondità della struttura dell'oggetto, in quanto più sezioni dell'oggetto concorrono a sovrapporsi e formare un'unica immagine. Per avere informazioni sulla tridimensionalità dell'oggetto è per questo necessario radiografarlo da più angolazioni. La tecnica che si basa su questo procedimento è la tomografia assiale computerizzata o più comunemente TAC. La TAC è un metodo di indagine non invasivo il quale permette, attraverso algoritmi matematici, la ricostruzione di sezioni trasversali dell'oggetto analizzato, chiamate slice, combinando le informazioni del rivelatore provenienti da diversi angoli di rotazione del sistema sorgente-rivelatore rispetto all'oggetto. A partire dalle slice, mediante software di rendering 3D, è poi possibile ottenere rappresentazioni tridimensionali della struttura interna dell'oggetto analizzato.

## 2.3 I componenti di un sistema tomografico

I principali componenti di un sistema tomografico, escludendo il computer per l'acquisizione e la ricostruzione di immagini, sono:

- La sorgente di raggi X;
- Il sistema di movimentazione dell'oggetto;
- Il rivelatore.

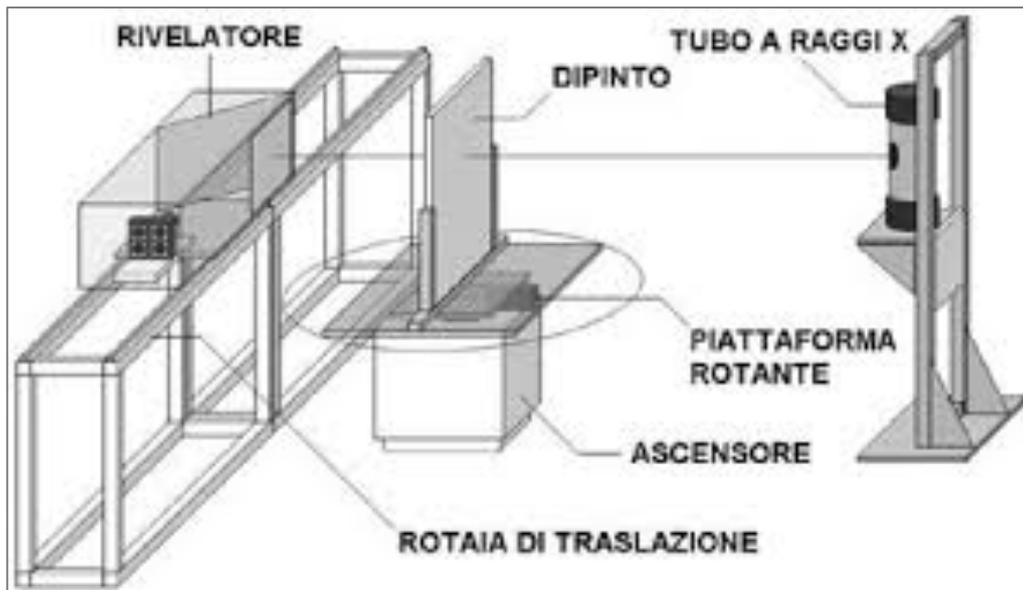


Figura 2,1 – Un esempio di apparato tomografico

Vengono ora descritte le caratteristiche della strumentazione:

La **sorgente di raggi X** è molto importante per le prestazioni del sistema. Possiamo distinguere tre tipologie di strumenti aventi range diversi di energia di lavoro: il tubo a raggi X (da 5 keV a 450 keV), il sincrotrone (da 5 keV a 100 keV) e gli acceleratori lineari (da 2 MeV a 15 MeV).

Ad oggi i sincrotroni sono la miglior sorgente di raggi X perché forniscono fasci monocromatici e flussi elevati, consentendo di ottenere immagini ad altissima risoluzione e alti valori di SNR (è il rapporto segnale-rumore che mette in relazione la potenza del segnale utile rispetto a quella del rumore; il rumore può essere diminuito ma mai eliminato per cui è chiaro che SNR sia a tutti gli effetti un parametro di qualità).

Parametro di fondamentale rilevanza è il così detto “focal spot” (o macchia focale) ovvero la dimensione dell’area dell’anodo da cui il fascio viene emesso. La dimensione di questa macchia è di grande importanza per la definizione dell’immagine; infatti più piccola è la macchia focale e più nitida sarà l’immagine prodotta dal fascio sul rivelatore, mentre per macchie estese si crea un effetto di “source unsharpness” o penombra, calcolabile come:

$$P = f \cdot \frac{D}{d}$$

dove  $f$  è la dimensione della macchia focale,  $D$  la distanza tra oggetto e piano dell’immagine e  $d$  è la distanza tra oggetto e sorgente.

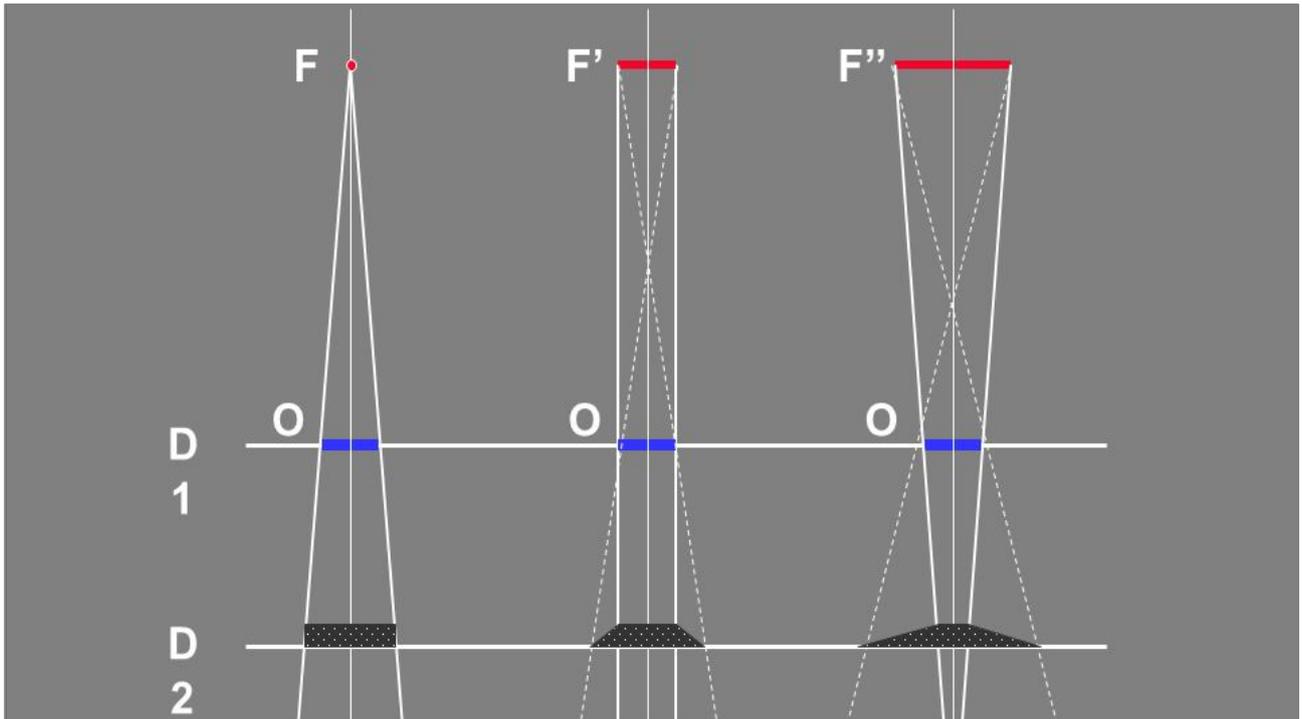


Figura 2.2 – L'effetto source unsharpness

Un altro parametro molto importante è la magnificazione (M) dell'oggetto, dovuta al fatto che i raggi del fascio non sono paralleli tra loro. La magnificazione, calcolata come rapporto delle distanze tra la sorgente e il rivelatore e la sorgente e l'oggetto, può essere utilizzata per migliorare la risoluzioni delle immagini radiografiche. Tuttavia è legata al già citato effetto penombra che aumenta con essa e che risulta calcolabile come:

$$P = f(M - 1)$$

Risulta quindi necessario giungere ad un compromesso fra l'ingrandimento dato dal fattore di magnificazione e la perdita di nitidezza dovuta all'effetto penombra.

I tubi a raggi X detti "microfocus" permettono di raggiungere un'altissima risoluzione spaziale, infatti il loro punto focale è dell'ordine di pochi  $\mu m$  consentendo quindi di aumentare la magnificazione con un effetto di blurring trascurabile (esistono anche tubi chiamati "nanofocus" con macchie focali inferiori al  $\mu m$ ).

Prima di passare al secondo componente è rilevante sottolineare che la sorgente può essere collimata in vari modi a seconda del tipo di collimatore utilizzato; i più conosciuti sono il collimatore "fan beam" costituito da due lastre parallele in modo da ottenere un fascio a ventaglio, il collimatore "pencil beam" di forma cilindrica, forato, per ottenere fasci sottili. Nel caso in cui non si faccia uso di collimatori, sfruttando quindi tutto il cono d'uscita, si ha una geometria di tipo "cone beam".

Il **sistema di movimentazione** è composto da una base rotativa che, appunto, ruota il campione e, talvolta, da un secondo asse meccanico che permette movimenti verticali dell'oggetto. L'asse rotativo è indispensabile per poter acquisire il set di radiografie per la ricostruzione tomografica, mentre la traslazione può rivelarsi utile ad esempio per posizionare con precisione l'oggetto davanti al rivelatore.

Il **rivelatore** misura l'intensità dei raggi X che non vengono assorbiti dall'oggetto analizzato. Attualmente esistono varie tipologie di questi sistemi che si differenziano, in primo luogo, in base al metodo di rivelazione che può essere "diretto", se la radiazione crea nel dispositivo un segnale elettrico proporzionale all'intensità del fascio incidente, o "indiretto", se la radiazione X viene prima "convertita" in luce visibile. Ciò che risulta fondamentale in un sistema tomografico è, in ogni caso, l'alta risoluzione, per cui è necessario utilizzare un rivelatore con pixel di piccole dimensioni, con un elevato range dinamico (rapporto tra il valore massimo possibile del segnale e quello minimo misurabile dal sistema:  $D = 20 \log(S/N)$  dove S è il segnale massimo in livelli di grigio e N è l'ampiezza media del rumore) e che acquisisca velocemente evitando la formazione di artefatti. Ovviamente non esiste nessun rivelatore in grado di soddisfarle contemporaneamente tutte queste richieste. Due sistemi di rivelazione molto utilizzati e con buone prestazioni sono i rivelatori digitali di tipo Flat Panel e quelli basati sull'accoppiamento di uno schermo scintillatore con un sensore CCD. In laboratorio si è fatto uso del primo tipo di rivelatore di cui viene data nel seguito una breve descrizione.

I Flat panel, introdotti alla fine dello scorso secolo, sviluppati principalmente per l'imaging biomedico, sono realizzati dall'unione di un rivelatore di raggi X e da un piccolo sensore di forma appiattita da cui deriva il nome. Proprio per la loro composizione permettono di acquisire immagini bidimensionali offrendo una serie di vantaggi in termini di risoluzione spaziale e range dinamico avendo comunque buone prestazioni in termini di tempi di lettura. Il cuore del sistema è la matrice attiva AMA (Active Matrix Array), realizzata con materiale semiconduttore e formata da milioni di pixels connessi da transistor TFT (Thin Film Transistor) a linee di trasmissione legate alla periferica.

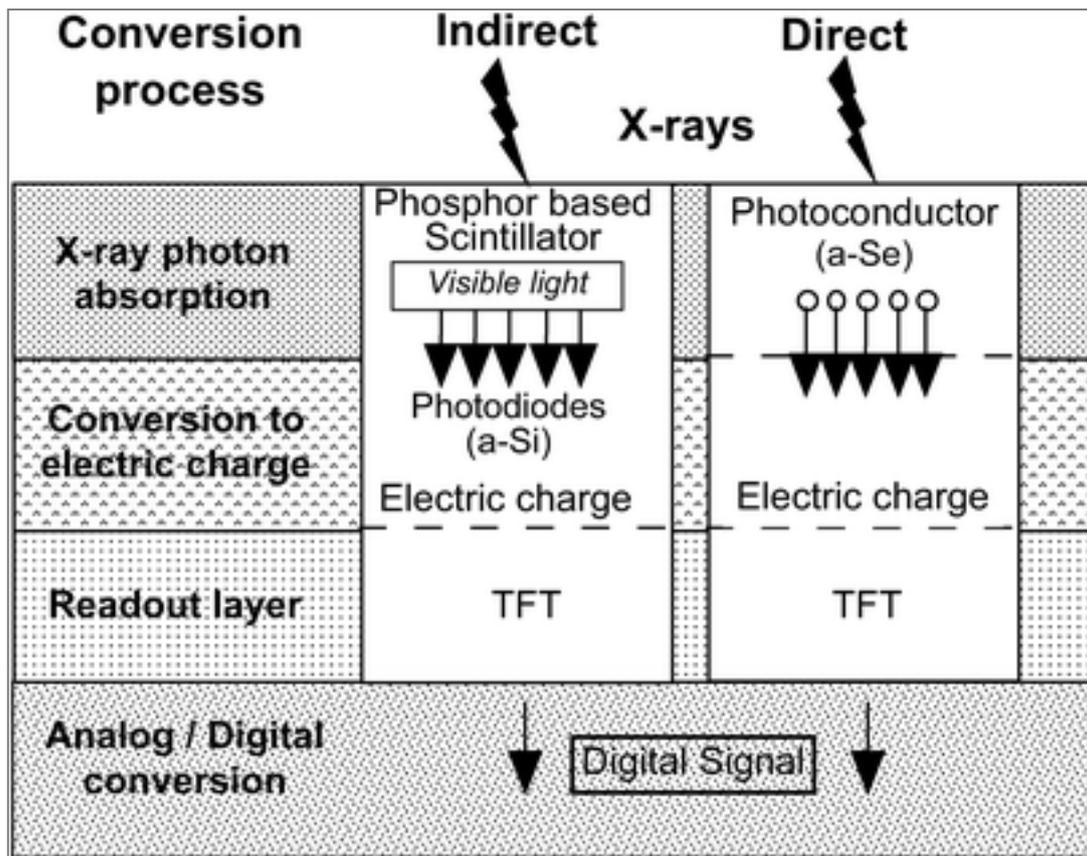


Figura 2.3- I flat panel a rivelazione indiretta e diretta

Esistono due tipologie di flat panel: a conversione diretta o indiretta. Nella prima i fotoni sono assorbiti da uno strato fotoconduttore formando una coppia elettrone-lacuna che, sotto l'influenza di un forte campo elettrico, separa le cariche guidandole successivamente verso gli elettrodi collettori del TFT, dove vengono immagazzinate e portate sul circuito di lettura. Nella seconda, usata nel sistema di laboratorio, i fotoni vengono assorbiti da uno strato di materiale scintillante, producendo luce, la quale viene raccolta da una matrice attiva di fotodiodi che la convertono in carica elettrica inviandola al circuito di lettura. Si ricorda che il flat panel di laboratorio ha un'area sensibile di circa  $20 \times 25 \text{ cm}^2$  con un pixel di dimensioni pari a  $127 \mu\text{m}^2$ .

## 2.3 Il metodo di ricostruzione tomografico

Una volta finita la fase di acquisizione, inizia la fase di ricostruzione, dove, attraverso l'elaborazione delle immagini, si ottengono le slice ovvero immagini bidimensionali rappresentanti una diversa sezione interna dell'oggetto. Le slice hanno spessore non nullo in quanto rappresentano una sezione di volume, e quindi anche il pixel rappresenta un elemento di volume chiamato comunemente "voxel".

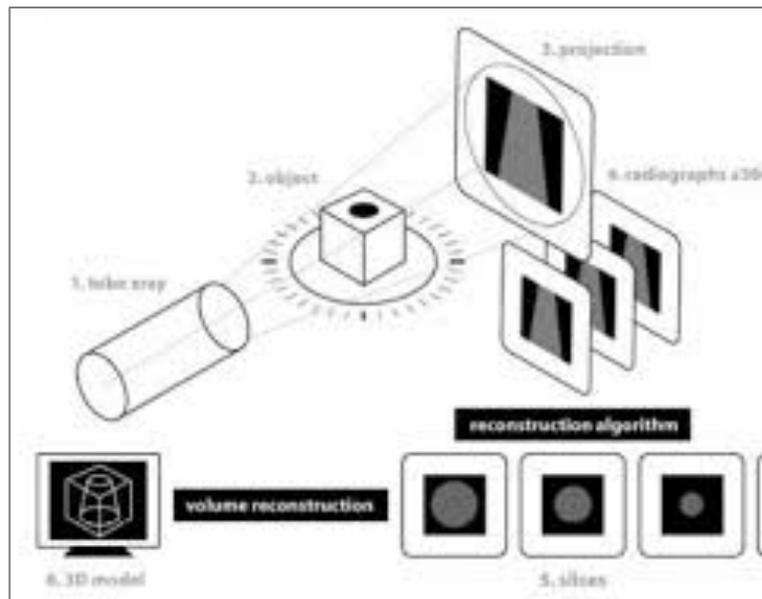


Figura 2.4 – La rappresentazione schematica del metodo tomografico

Nella descrizione del metodo di ricostruzione si suppone idealmente di avere un fascio di raggi X, paralleli tra loro, i quali attraversando il piano di un oggetto giungono al rivelatore formato da  $n$  pixels. L'idea di base è quella di dividere la slice in una griglia " $n \times n$ " di pixels ciascuno con coefficiente di attenuazione ( $\mu_y$ ) e dimensione " $w \times w$ " uguale alla grandezza di un singolo elemento che compone il rivelatore. L'intensità misurata da ogni elemento del rivelatore risulta essere:

$$I_j = I_0 \cdot e^{-|\mu_{1j} + \mu_{2j} + \dots + \mu_{nj}|w} \quad \text{dove: } j = 1, 2 \dots n$$

ovvero:

$$\ln\left(\frac{I_0}{I_j}\right) = \sum_{i=1}^n \mu_{ij} \cdot w$$

La quantità sopra indicata prende il nome di proiezione " $p_j$ " ed è l'informazione base da cui partire per la ricostruzione. Per ottenere tutti i coefficienti di attenuazione è necessario ottenere tutte le proiezioni prese con l'oggetto in rotazione. Tuttavia il calcolo della proiezione si complica nel momento in cui viene a mancare la perpendicolarità tra il fascio parallelo di raggi X e la griglia ideale in cui è divisa la sezione dell'oggetto, perché in questo caso i fotoni attraversano spessori di pixels, variabili l'uno dall'altro, dipendenti dalla proiezione.

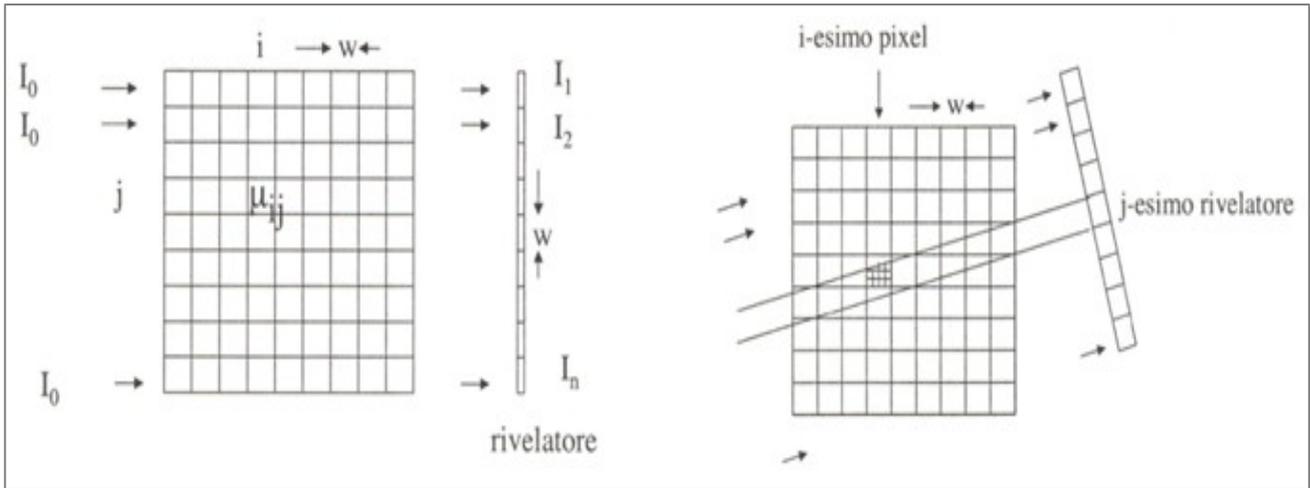


Figura 2.5 - (a) La suddivisione dell'oggetto in pixel. (b) Il contributo dei pixel sulla j-esima proiezione

Per risolvere il problema, generalmente, si adottano un sistema di coordinate  $(x,y)$  per i punti dell'oggetto e  $(r,s)$  per il percorso lineare dei raggi del fascio, così che quando il sistema è ruotato di un angolo  $\varphi$  rispetto all'asse  $y$ , le proiezioni  $p_1 \dots p_n$  possono essere espresse come integrale di linea della funzione  $f(x,y)$  che rappresenta la distribuzione dei coefficienti di attenuazione:

$$p(r, \varphi) = \int f(x, y) ds$$

È necessario quindi prendere  $m$  acquisizioni a  $\varphi$  angoli di rotazione equispaziati, per ricostruire una singola slice. Ovviamente ogni acquisizione ha a sua volta  $n$  proiezioni a intervalli di  $w$ , pertanto è buona regola, per avere un numero sufficiente di dati indipendenti, imporre la condizione per cui  $m > n$ . Viene creata una matrice " $n \times m$ " ( $n$  pixels e  $m$  proiezioni) chiamata "sinogramma", la quale contiene una sinusoide per ogni particolare dell'oggetto, la cui ampiezza rappresenta la distanza del particolare dal centro di rotazione.

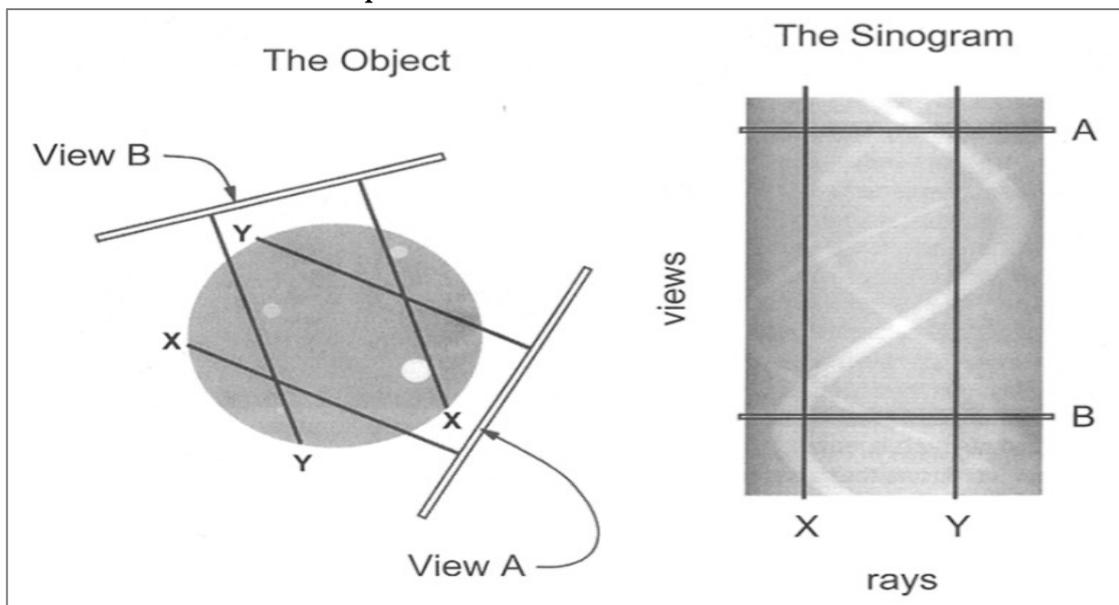


Figura 2.6 - L'oggetto e il relativo sinogramma

Il passaggio dal sinogramma alla slice ricostruita è effettuato tramite l'algoritmo di retroproiezione ("backprojection"), il quale proietta all'indietro, sul piano della slice, i valori di ogni proiezione alle diverse angolazioni.

Per ogni pixel, il valore della funzione  $f(x,y)$  viene calcolato come la somma dei contributi delle  $m$  proiezioni, ovvero:

$$\hat{f}(x,y) = \sum_{j=1}^m p_j \Delta\varphi$$

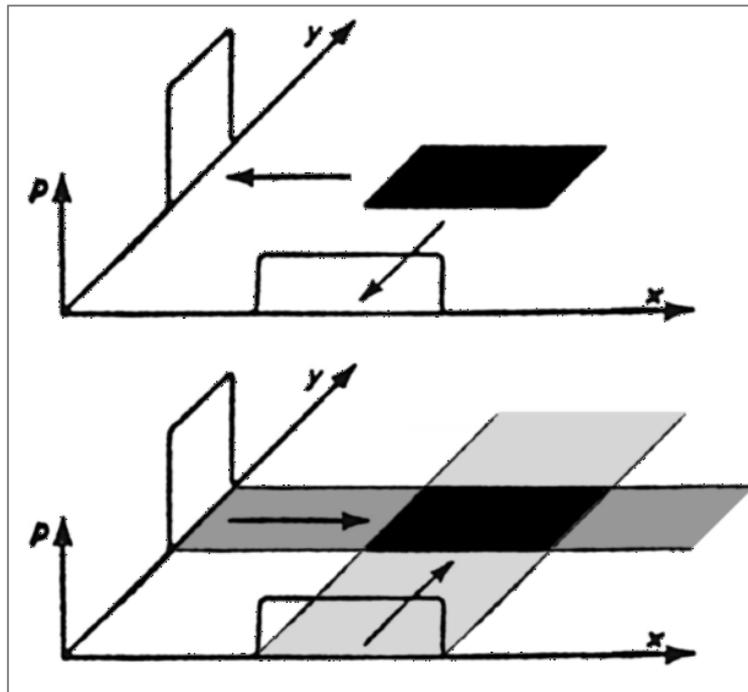


Figura 2.7 - Le proiezioni in acquisizione e retroproiezione

Tuttavia, se si considera la retroproiezione di un oggetto circolare, ogni profilo proietta sul piano una striscia che va a creare un artefatto a stella. All'aumentare delle proiezioni l'artefatto scompare, lasciando però attorno all'oggetto un alone di intensità decrescente allontanandosi dal centro.

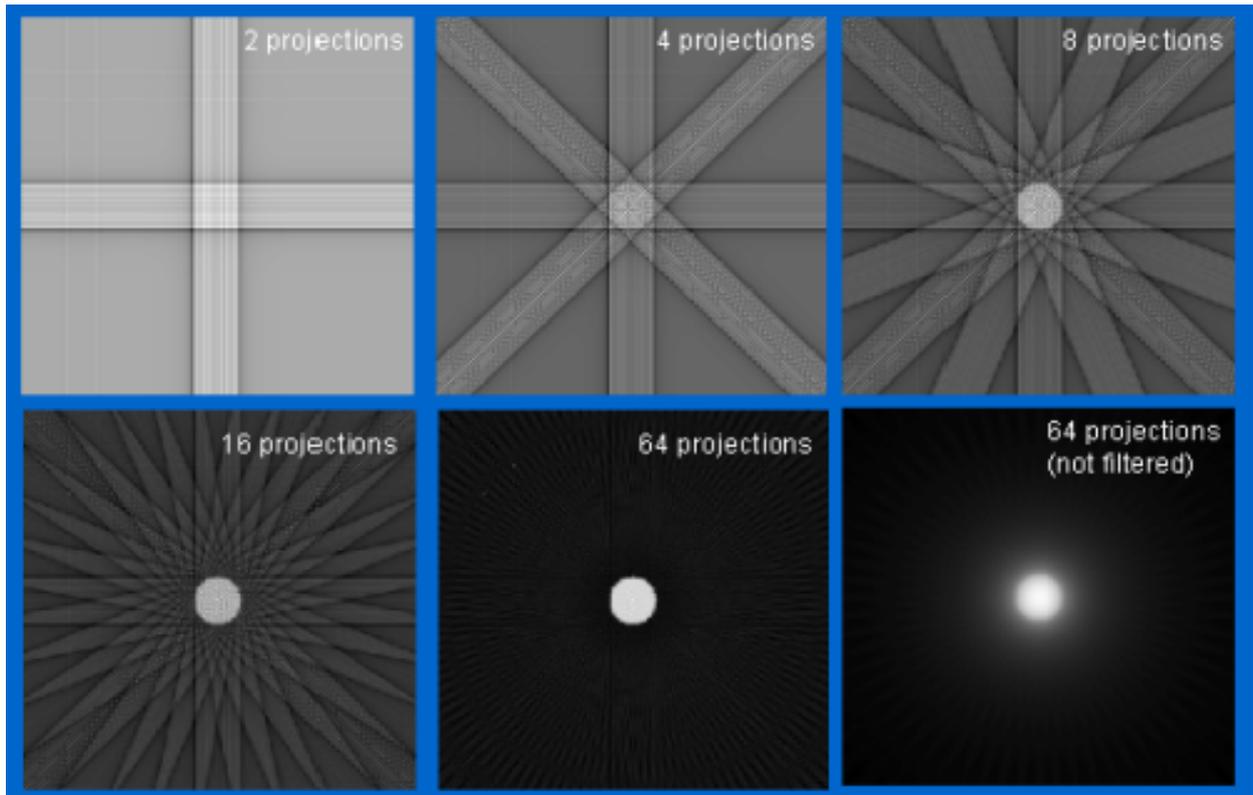


Figura 2.8 – L'artefatto a stella e il suo filtraggio

Al fine di eliminare questo effetto, si utilizzano filtri sia sulle proiezioni che direttamente nelle immagini finali così da ridurre il più possibile il rumore presente nella slice ricostruita. Il metodo, ad oggi, più utilizzato per la ricostruzione di immagini tomografiche è l'algoritmo di retroproiezione filtrata "filtered backprojection", che si basa sul "teorema della sezione centrale di Fourier", fondamentale, perché mette in relazione la trasformata di Fourier unidimensionale di ciascuna proiezione con i valori che assume la trasformata di Fourier bidimensionale dell'immagine da ricostruire lungo una retta corrispondente alla direzione in cui è stata acquisita la proiezione. Per ricostruire l'immagine è quindi necessario eseguire l'antitrasformata di Fourier bidimensionale nello spazio delle trasformate di Fourier delle proiezioni. È chiaro per questo motivo che la retroproiezione filtrata si compone di due fasi: la prima consiste nel filtraggio delle proiezioni (fatta nello spazio reale o in quello trasformato di Fourier) e la seconda nella retroproiezione vera e propria.

# Capitolo 3

## Il progetto VTM

### 3.1 Le origini e gli scopi del progetto

Il progetto “*Venice Time Machine*”, che vede collaborare l’Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) con l’Università Cà Foscari e l’“Archivio di Stato” di Venezia, è un progetto internazionale che si pone come obiettivo primario la trasformazione di oltre 100 km di documenti archiviati in 1000 anni di storia veneziana in una banca digitale di informazioni ad accesso libero. In questo momento già tantissimi manoscritti sono stati scannerizzati e digitalizzati, tuttavia, alcuni di questi documenti sono molto fragili oppure non sono mai stati aperti, come nel caso di numerosi testamenti, per cui il progetto si propone anche di esplorare metodi innovativi e non invasivi, quali la tomografia computerizzata con raggi X, per digitalizzare tali documenti.

Attraverso la tomografia a raggi X si cerca di arrivare ad una lettura virtuale di parole e la visione di immagini da pagina a pagina in modo veloce e non invasivo, riducendo il rischio di danneggiamento del documento, senza che questo venga in alcun modo aperto o manipolato. Questo tipo di tecnica non è applicabile a tutti i manoscritti, infatti per molti secoli sono stati usati due tipi di inchiostro, il primo a base di ferro e il secondo di carbone. Quest’ultimo però risulta assolutamente trasparente ai raggi X, per cui, i vari manoscritti sono stati sottoposti, prima della tomografia, ad un’indagine di tipo XRF (fluorescenza a raggi X) al fine di selezionare quelli scritti mediante il primo dei due inchiostri, denominato inchiostro “ferrogallico”. La composizione dell’inchiostro ferrogallico è molto variabile, come ha messo in evidenza l’analisi dei testamenti, ma principalmente si è visto come il tipo di inchiostro utilizzato, di base acquosa, è composto da “gallato di ferro”, ottenuto dalla reazione di un tannino (sostanza chimica presente negli estratti vegetali) con un sale ferroso, che conferisce una quasi indelebilità all’inchiostro.

### 3.2 I Testamenti Veneziani

Nei laboratori di ricerca del gruppo “X-ray imaging”, presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell’Università di Bologna sono stati effettuati molti test tomografici su testamenti veneziani, alcuni già aperti ed altri ancora sigillati. In particolare, per quanto è trattato in questa tesi, due sono i testamenti di

interesse; il primo è un testamento del 1679, già aperto e usato come campione di prova, sottoposto per primo alla ricostruzione tomografica e usato anche come campione per osservare eventuali differenze nella qualità delle immagini ricostruite dovute all'utilizzo di due differenti sorgenti di raggi X. Il secondo, invece, è un testamento del 13 luglio 1634, i cui testatori sono Alchier Giustina e Spiera Pietro, di maggiore interesse per il progetto Venice Time Machine poiché assieme ad altri testamenti analizzati in laboratorio, con datazioni che vanno dal 1300 al 1800, è ancora chiuso e quindi potrebbe fornire informazioni importanti sull'efficacia della tecnica tomografica su questo tipo di documenti.

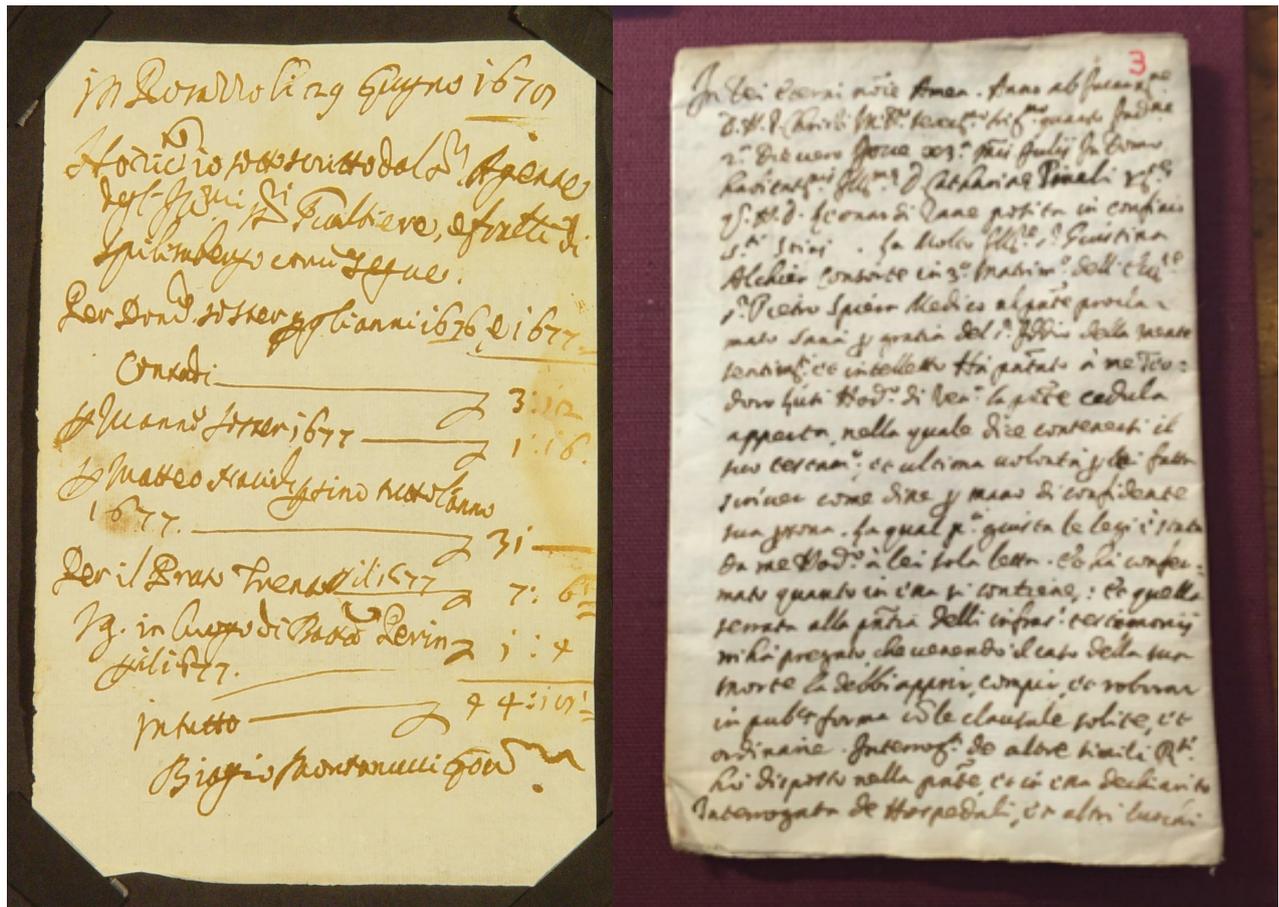


Figura 3.1 – (a) Il Testamento Campione; (b) Il Testamento Alchier-Spiera

Precedentemente alle rivelazioni svolte nei laboratori, è importante ricordare che per tutti i testamenti è stato preso lo spettro derivante dall'analisi XRF, al fine di capire se la composizione dell'inchiostro fosse tale da ottenere buoni risultati nella tomografia.

Per il primo testamento, usato come campione di prova per sondare la fattibilità della tecnica, sono stati acquisiti tre spettri XRF relativi all'inchiostro e uno relativo al supporto cartaceo. Tali spettri, dove sull'asse delle ascisse è graficata l'energia in keV e sulle ordinate il conteggio dei raggi X caratteristici emessi dagli elementi presenti nel punto del campione analizzato, hanno rivelato un inchiostro con quantità elevata di ferro (Fe) e di calcio (Ca) e quindi ottimo, poiché in grado di fornire un buon contrasto con la carta nella ricostruzione tomografica (Figura 3.2).

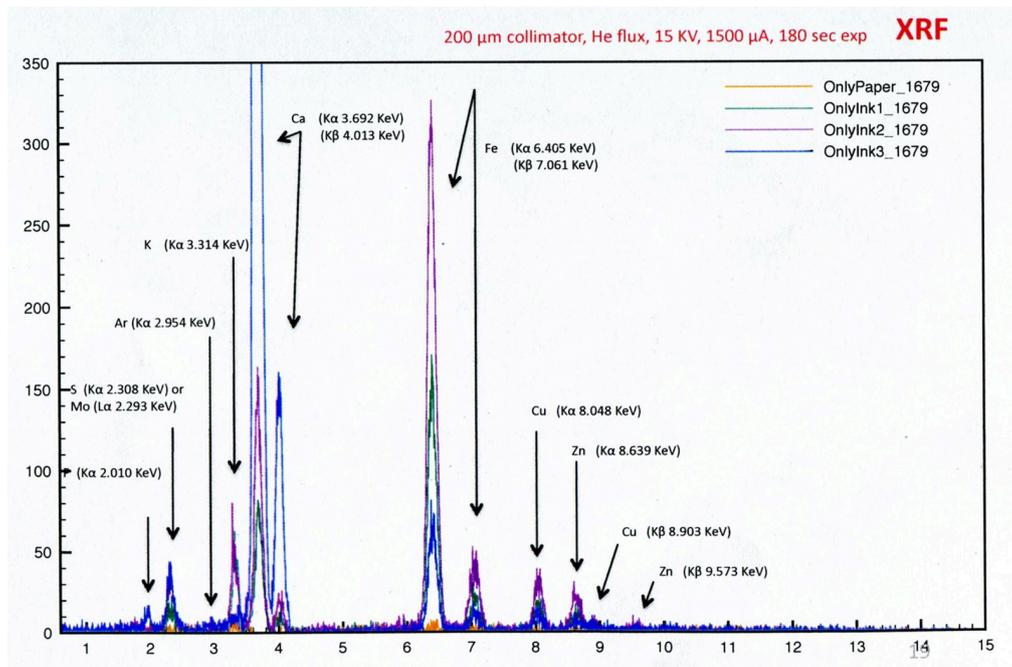


Figura 3.2 – (a) Lo spettro XRF del Testamento campione

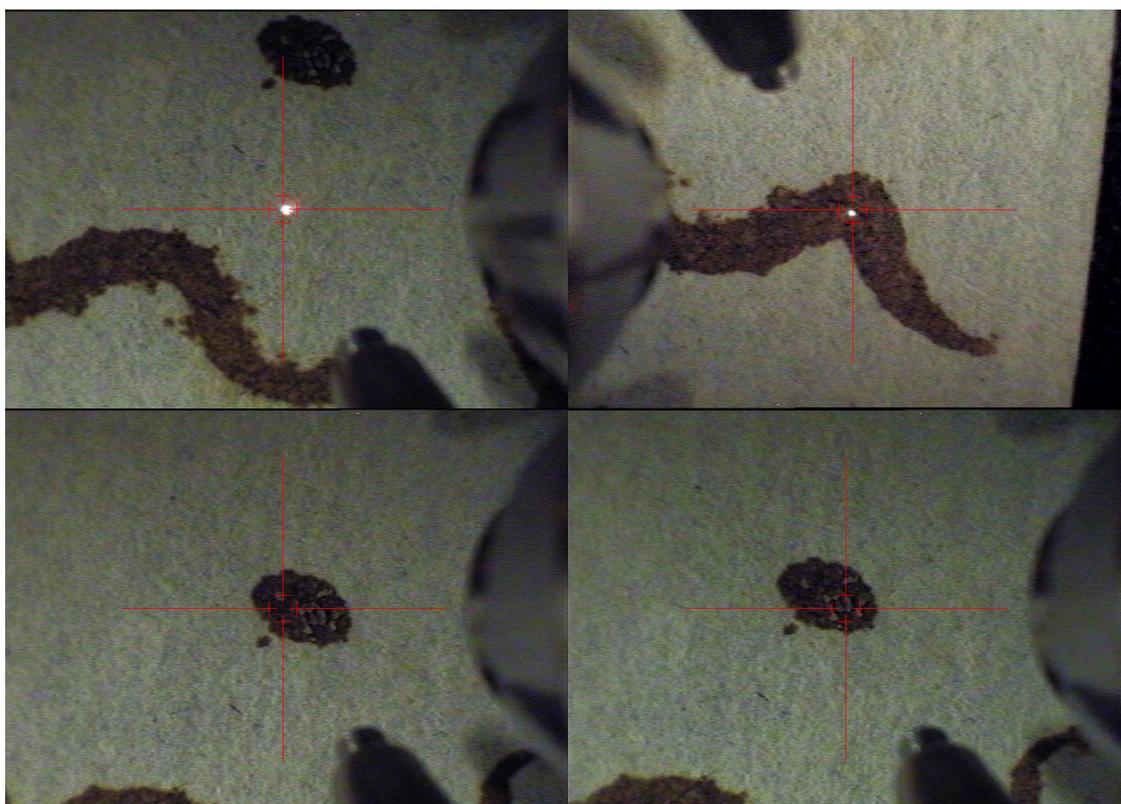


Figura 3.2 – (b) In ordine di lettura i punti del testamento di prova a cui si riferiscono gli spettri XRF in Figura 3.2(a) (rispettivamente indicati come OnlyPaper, OnlyInk1, OnlyInk2, OnlyInk3).

Diversamente dal testamento campione, nel testamento Alchier-Spiera, lo spettro XRF (Figura 3.3) ha mostrato una grande variabilità del contenuto di ferro (Fe) nell'inchiostro analizzato sulla facciata esterna, dovuto molto probabilmente al tipo di scrittura. Quanto visto ha convinto i ricercatori ad effettuare una tomografia anche su questo testamento.

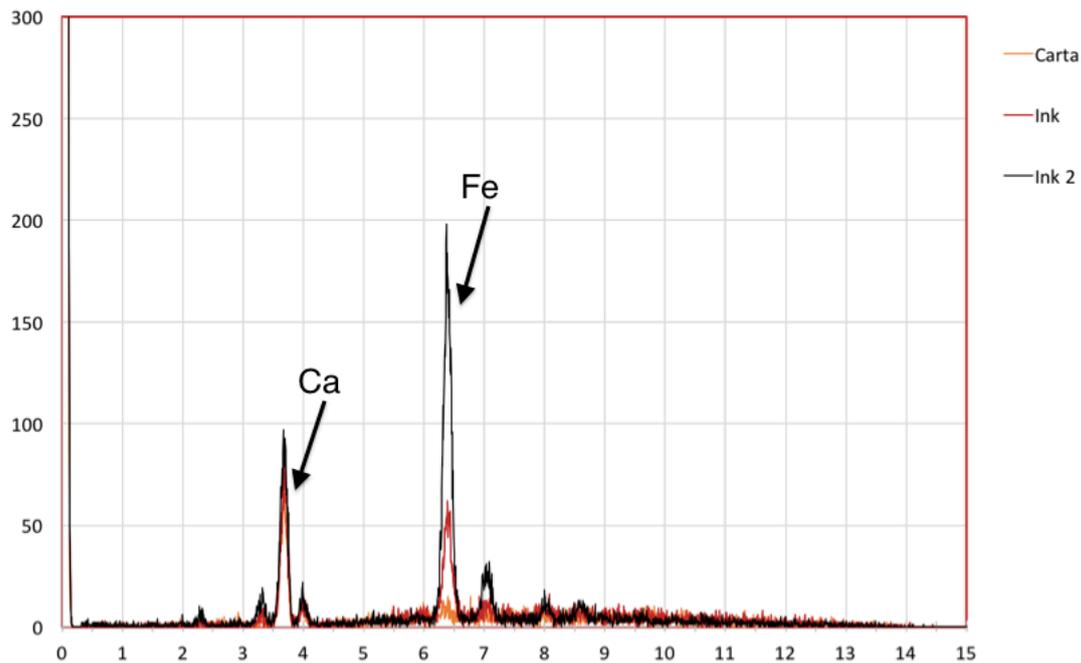


Figura 3.3 – Lo spettro XRF del Testamento Alchier-Spiera

### 3.3 I componenti del sistema tomografico

Allo scopo di ottenere la miglior risoluzione possibile delle immagini in laboratorio si è fatto uso di due differenti sorgenti di raggi X: la prima della ditta Bosello High Technology con macchia focale di dimensioni standard, la seconda dell'azienda Thermo Electron Corporation (TEC) di tipo microfocus.

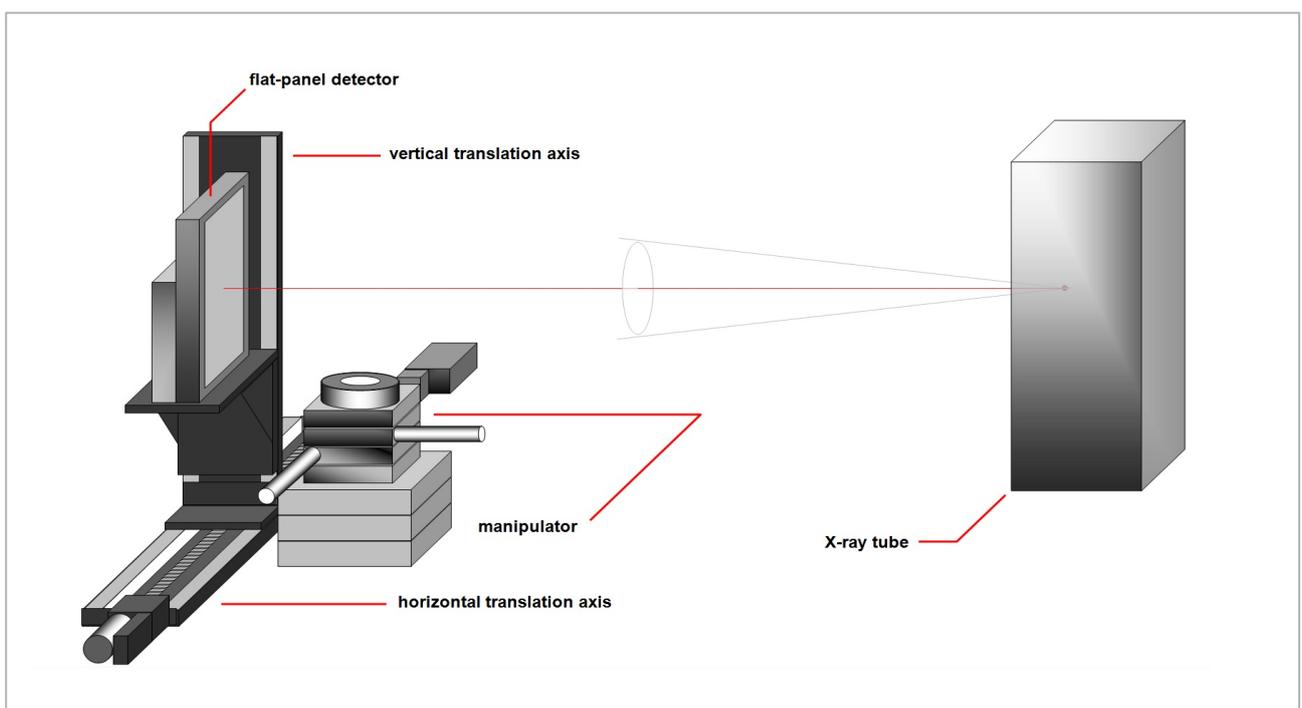
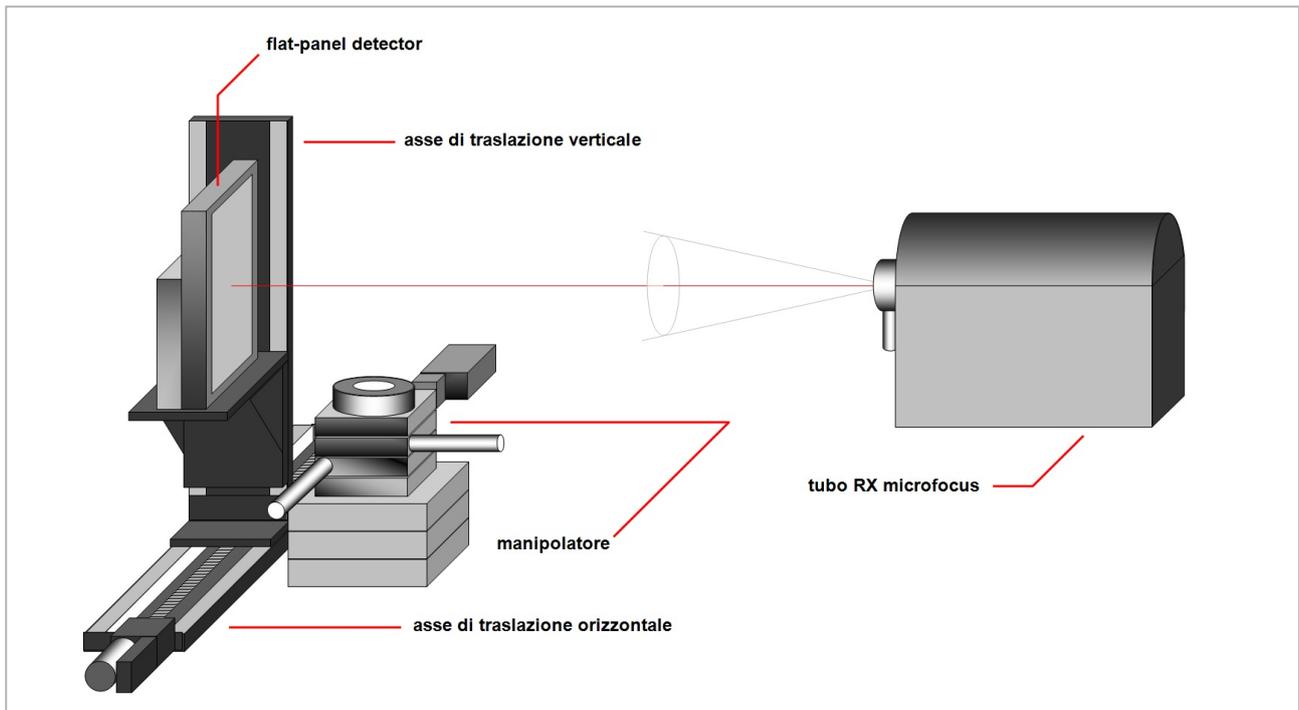


Figura 3.4 – Lo schema del set-up con sorgente Bosello

In *Figura 3.4* è rappresentato il sistema tomografico realizzato con sorgente di raggi X della ditta Bosello il quale fa uso di un collimatore (non presente in figura) del fascio all'uscita dal tubo.

In *Figura 3.5* è rappresentato invece il sistema tomografico realizzato con la sorgente microfoco della TEC.



*Figura 3.5 – Lo schema del set-up con sorgente microfoco TEC*

Per entrambi i sistemi il rivelatore e il sistema di movimentazione sono gli stessi, così come sono gli stessi i software di elaborazione e di rendering 3D delle immagini (*Tabella 3.1*)

<b>Sorgente raggi X</b>	1°) Tubo radiogeno Bosello modello XRG 120 IT 2°) Tubo microfoco TEC modello Kevex PXS10
<b>Collimatore</b>	Modello a doppia tendina mobile realizzato da Cefla s.c.
<b>Rivelatore</b>	Flat Panel: Varian PS2520D
<b>Sistema di movimentazione</b>	Tavola rotativa e assi di traslazione (x,y) Physik Instrumente (PI)
<b>Software di elaborazione</b>	PARREC8 (elaborazioni di preprocessing) ImgREC (ricostruzione con algoritmo FDK)
<b>Software di rendering</b>	VGstudioMAX2.1

*Tabella 3.1 – I componenti di acquisizione e ricostruzione*

### 3.3.1 La sorgente di raggi X

La sorgente di raggi X utilizzata inizialmente, modello XRG120-50IT, è prodotta dalla ditta Bosello High Technology srl (Gallarate) con sistema di raffreddamento a liquido, che include il tubo XRT-160 con spot focale di 0,8 mm, con temperature di esercizio nell'intervallo 10-35 °C. Il mantenimento di temperature relativamente basse permette archi temporali di lavoro prolungati, dell'ordine di diverse ore, anche ai massimi parametri di tensione e corrente (120 kV, 4 mA).



*Figura 3.6 – Il tubo a raggi X della Bosello con collimatore a doppia tendina*

Per la sorgente di raggi X prodotta dalla Bosello è necessario fare uso di un collimatore, nel caso presente un modello a doppia tendina mobile in materiale assorbente (piombo) costruito dalla ditta Cefla (Imola), il quale regola la forma del fascio proveniente dalla sorgente riducendo il fenomeno della radiazione diffusa, aumentando così il contrasto e la definizione e riducendo i fenomeni di blurring delle immagini.

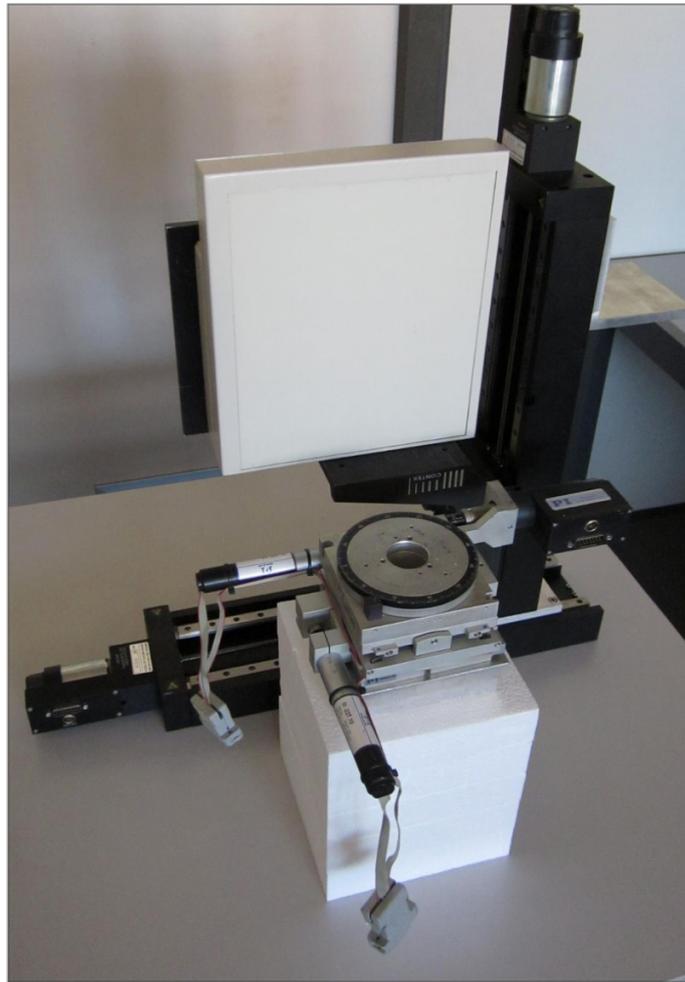
Per i test successivi, ed in particolare per il testamento Alchier-Spiera, si è invece fatto uso di una sorgente a raggi X di tipo microfocus, modello KeveX PXS10, con potenza massima di 65W, prodotta dall'azienda Thermo Electron Corporation (California). Questa sorgente, dotata di un sistema di autoraffreddamento e di uno spot focale che varia da 6 a  $22\mu\text{m}$ , è in grado di lavorare a valori di tensione compresi tra 40kV e 130kV e con una corrente variabile tra  $4\mu\text{A}$  e  $500\mu\text{A}$ . Al contrario del tubo a raggi X della Bosello, questo modello non ha necessità di un collimatore in quanto il fascio uscente è già ben collimato e il fenomeno della radiazione diffusa è molto limitato.



*Figura 3.7 – Il tubo a raggi X microfocus della TEC*

### 3.3.2 Il rivelatore

Il rivelatore utilizzato nel sistema è un flat panel a conversione indiretta prodotto dalla ditta Varian, modello PS2520D, composto da uno strato scintillatore allo ioduro di cesio attivato al tallio (CsI:Tl), con conversione A/D a 14 bit (si ottengono immagini digitali con 16384 livelli di grigio). Il flat panel presenta un'area sensibile di  $1536 \times 1920$  pixel ( $19,5 \times 24,4 \text{ cm}^2$ ) con un'elevata risoluzione spaziale grazie alle contenute dimensioni del pixel, pari a  $127 \mu\text{m}^2$ . Il fotone luminoso creato dalla conversione resta "intrappolato" nel cristallo e viene raccolto e "convertito" in un segnale elettrico da una matrice di fotodiodi in silicio amorfo (a-Si); al termine dell'esposizione, il sensore trasmette il valore di ogni pixel al computer che riproduce l'immagine.



*Figura 3.8 – Il rivelatore Flat Panel*

### **3.3.3 Il sistema di movimentazione**

Il sistema di movimentazione è formato da due assi di traslazione lineare in alluminio nero anodizzato, modello M-413.3PD della ditta Physik Instrumente con corsa massima di 30 cm, in cui l'asse orizzontale fa da supporto e guida all'asse verticale sul quale è montato il flat panel da noi usato. Questo permette di allargare la massima superficie di indagine da  $19,5 \times 24,4 \text{ cm}^2$  fino a circa  $50 \times 55 \text{ cm}^2$ . Inoltre il sistema di movimentazione è composto da due assi tip/tilt M-044.D01 fissati alla tavola rotativa M-038.DG e controllati via software per la collocazione dei campioni ed il loro corretto allineamento con il rivelatore.



Figura 3.9 – Uno dei due assi di traslazione

### 3.3.4 I parametri di acquisizione

Nel seguente paragrafo sono riportati i parametri di acquisizione utilizzati sia per la tomografia del documento di prova con sorgente Bosello o TEC sia per il testamento di maggiore importanza a cui è stata applicata solo la sorgente microfocus.

In particolare nella *Tabella 3.2* sono riportati i parametri utilizzati per il documento campione con sorgente Bosello, nella *Tabella 3.3* i parametri per il documento campione con sorgente microfocus e nella *Tabella 3.4* i parametri per il testamento:

<b>Tensione</b>	V <sub>max</sub> =40kV	<b>Tensione</b>	V <sub>max</sub> =40kV	<b>Tensione</b>	V <sub>max</sub> =40kV
<b>Corrente</b>	I <sub>max</sub> = 7 mA	<b>Corrente</b>	I <sub>max</sub> = 85μA	<b>Corrente</b>	I <sub>max</sub> =250μA
<b>Filtrazione</b>	No	<b>Filtrazione</b>	No	<b>Filtrazione</b>	No
<b>Frame rate</b>	1 fps	<b>Frame rate</b>	1 fps	<b>Frame rate</b>	1 fps
<b>Frame AVG</b>	4	<b>Frame AVG</b>	4	<b>Frame AVG</b>	1
<b>Angle</b>	-360°	<b>Angle</b>	-360°	<b>Angle</b>	-360°
<b>Proiezioni</b>	900	<b>Proiezioni</b>	900	<b>Proiezioni</b>	900
<b>Pixel size</b>	0.127 mm	<b>Pixel size</b>	0.127 mm	<b>Pixel size</b>	0.127 mm
<b>sdd</b>	1474 mm	<b>sdd</b>	363 mm	<b>sdd</b>	672 mm
<b>sod</b>	1291 mm	<b>sod</b>	182 mm	<b>sod</b>	467 mm

Tabella 3.2

Tabella 3.3

Tabella 3.4

Conoscendo la geometria del set-up e le distanze sorgente-oggetto (SOD) e sorgente-rivelatore (SDD), si possono ricavare due informazioni essenziali per la risoluzione dell'immagine, ovvero la magnificazione e le dimensioni effettive del voxel, il quale indica effettivamente la dimensione del minimo dettaglio rappresentato nella ricostruzione.

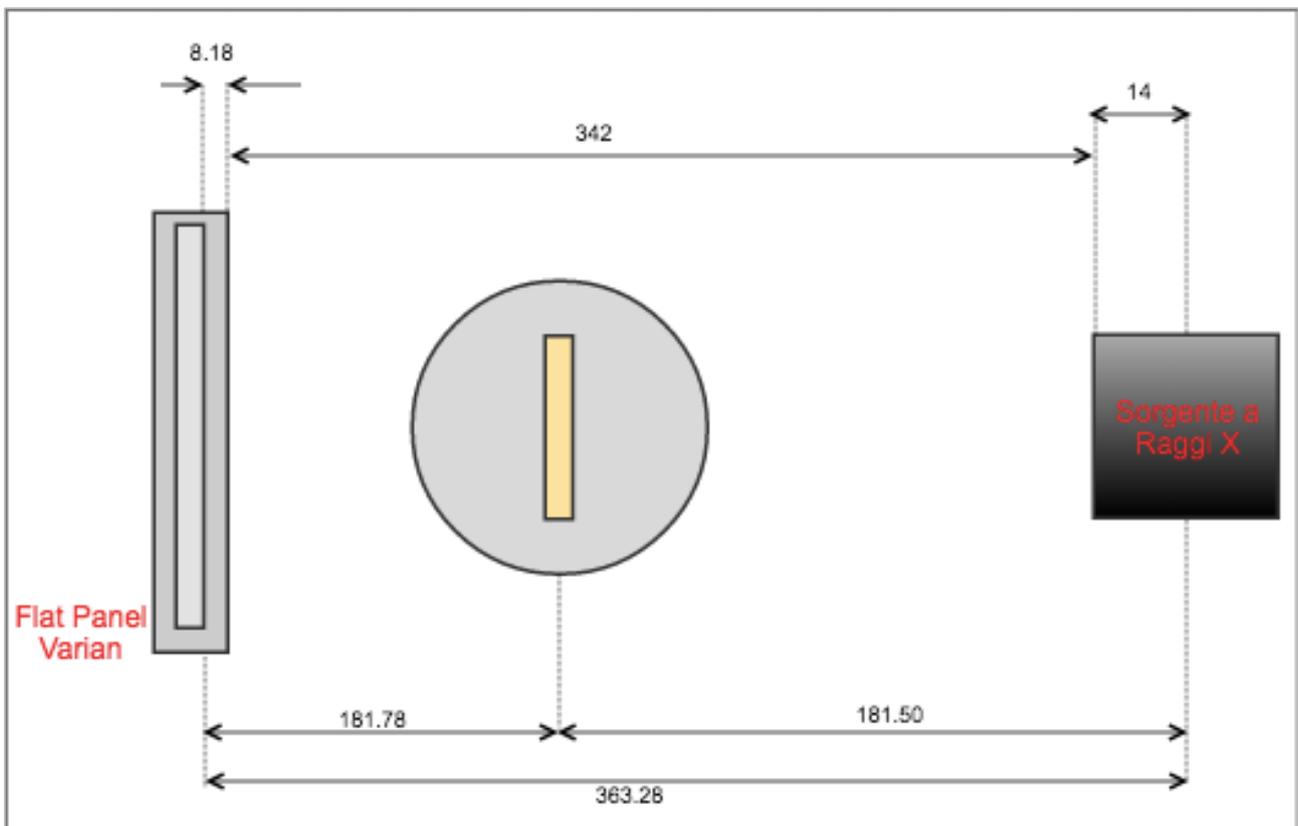
Si possono ricavare le due informazioni attraverso le formule:

$$M = \frac{sdd}{sod} ; \quad voxel_{size} = \frac{pixel_{size}}{M}$$

Per quanto riguarda le nostre acquisizioni, si trovano i seguenti valori per i parametri sopra indicati:

Dalla <i>Tabella 3.2</i> :	$M = 1,142 \pm 0,003$	$voxel_{size} = 111 \pm 1 \mu m$
Dalla <i>Tabella 3.3</i> :	$M = 2,00 \pm 0,03$	$voxel_{size} = 63 \pm 2 \mu m$
Dalla <i>Tabella 3.4</i> :	$M = 1,44 \pm 0,01$	$voxel_{size} = 88 \pm 2 \mu m$

Volendo rappresentare schematicamente le distanze tra la sorgente, l'oggetto ed il rivelatore, si può fare riferimento alla *Figura 3.10* che rappresenta il setup utilizzato per il campione con sorgente di tipo microfocus.



*Figura 3.10 - Il set-up del sistema con sorgente microfocus per il campione di prova*

### 3.3.5 I software di elaborazione e rendering 3D

Per l'elaborazione delle immagini sono stati usati due software complementari fra loro: per le elaborazioni di preprocessing si è utilizzato PARREC, sviluppato presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna mentre per la ricostruzione con algoritmo Feldkamp, ImgRec, programma sviluppato dal Lawrence Livermore National Laboratory,

Sia per il campione di prova che per il testamento chiuso si è seguito sempre lo stesso procedimento, iniziando con l'acquisire la sequenza di radiografie e sottoponendole successivamente alle varie fasi del processo di ricostruzione tomografica.

Inizialmente, a partire dalla sequenza di radiografie, si esegue la loro normalizzazione la quale porta alla generazione delle cosiddette *Atenrad* ( $\ln \left[ \frac{I(x,y)-D(x,y)}{I_0(x,y)-D(x,y)} \right]$ )

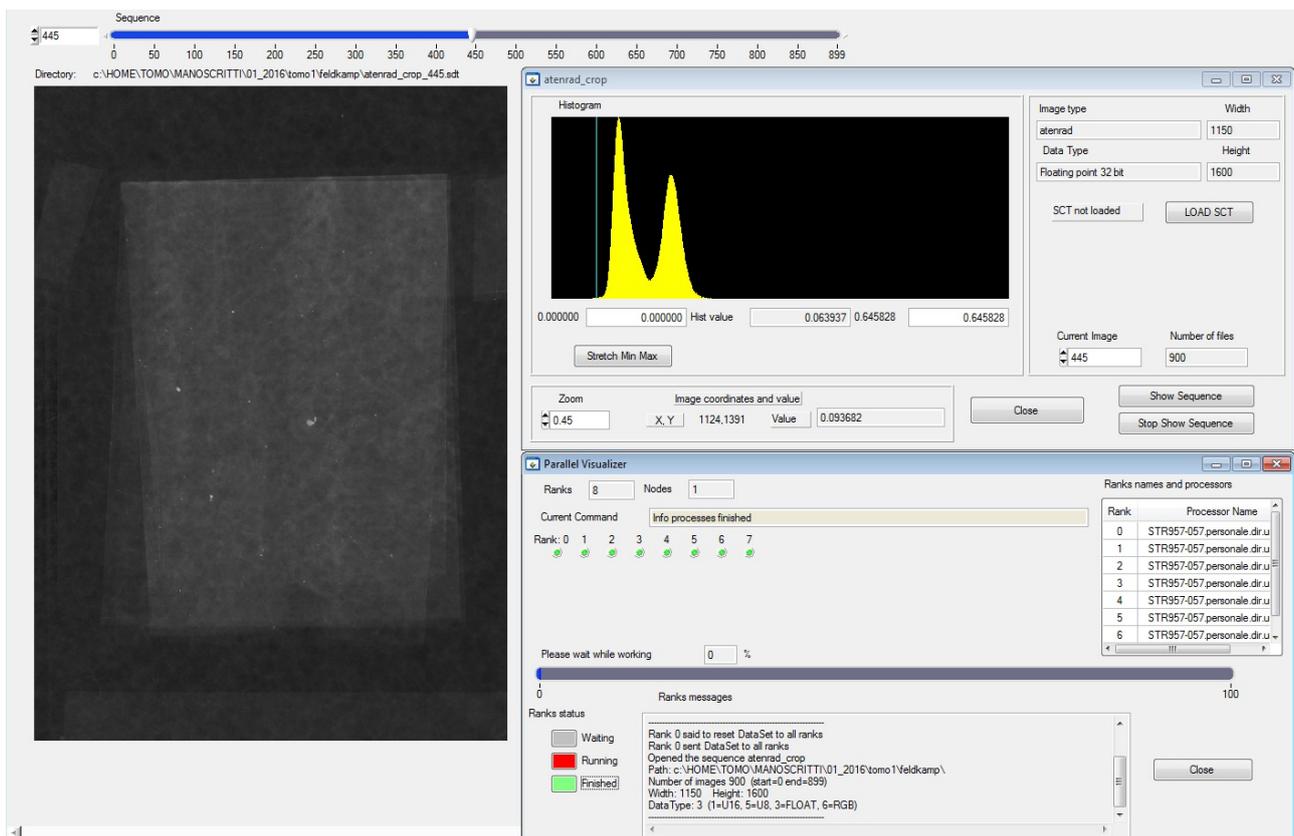


Figura 3.11 – Immagine di tipo “Atenrad” del testamento campione, ottenuta dopo l’operazione di Crop

A causa delle ridotte dimensioni dei manoscritti analizzati, per tutti i rilevamenti ciascuna immagine della sequenza è stata tagliata attraverso il comando di *Crop* in modo da eliminare le parti in eccesso delle immagini, in cui non è presente nessuna informazione; in questo modo si ottengono anche dei vantaggi, in quanto, riducendo le dimensioni dell’immagine, si accorciano i tempi di lavoro per le elaborazioni.

La fase successiva di preprocessing consiste nella generazione dei *Sinos* o sinogrammi (immagini di righe rappresentanti le proiezioni dell'oggetto sui 900 angoli). Il sinogramma corrispondente alla slice centrale del campione viene utilizzato per trovare l'asse di rotazione necessario alla ricostruzione.

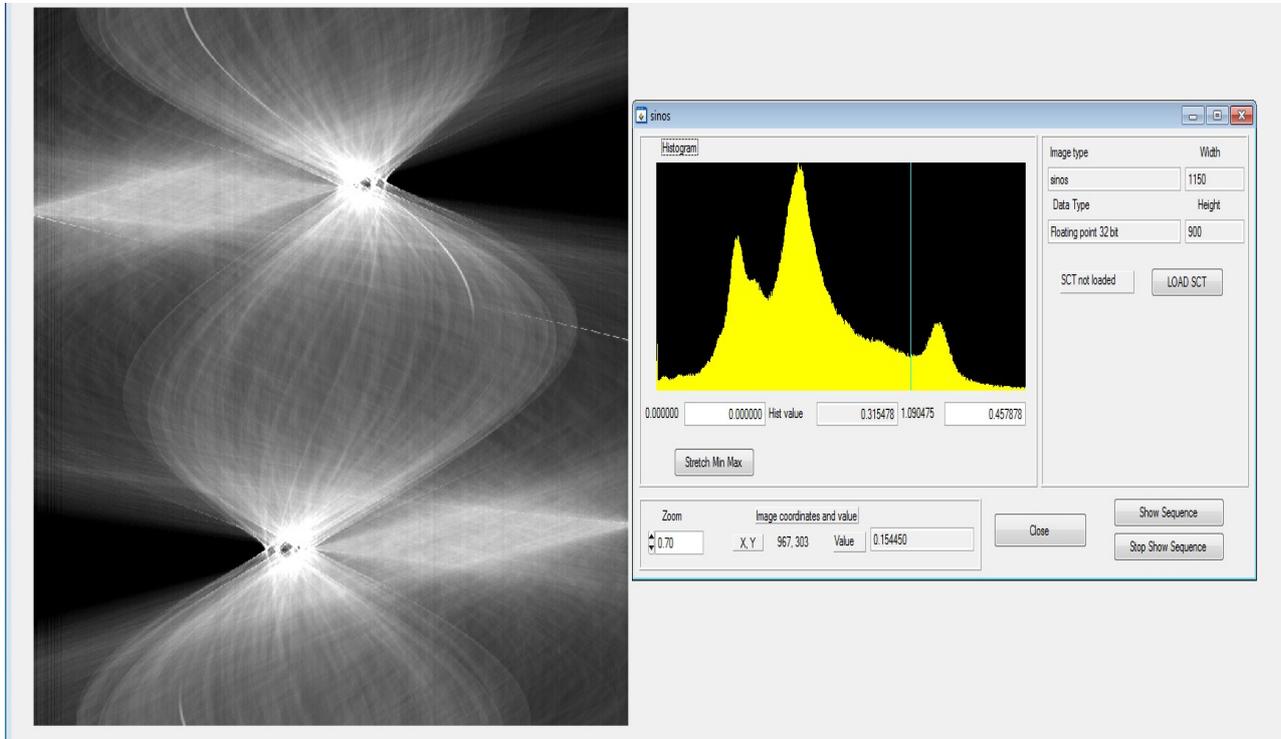


Figura 3.12 – Il sinogramma del testamento campione prima della rimozione dei ring

Non è sempre necessario che vengano applicati, ma nel nostro caso di studio abbiamo applicato anche dei filtri per rimuovere i *Ring artifact* (righe verticali nel sinogramma), dovuti a pixel che rispondono quasi indipendentemente dal segnale che ricevono.

Completati tutti i passaggi precedenti si è passati alla ricostruzione tomografica finale attraverso il software *ImgRec*, dalla quale si è ottenuta l'immagine CT ricostruita.

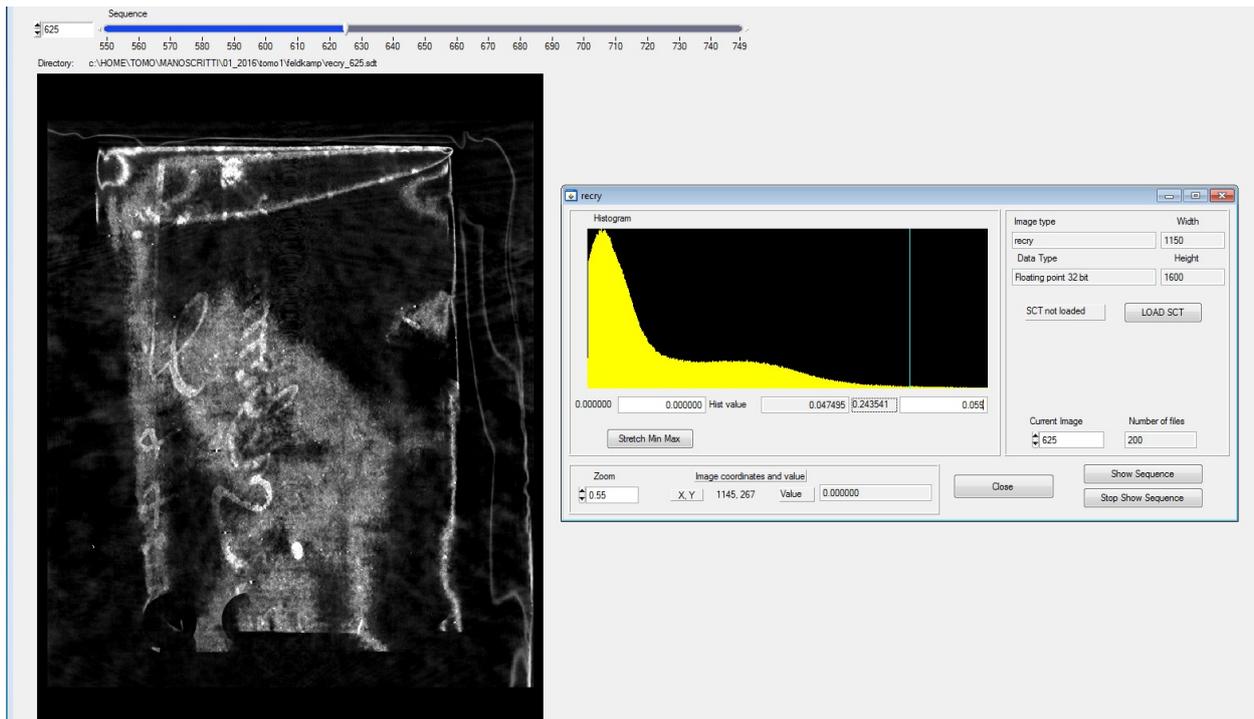


Figura 3.13 – La ricostruzione finale (recry) del testamento campione

Per la creazione di modelli 3D a partire da una sequenza di slice planari si è fatto uso del software di rendering 3D VGstudioMAX 2.1.

Il software ha permesso di operare contemporaneamente sia con l'oggetto ricostruito tridimensionalmente sia con le varie proiezioni sagittali, trasversali e coronali, creando, attraverso il comando *Region of Interest*, delle nuove regioni tridimensionali utili alla separazione delle pagine interne.

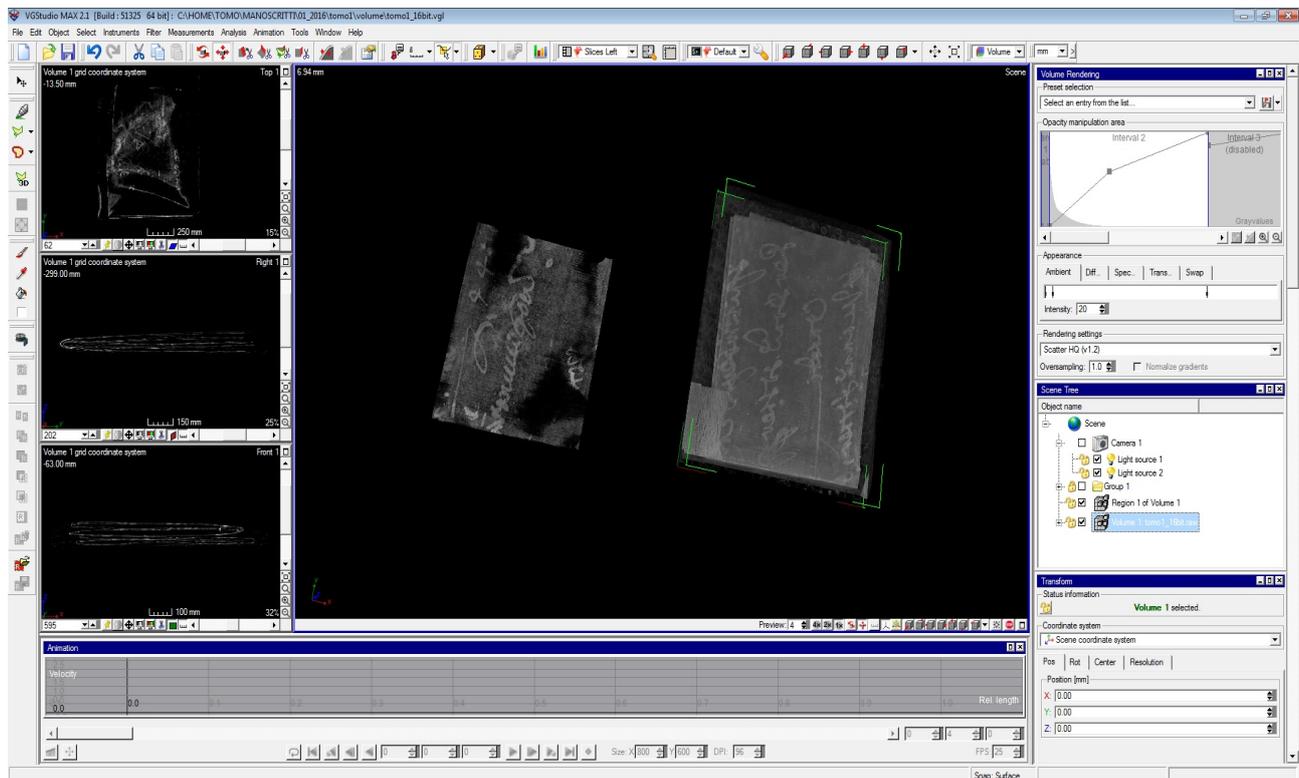


Figura 3.14 – Il campione ricostruito e una sua regione di interesse

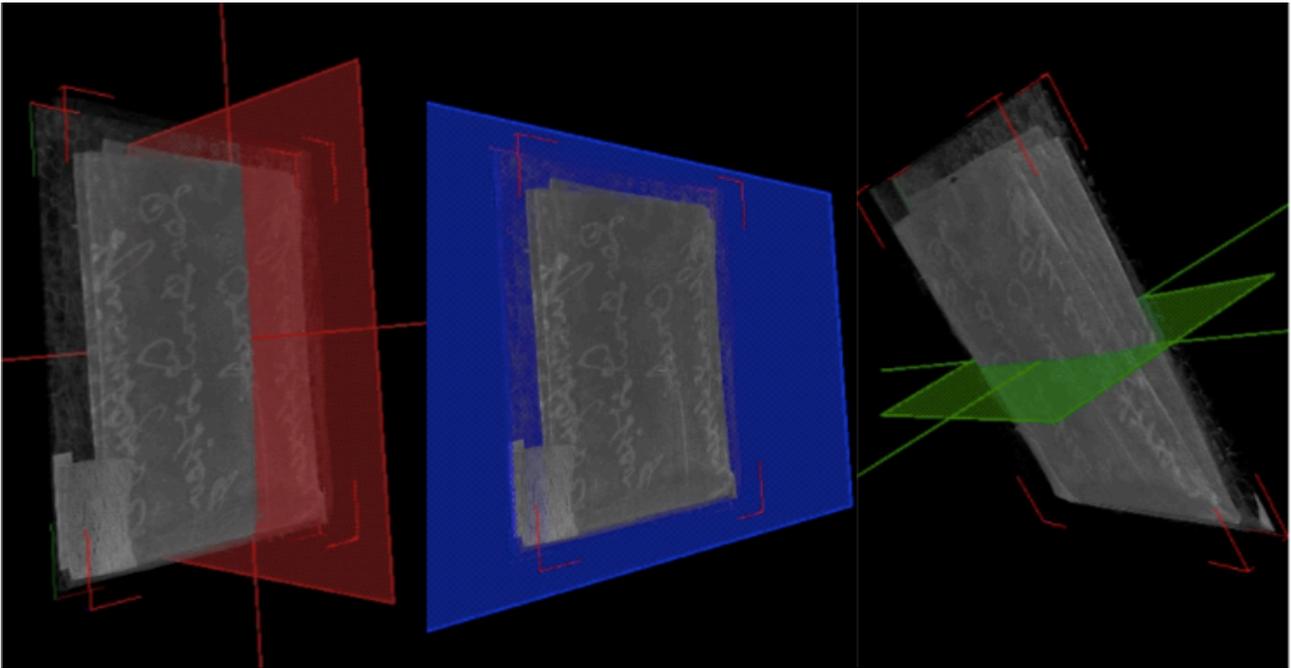


Figura 3.15 – Le sezioni sagittali, coronali e assiali del testamento campione

Inoltre, agendo sulla ricostruzione 3D si è fatto uso del comando *Aligned Clipping Box* per poter osservare, quando possibile, le slice interne dell'oggetto in analisi avendo virtualmente eliminato delle intere sezioni del campione. Le operazioni precedenti sono state praticate avendo eliminato componenti inconsistenti (l'aria) e avendo separato l'inchiostro dalla carta agendo sull'istogramma. È giusto ricordare che per entrambi i campioni si è fatto uso principalmente di due tipi di algoritmi di rendering 3D: lo Scatter HQ (v. 1.2) e lo Scatter Gradient (v. 1.2).

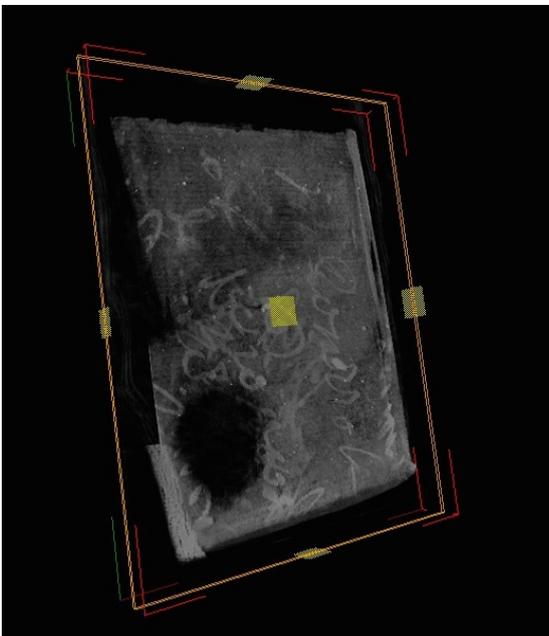


Figura 3.16 – La sezione formata con il comando di *Aligned Clipping Box*

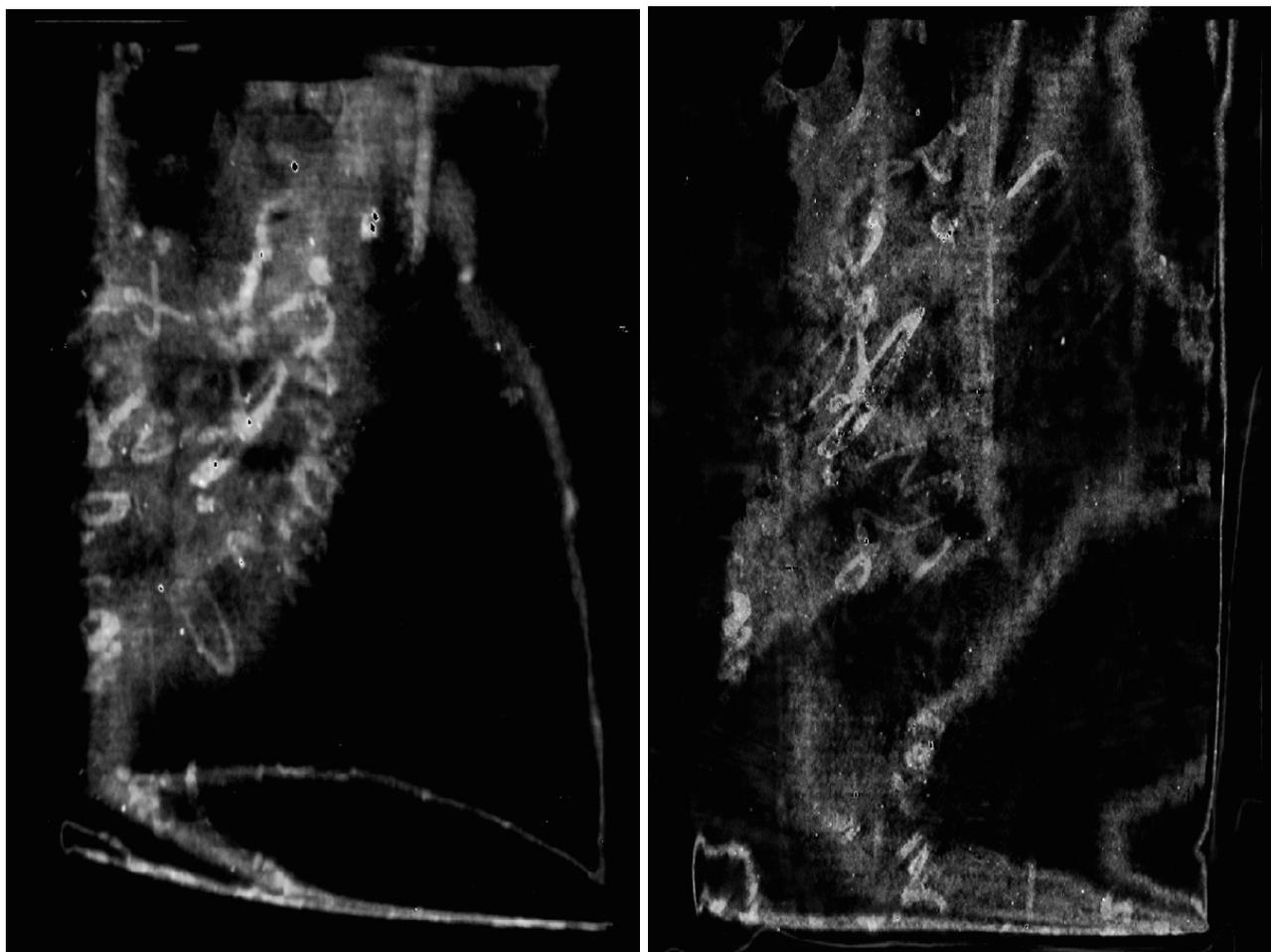
# Capitolo 4

## L'analisi dei dati

### 4.1 Il Testamento campione

#### 4.1.1 Le sorgenti di raggi X a confronto

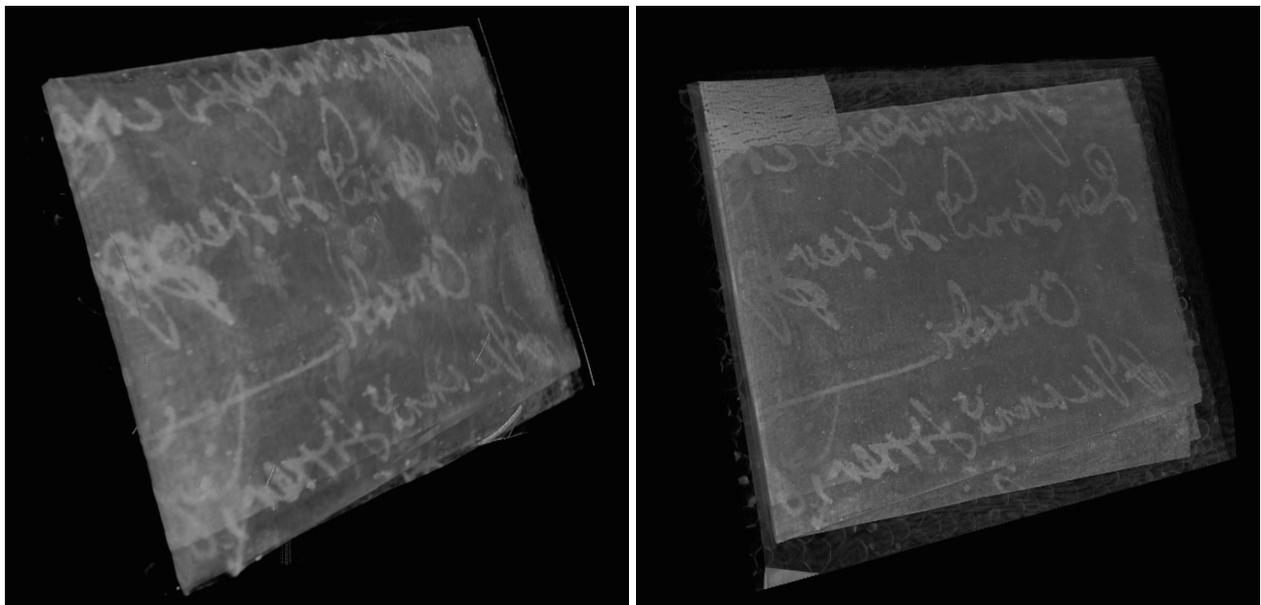
Prima di passare alle osservazioni, si ricorda che il testamento in analisi, usato come campione di prova, è stato ripiegato numerose volte al fine di simulare una ricostruzione su un manoscritto chiuso con facciate interne impossibili da leggere esternamente e quindi non digitalizzabili con semplici scanner. Mediante il software di rendering 3D VGstudioMAX 2.1, si sono messe a confronto le ricostruzioni del documento campione ottenute con le due diverse sorgenti di raggi X, Kevex e XRG120 (Bosello).



*Figura 4.1 – (a) Slice tomografica ottenuta con sorgente Bosello. (b) Slice tomografica ottenuta con sorgente microfocus*

In *Figura 4.1* è stata presa la stessa slice interna alla profondità di circa 5mm dalla facciata esterna del campione ricostruito ed è evidente anche ad occhio nudo come la slice della ricostruzione con sorgente di tipo microfocuss abbia una migliore risoluzione spaziale rispetto a quella con sorgente Bosello, la quale, a causa dell'effetto penombra dovuto alla macchia focale di dimensioni maggiori, presenta una evidente sfocatura e una minore definizione delle parole e lettere del testo scritto sul documento, nonostante la magnificazione sia inferiore.

Anche nel rendering 3D del testamento campione (*Figura 4.2*) i risultati che si osservano, come atteso, non sono diversi da quelli già evidenziati sulla singola slice: nella ricostruzione ottenuta con la sorgente Bosello le scritte risultano più sfuocate e difficili da leggere rispetto alla ricostruzione con sorgente microfocuss.



*Figura 4.2 – (a) Rendering 3D del testamento campione ottenuto dalla tomografia con sorgente Bosello.  
(b) Rendering 3D del testamento campione ottenuto dalla tomografia con sorgente microfocuss*

## 4.1.2 Ulteriori risultati dell'elaborazione

I dati della tomografia del testamento campione ottenuti con la sorgente Kevex PXS10 sono stati elaborati più nel dettaglio, passando all'analisi di ogni singola facciata del documento, grazie all'uso in VGstudioMax 2.1 dei comandi *Aligned Clipping Box* e *Region of Interest*. Lo scopo è quello di riuscire a separare le diverse pagine del documento, ripiegato in modo da simulare un testamento chiuso, al fine di leggere il testo scritto nelle facciate interne. Come si vede dal confronto con l'immagine nel visibile, riportata in *Figura 4.3*, le scritte sul testamento sono state in parte ricostruite fedelmente, in parte sono risultate sfuocate a causa di un leggero spostamento durante la rivelazione.

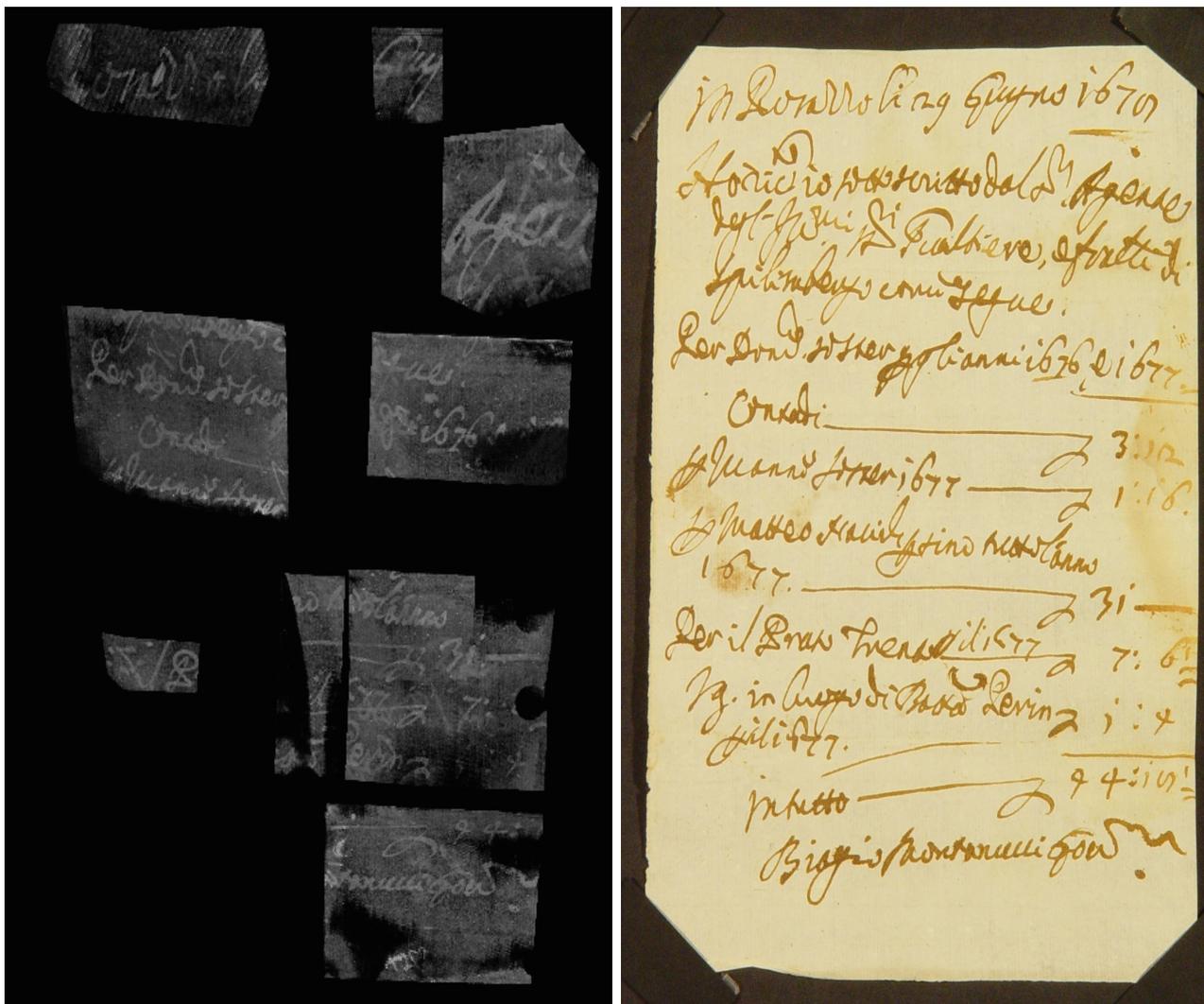


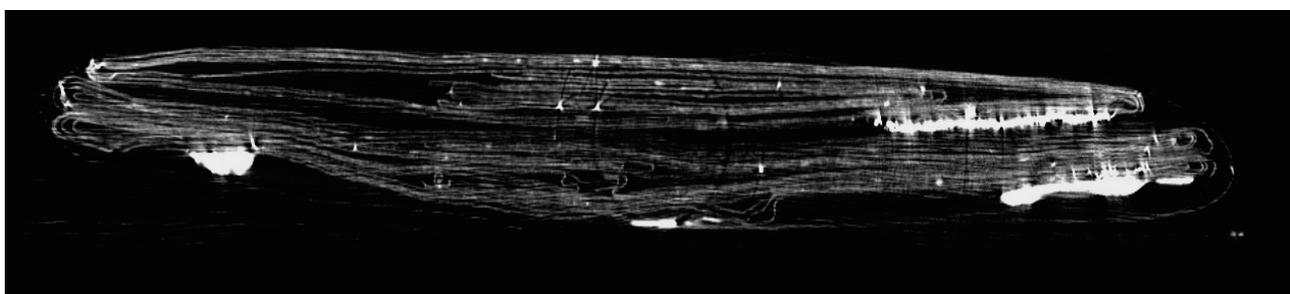
Figura 4.3 - Confronto tra l'immagine nel visibile del testamento campione e alcune parti con scritte leggibili ottenute elaborando con VGstudioMax 2.1 la ricostruzione tomografica del documento

Grazie all'elaborazione dei dati tomografici è stato possibile leggere numerose parole e numerosi numeri corrispondenti al testamento originale. Questo risultato rappresenta un buon punto di partenza per l'analisi del testamento Alchier-Spiera, il quale è scritto all'incirca con lo stesso tipo di inchiostro, ma, a differenza del primo sottoposto ad esame, non può essere letto integralmente essendo ancora sigillato.

## 4.2 Il Testamento Alchier-Spiera

Le rilevazioni sul testamento Alchier-Spiera sono state effettuate usando la sorgente microfocus Kevex PXS10 e, analogamente a quanto fatto con il testamento campione, si è passati all'analisi delle slice e alla loro ricostruzione tridimensionale al fine di leggere numeri e parole all'interno del testamento, senza che quest'ultimo venisse aperto.

Dalle operazioni di ritaglio delle varie sezioni sono emerse alla luce numerosissime informazioni sul testamento, il quale sembrerebbe essere composto da due "parti", separate l'una dall'altra (*Figura 4.4*), a causa di un evidentissimo sigillo interno (*Figura 4.5*) che difficilmente sarebbe stato posto in mezzo all'elaborato.



*Figura 4.4 - Visione assiale dei doppi documenti del testamento Alchier-Spiera*



*Figura 4.5 - Vista coronale del sigillo interno*

Il sigillo interno si trova a circa 5 mm dalla parte frontale del testamento e a circa 6 mm dal suo retro, dove si vedono con grande facilità ben 5 sigilli (*Figura 4.6*), i quali risultano visibili anche nella regione inferiore della *Figura 4.4*.



*Figura 4.6 – I sigilli esterni nella parte posteriore del testamento*

Proseguendo, grazie all'uso del comando *Aligned Clipping Box* si sono trovate altre informazioni riguardo al testamento ed al suo contenuto; la più interessante sicuramente riguarda la presenza di due foglietti ripiegati internamente a circa 3 mm dalla parte anteriore della ricostruzione, la cui presenza risulta del tutto inaspettata e dai quali però risulta impossibile estrarre parole o numeri.

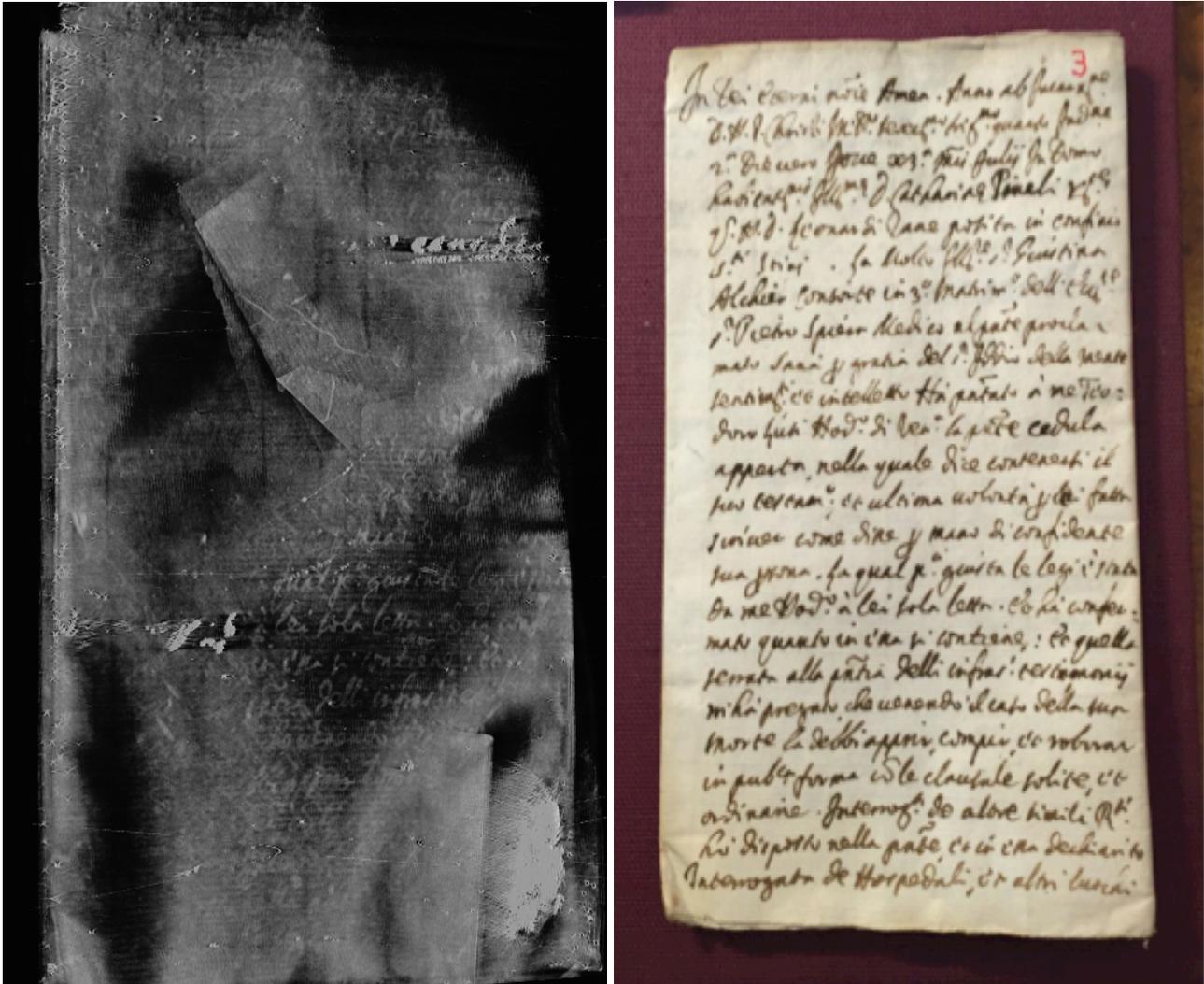
Nella *Figura 4.7* si vede, nella parte superiore dalla sezione coronale, la presenza di un foglietto, mentre nella regione inferiore, seppure meno definito, è visibile il secondo dei due.



*Figura 4.7 – I foglietti interni del testamento*

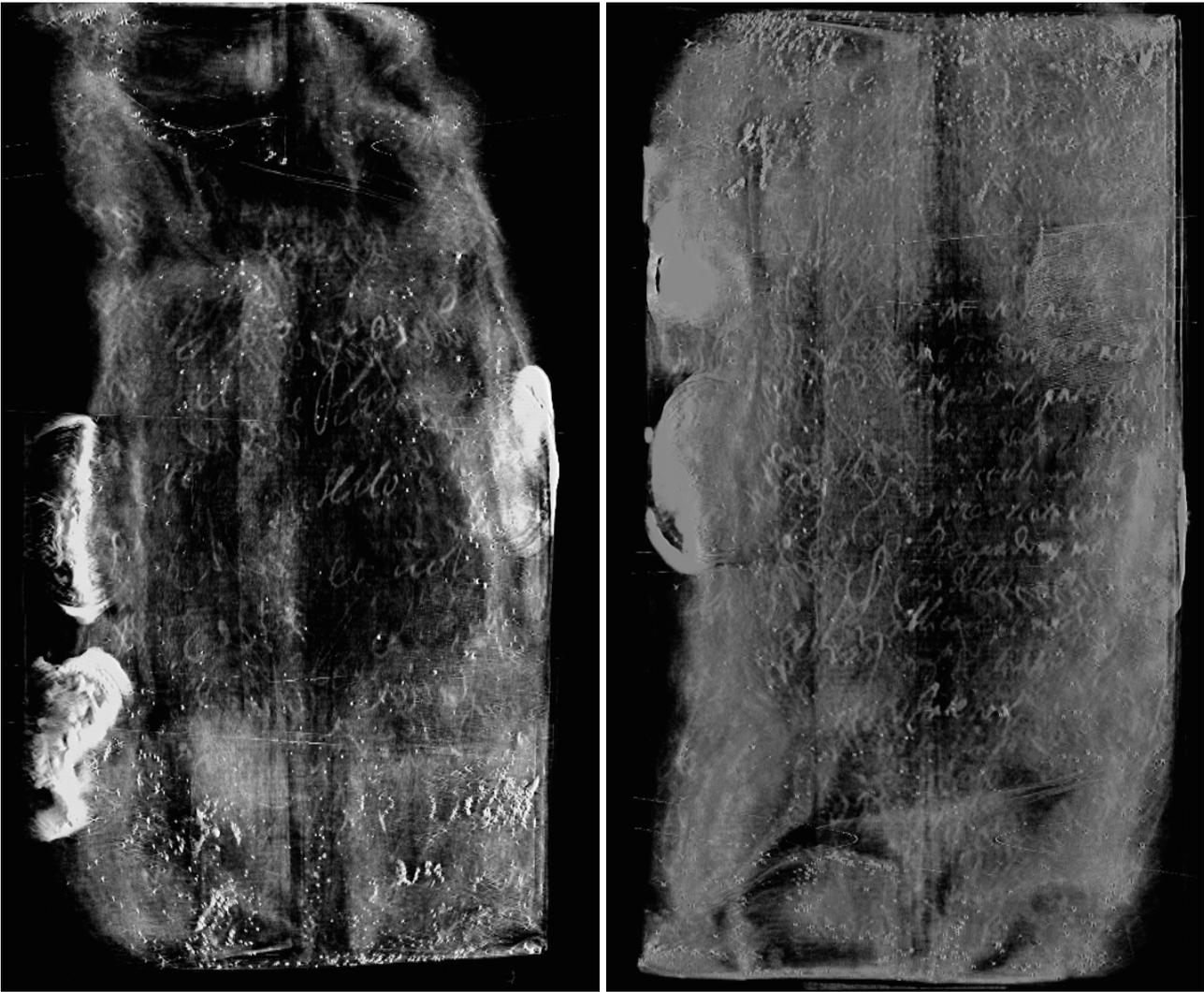
Le altre informazioni interessanti ricavate dal lavoro svolto nella rielaborazione del testamento riguardano le parole interne trovate; in particolare sono tre le sezioni di maggiore interesse, una delle quali può essere confrontata con l'immagine esterna del testamento.

In questa sezione (*Figura 4.8*) è possibile leggere numerose parole, come, ad esempio, “la quale” o “lei solo letto” che corrispondono perfettamente alla parte esterna.



*Figura 4.8 – Il confronto tra la slice e la vista esterna del testamento*

Nella *Figura 4.9* sono mostrate le altre due sezioni di interesse che si trovano rispettivamente a 4 e 5mm di profondità rispetto al retro del testamento.



*Figura 4.9 – (a) Sezione alla profondità di 4mm dalla parte posteriore del testamento;  
(b) Sezione a 5mm di profondità dalla parte posteriore del testamento*

Nella sezione a 4mm di profondità (*Figura 4.9(a)*) sono ben visibili diverse lettere; inoltre sembrerebbe leggersi la parola “sento”, ma la traduzione di tutte le scritte non è il principale interesse del presente lavoro di tesi, poiché il fatto di essere riusciti a separare alcune pagine del documento rappresenta già un buon risultato per la ricerca in quanto permette un piccolo passo in avanti nel lungo percorso intrapreso.

Nella sezione a 5mm dal retro (*Figura 4.9(b)*) invece le parole sono di più difficile interpretazione e sembrerebbero essere scritte nel senso orizzontale della pagina e talvolta anche nel verso diagonale, comportando difficoltà nella comprensione e nella separazione delle parole o delle intere frasi.

# Conclusioni

Lo scopo della tesi, ma anche del progetto di ricerca *Venice Time Machine* in cui si inserisce questo lavoro, è quello di trovare un metodo innovativo e non invasivo per la separazione virtuale delle pagine di un manoscritto antico non accessibili dall'esterno, in modo da renderne possibile la lettura. Nell'ambito del suddetto progetto, molti testamenti e manoscritti dell'Archivio di Stato di Venezia sono stati sottoposti ad un'analisi XRF per poter capire gli elementi chimici presenti nell'inchiostro e le loro quantità, così da selezionare i testi scritti con inchiostro ferrogallico e quindi con maggior possibilità di successo per quanto riguarda la successiva indagine tomografica. Le analisi effettuate hanno evidenziato, come d'altra parte atteso, difficoltà nella separazione e lettura di pagine molto vicine fra loro, anche perché capita frequentemente che con il passare degli anni l'inchiostro vada ad intaccare pagine adiacenti, rendendo ardua la lettura virtuale e la comprensione delle scritte.

I risultati dell'analisi tomografica possono essere considerati ugualmente soddisfacenti poiché, ad esempio con il testamento Alchier-Spiera, si sono ottenute informazioni prima inaccessibili, come l'esistenza di un doppio documento evidenziato dalla presenza di un timbro interno o la presenza di piccoli foglietti, oltre alla lettura di alcune parole interne grazie proprio alla separazione virtuale delle pagine.

Questi primi risultati sono molto incoraggianti per il proseguimento del progetto *Venice Time Machine*, che mira ad arrivare alla digitalizzazione anche di quei documenti che non è possibile aprire e per i quali, quindi, non è applicabile la semplice scannerizzazione con uno strumento standard. Il progetto, che già ha percorso grandi passi avanti, deve comunque superare ancora diversi ostacoli, legati soprattutto alla difficoltà di ottenere una separazione ottimale delle pagine, per riuscire a raggiungere il proprio obiettivo.

# Bibliografia

- [1] *"X-ray and neutron digital radiography and computed tomography for cultural heritage"*; Prof. Franco Casali, Department of Physics University of Bologna (Italy)
- [2] *"Quantum Physics of atoms, molecules, solids, nuclei and particles"*; Eisberg R. & Resnick R., seconda edizione, 1985, John Wiley & Sons Inc., New York
- [3] *"Principles of Computerized Tomographic Imaging"*; Avinash C. Kak & Malcolm Slaney, SIAM, New York, IEEE Press, 1988
- [4] *"Ancient administrative handwritten documents: X-ray analysis and imaging"*; Dott.ssa Fauzia Albertin, Faculté des Sciences de Base, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland
- [5] *"X-ray spectrometry and imaging for ancient administrative handwritten documents"*; Dott.ssa Fauzia Albertin, Faculté des Sciences de Base, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland