

Tomografia Computerizzata con raggi X per i Beni Culturali

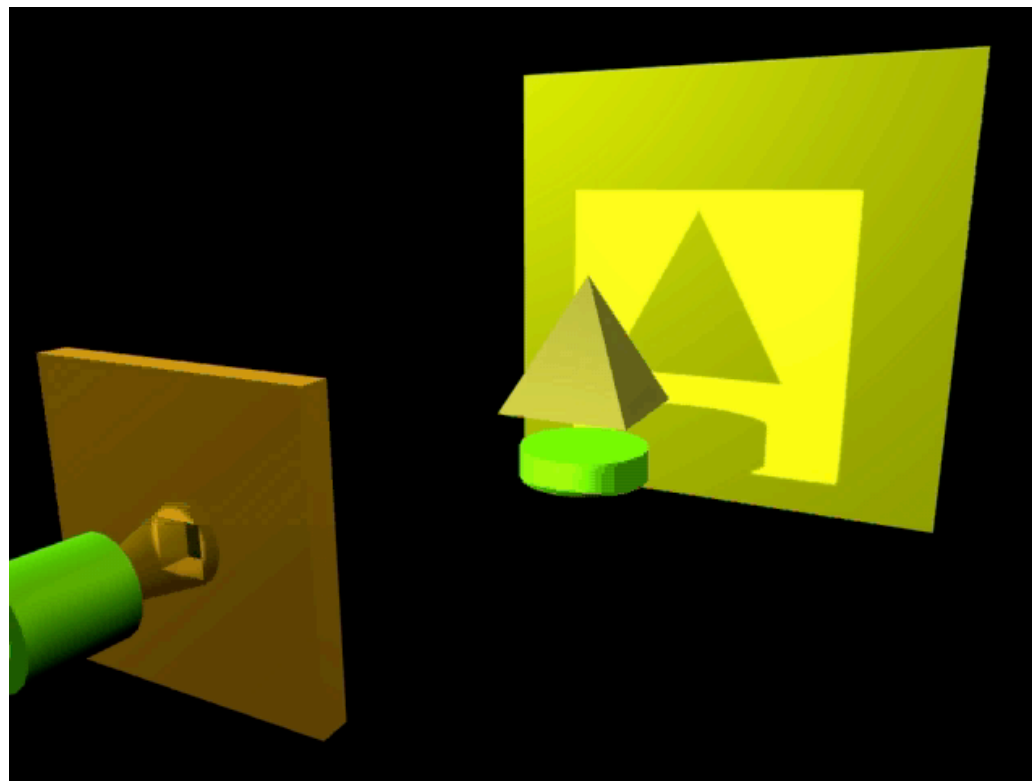
MARIA PIA MORIGI



Torino - 26 novembre 2009

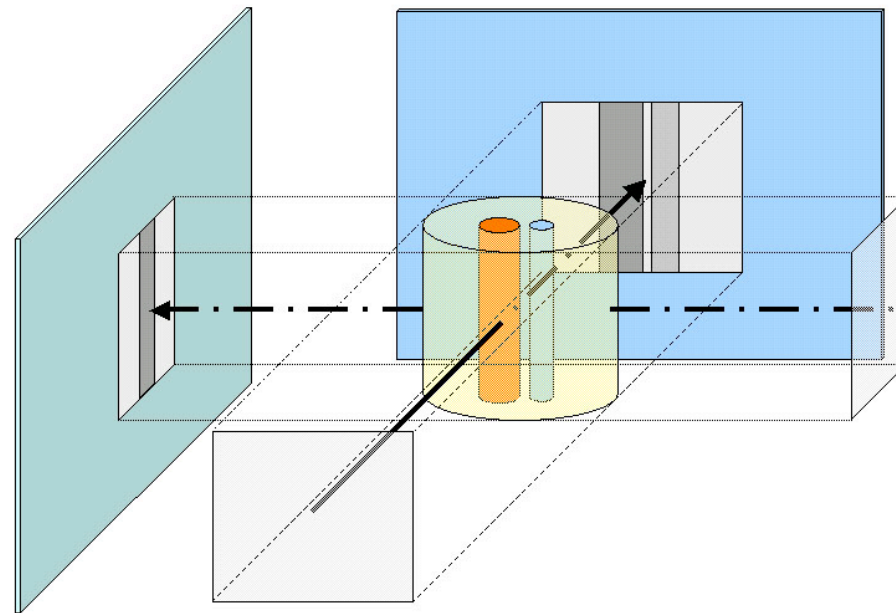
Tomografia Computerizzata con raggi X

- ❑ Tecnica diagnostica non distruttiva, in grado di visualizzare la struttura interna degli oggetti investigati.
- ❑ Produce immagini di sezioni trasversali dell'oggetto analizzato (le cosiddette slice) ed elaborazioni 3D.



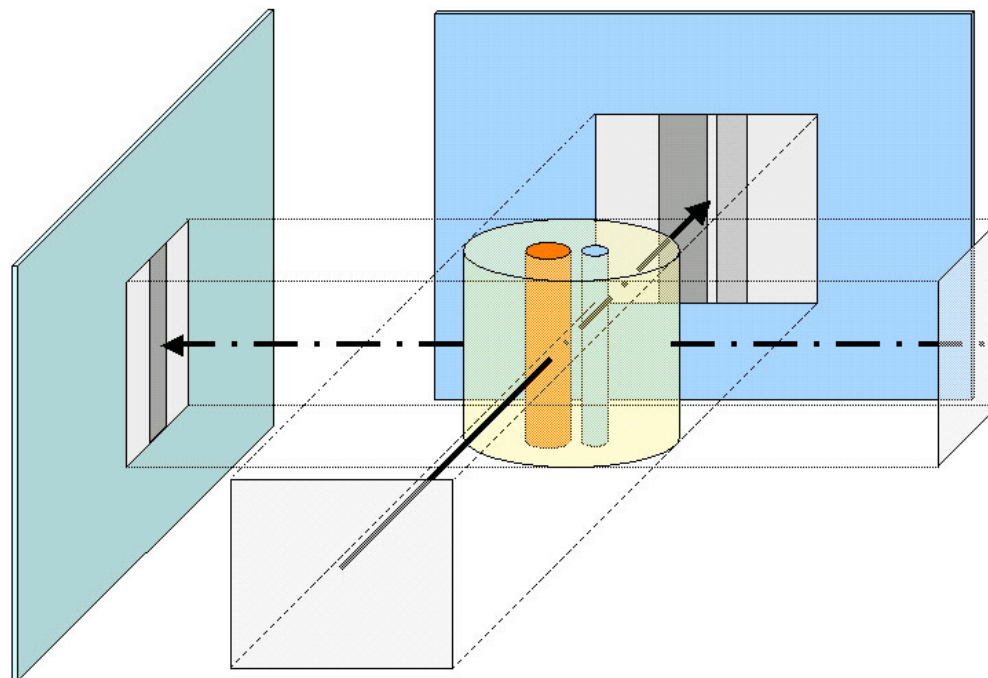
Dalla radiografia alla tomografia

- Quando facciamo una radiografia, otteniamo un'immagine bidimensionale di un oggetto tridimensionale.



Oggetto cilindrico contenente due cilindri più piccoli di materiale diverso.

Dalla radiografia alla tomografia



Due radiografie (proiezioni), prese in direzioni perpendicolari, mostrano come alcuni dettagli non siano visibili in una di esse. Molti piani sono sovrapposti nell'immagine. Mentre le dimensioni laterali dell'oggetto - quelle perpendicolari alla direzione di propagazione della radiazione - sono conservate nella radiografia, l'informazione sulla profondità viene perduta.

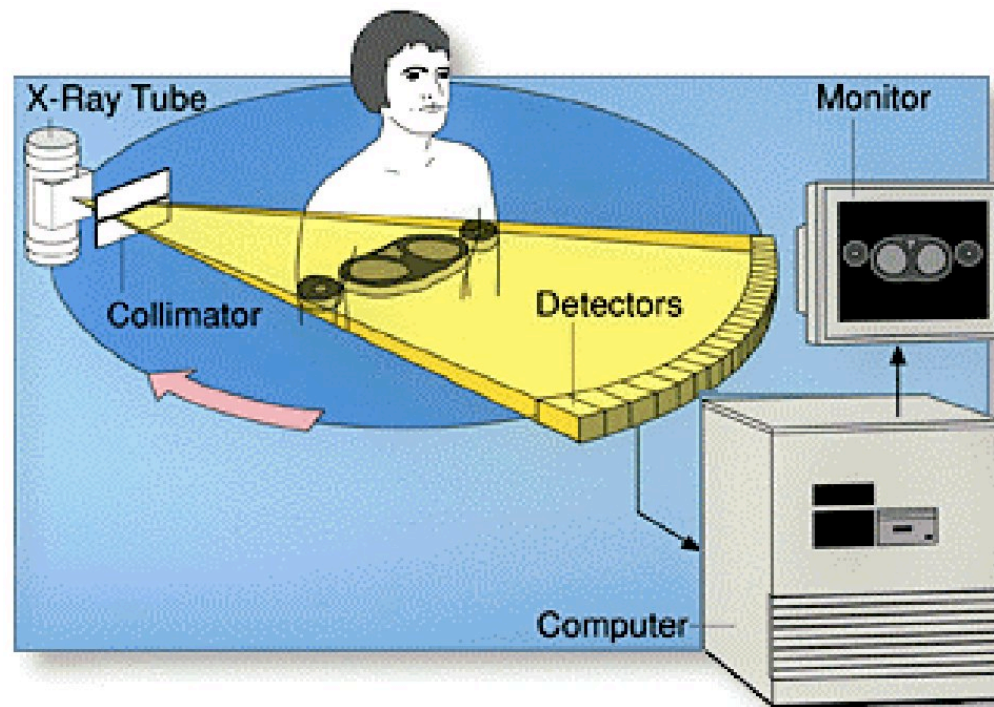
Dalla radiografia alla tomografia

La tomografia (dal greco *tómos*, che significa sezione) ci permette di “tagliare” virtualmente l’oggetto e di visualizzare una sua “sezione” (comunemente detta *slice*).



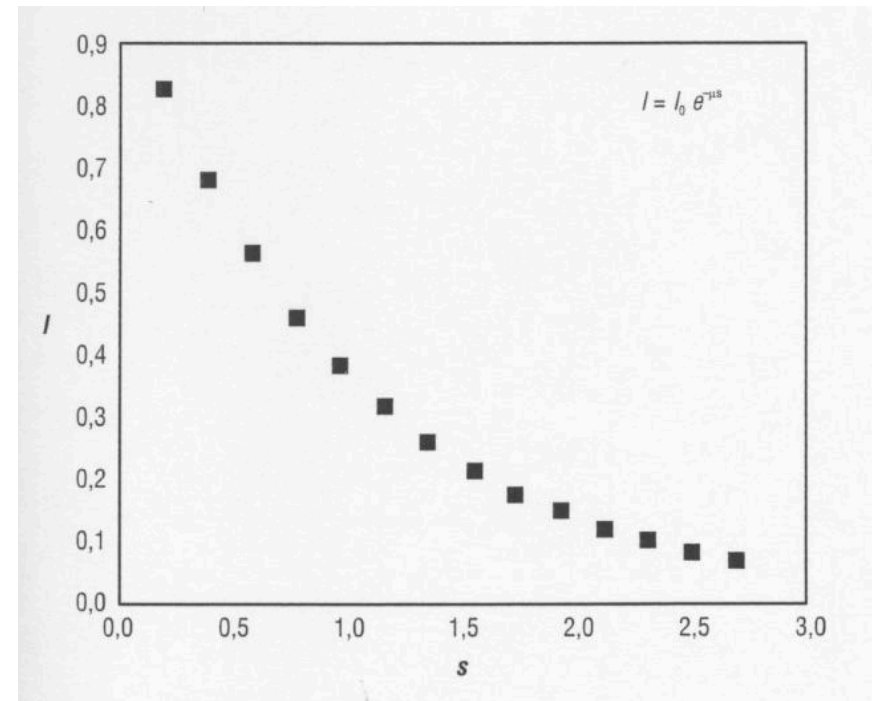
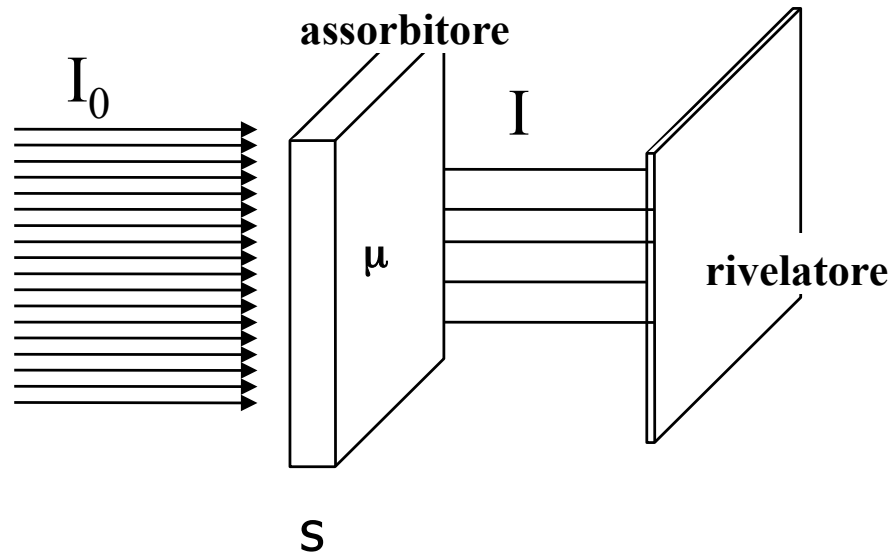
Tomografia assiale computerizzata a raggi X (TAC o CT)

- Tecnica non invasiva
- Immagini di sezioni dell'oggetto ('slice').



La tomografia permette di ottenere una mappa puntuale del coefficiente di attenuazione in una sezione trasversale dell'oggetto, tramite l'acquisizione di un certo numero di proiezioni radiografiche prese a diversi angoli.

Assorbimento raggi X monocromatici nella materia



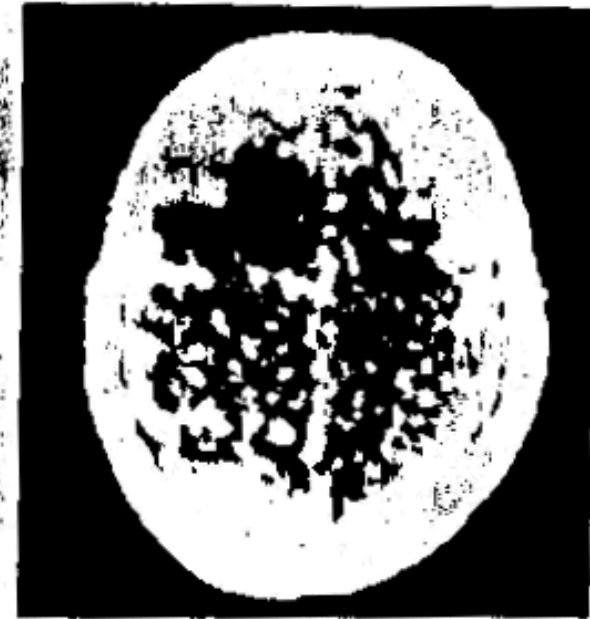
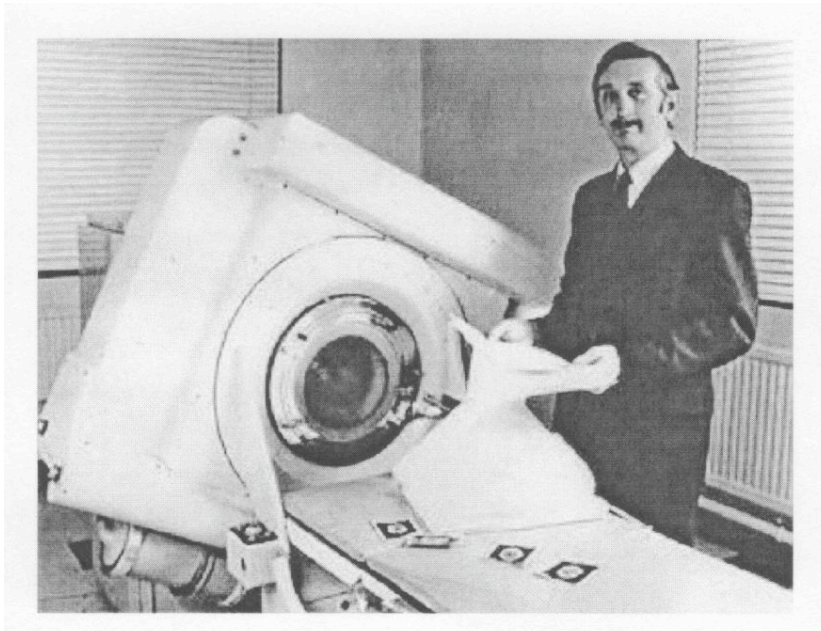
$$I = I_0 e^{-\mu s}$$

s = spessore attraversato
 μ = coefficiente di assorbimento

I = intensità trasmessa
 I_0 = intensità iniziale

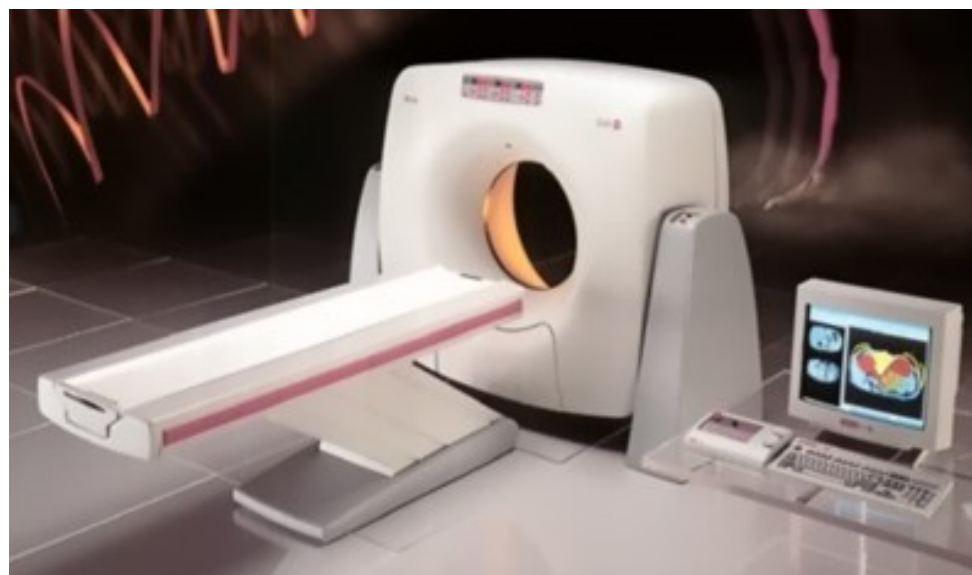
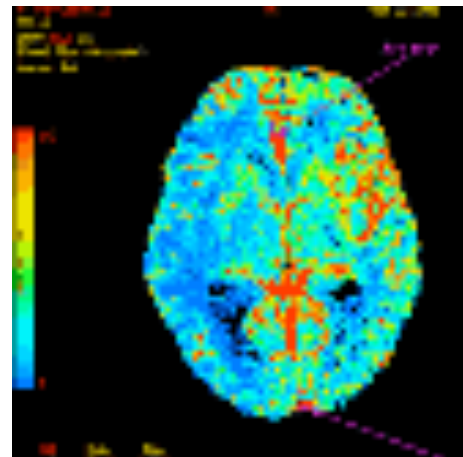
Il primo tomografo

Il primo scanner tomografico fu costruito dall'ingegnere inglese G. Hounsfield presso i Laboratori di ricerca della Thorn EMI. Hounsfield concepì la sua idea nel 1967 e nell'ottobre del 1971 presso l'Atkinson Morley's Hospital (Wimbledon, Londra) fu realizzata la prima immagine CT di un paziente. Si trattava di un caso sospetto di tumore cerebrale nel lobo frontale.



Nel 1979 ad Hounsfield venne conferito il Premio Nobel per la Medicina, che condivise con il fisico americano di origine sudafricana Allan Cormack.

Gli odierni tomografi





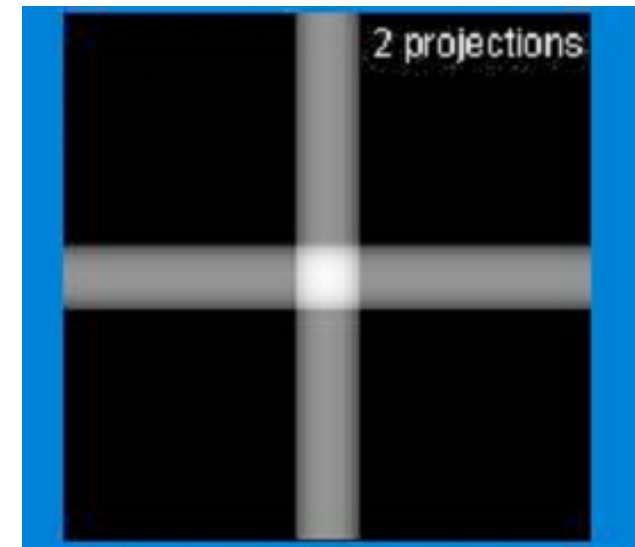
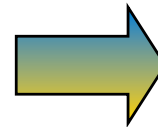
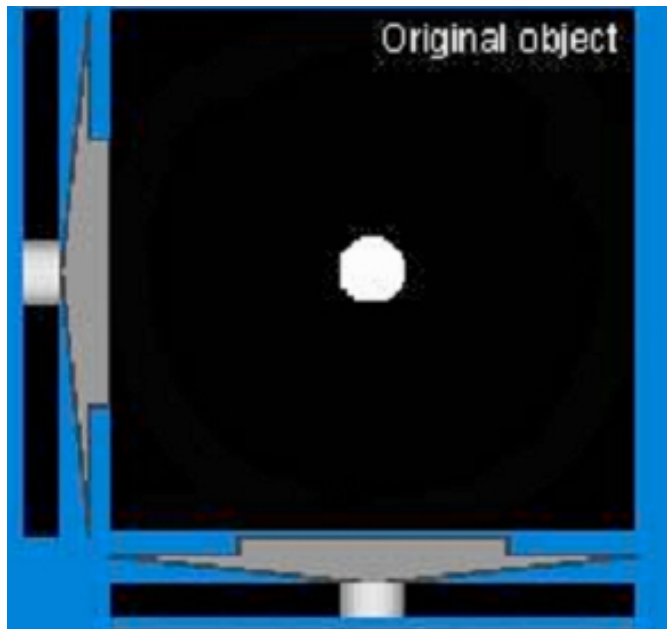
La ricostruzione dell'immagine

Il metodo comunemente utilizzato per la ricostruzione delle immagini negli scanner CT è la cosiddetta retroproiezione filtrata (Filtered Back-Projection).

La matematica nascosta dietro questa tecnica di ricostruzione risale al 1917 e si deve al matematico austriaco Radon, che riuscì a risolvere il problema della ricostruzione di un oggetto a partire dalle sue proiezioni.

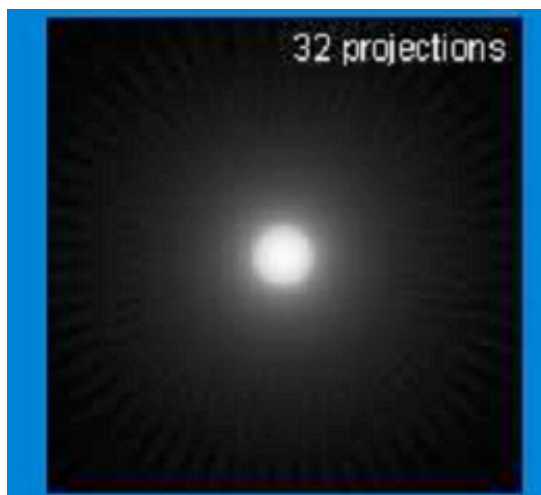
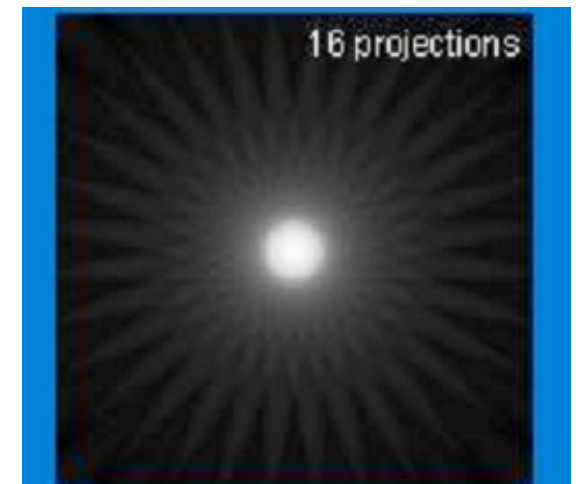
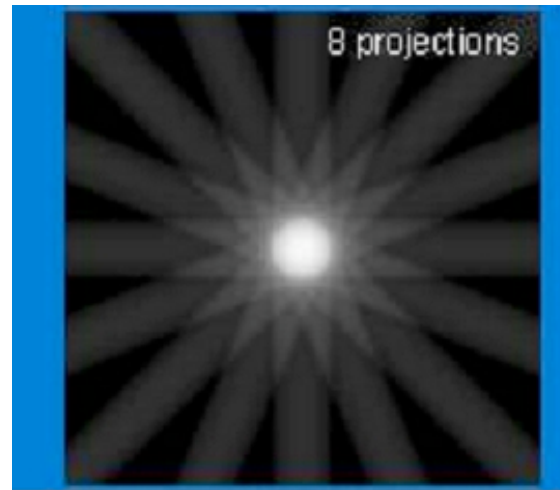
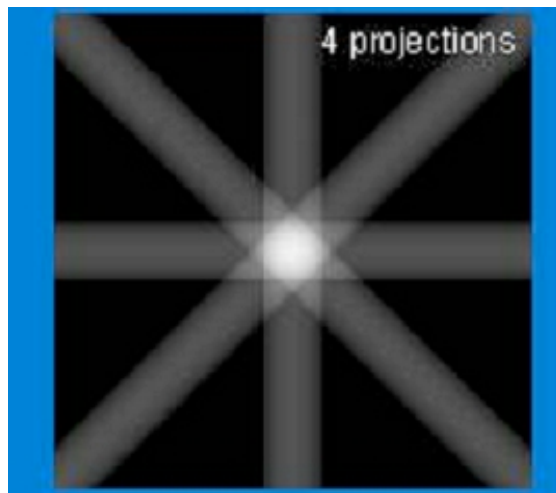
La teoria di Radon però non aveva ricevuto particolare attenzione fra gli addetti ai lavori, finchè fu riscoperta nel 1969 dal fisico Cormack, che in questo modo riuscì a risolvere le difficoltà di carattere matematico incontrate nel tentativo di realizzare le sue intuizioni sulla tomografia.

Esempio di ricostruzione tomografica (Back-projection)



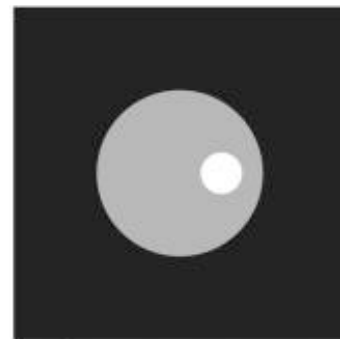
Ciascuna proiezione viene "spalmata" all'indietro nella stessa direzione in cui è stata ottenuta, cioè viene "retroproiettata".

Esempio di ricostruzione tomografica (Back-projection)

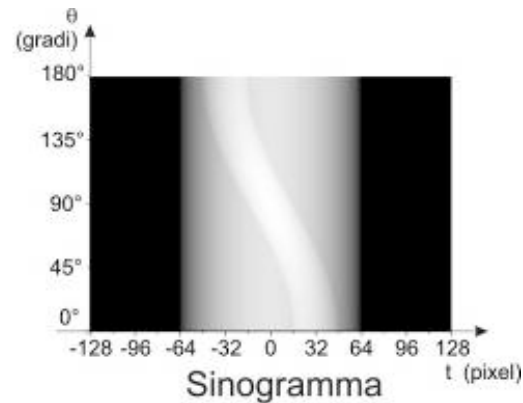


All'aumentare del numero delle proiezioni gli artefatti a stella tendono ad essere sempre più mascherati, ma in ogni caso rimane nella ricostruzione un annebbiamento di fondo .

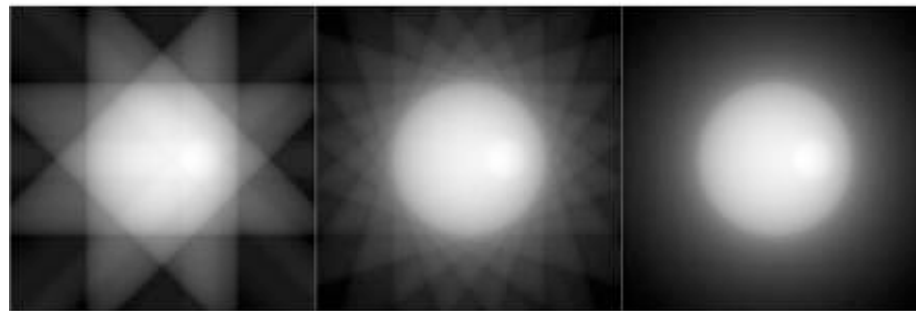
La "back-projection"



Oggetto simulato



Sinogramma



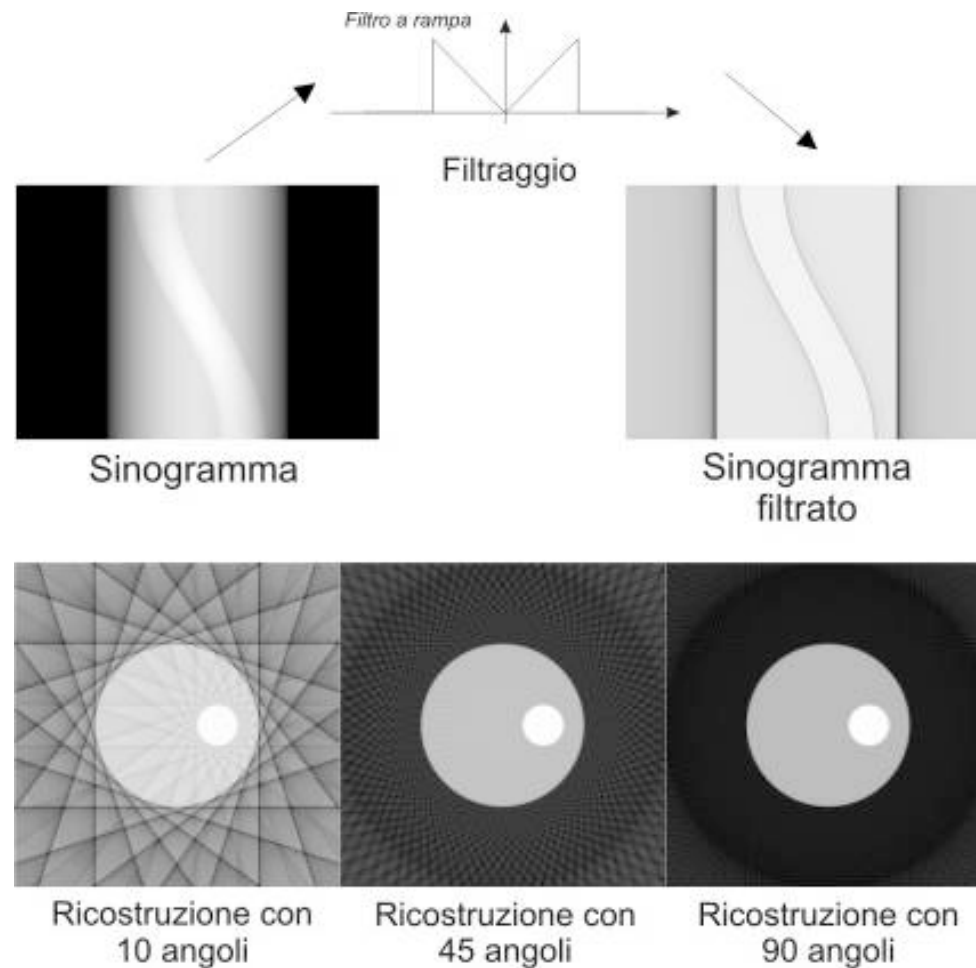
Ricostruzione con
4 angoli

Ricostruzione con
10 angoli

Ricostruzione con
45 angoli

Ricostruzione tomografica mediante retroproiezione (BP), eseguita a partire da dati simulati. Se si utilizza un numero troppo basso di viste angolari (ovvero di righe del sinogramma) si ottiene un'immagine di scarsa qualità. Nonostante ciò, la forma dell'oggetto originale risulta già vagamente distinguibile con soli 4 angoli di vista. Con 10 angoli il risultato migliora, ma è ancora visibile il caratteristico "artefatto stellato". Con 45 angoli l'artefatto stellato è scomparso e si distingue chiaramente la forma dell'oggetto originale. Tuttavia, l'immagine risulta visibilmente "sfocata".

La "filtered back-projection"



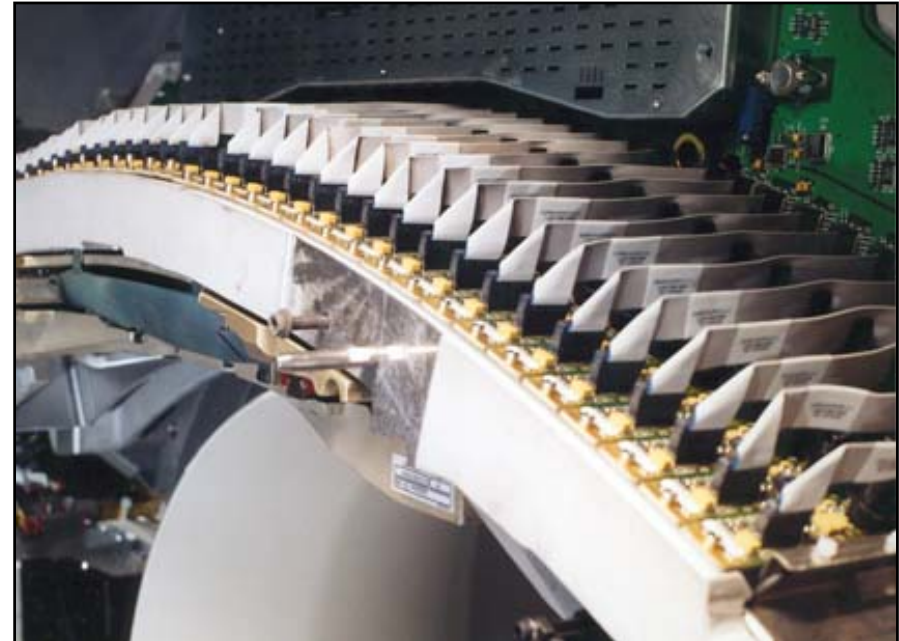
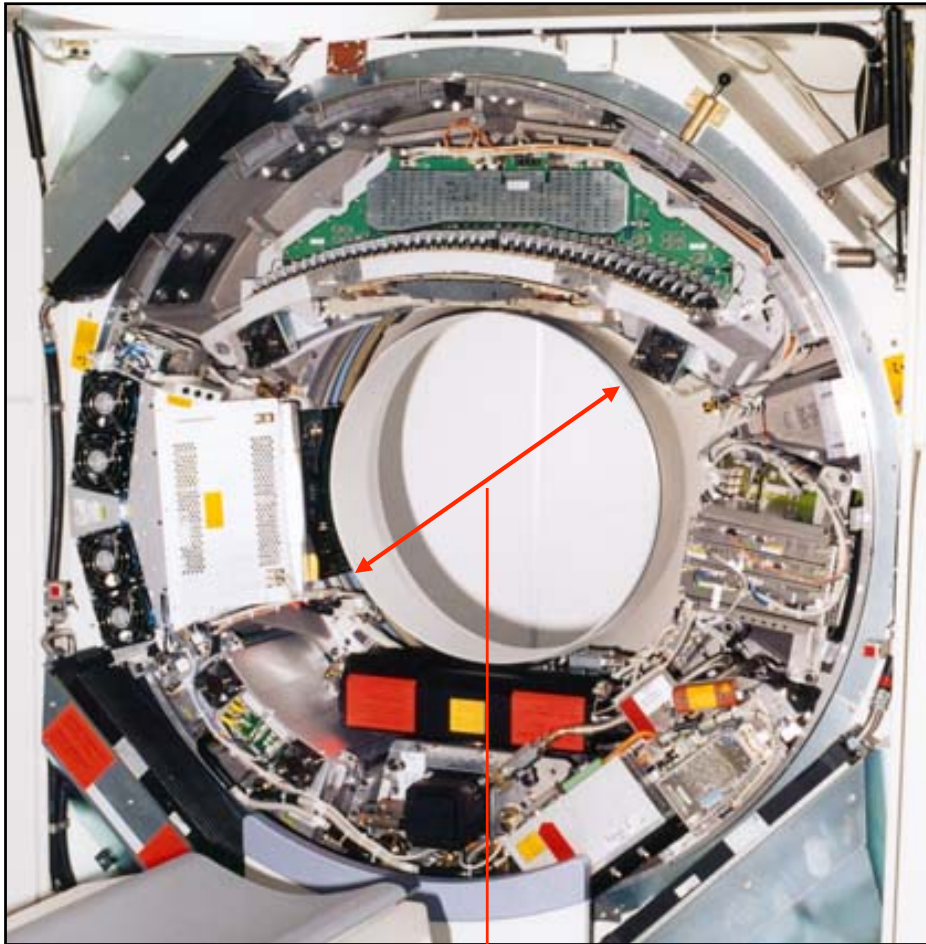
Ricostruzione tomografica mediante retroproiezione filtrata, eseguita a partire da dati simulati. L'applicazione del filtro a rampa prima della retroproiezione elimina la sfocatura nell'immagine ricostruita.



La TAC e

.....i Beni Culturali

TAC convenzionale

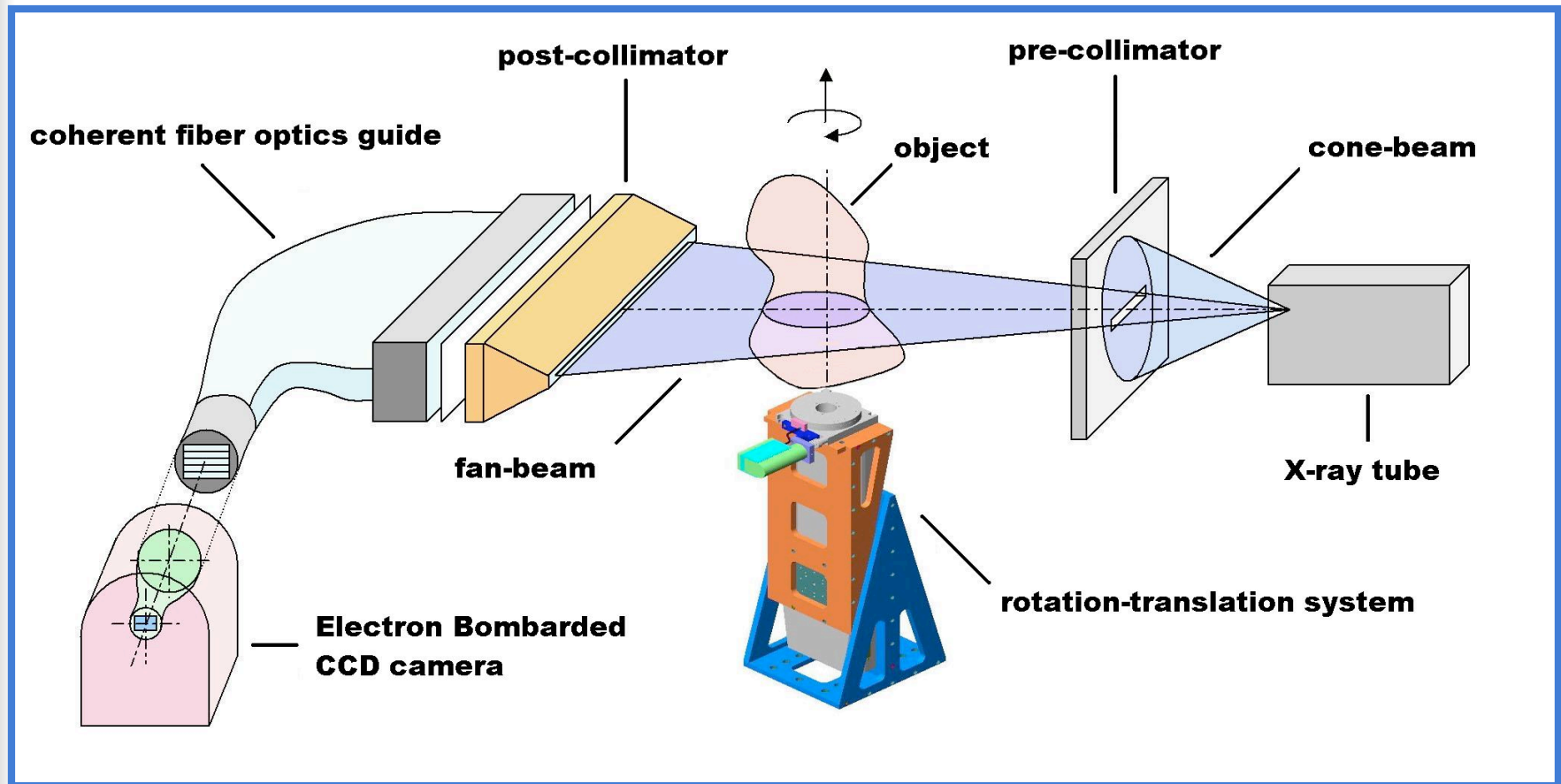


rivelatori

Diametro standard gantry: 70 cm → **FOV tipico: 55 - 65 cm**

Tomografia con geometria fan-beam

■ Il set-up sperimentale



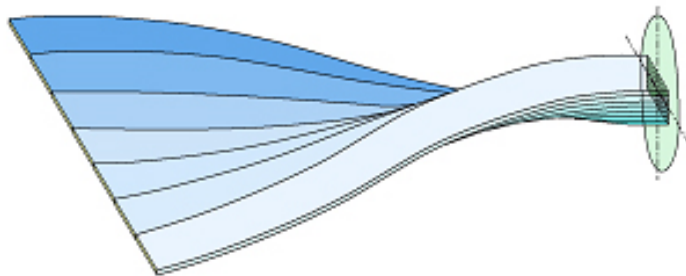
Tomografia con geometria fan-beam

$Gd_2O_2S:Tb$

Da $129 \times 1.45 \text{ mm}^2$ a $18.4 \times 10.6 \text{ mm}^2$ FO light guide

EBCCD 1024 x 512 pixel

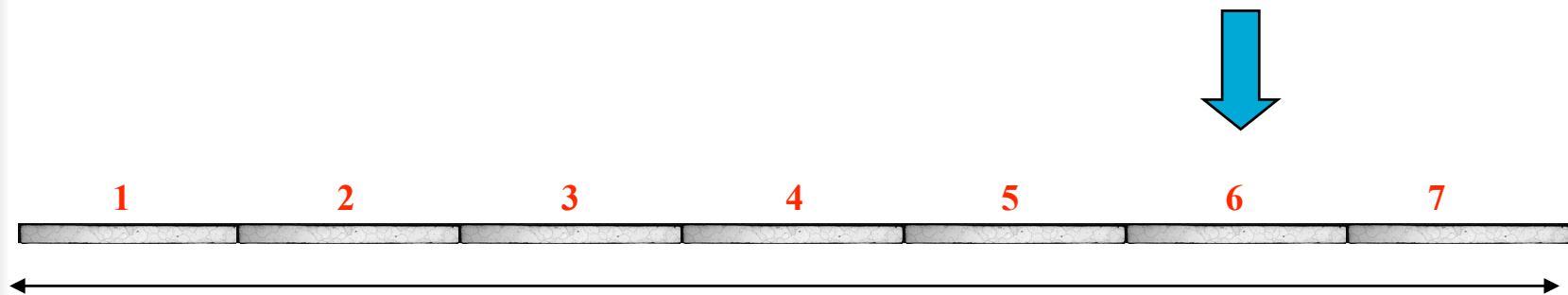
Peltier and water cooling



Tomografia con geometria fan-beam



L'immagine acquisita appare come la sovrapposizione di sette "fette", che vengono poi ricollocate via software una accanto all'altra in modo da riprodurre l'immagine in ingresso (da 1024×512 pixels a 5600×60 pixels)

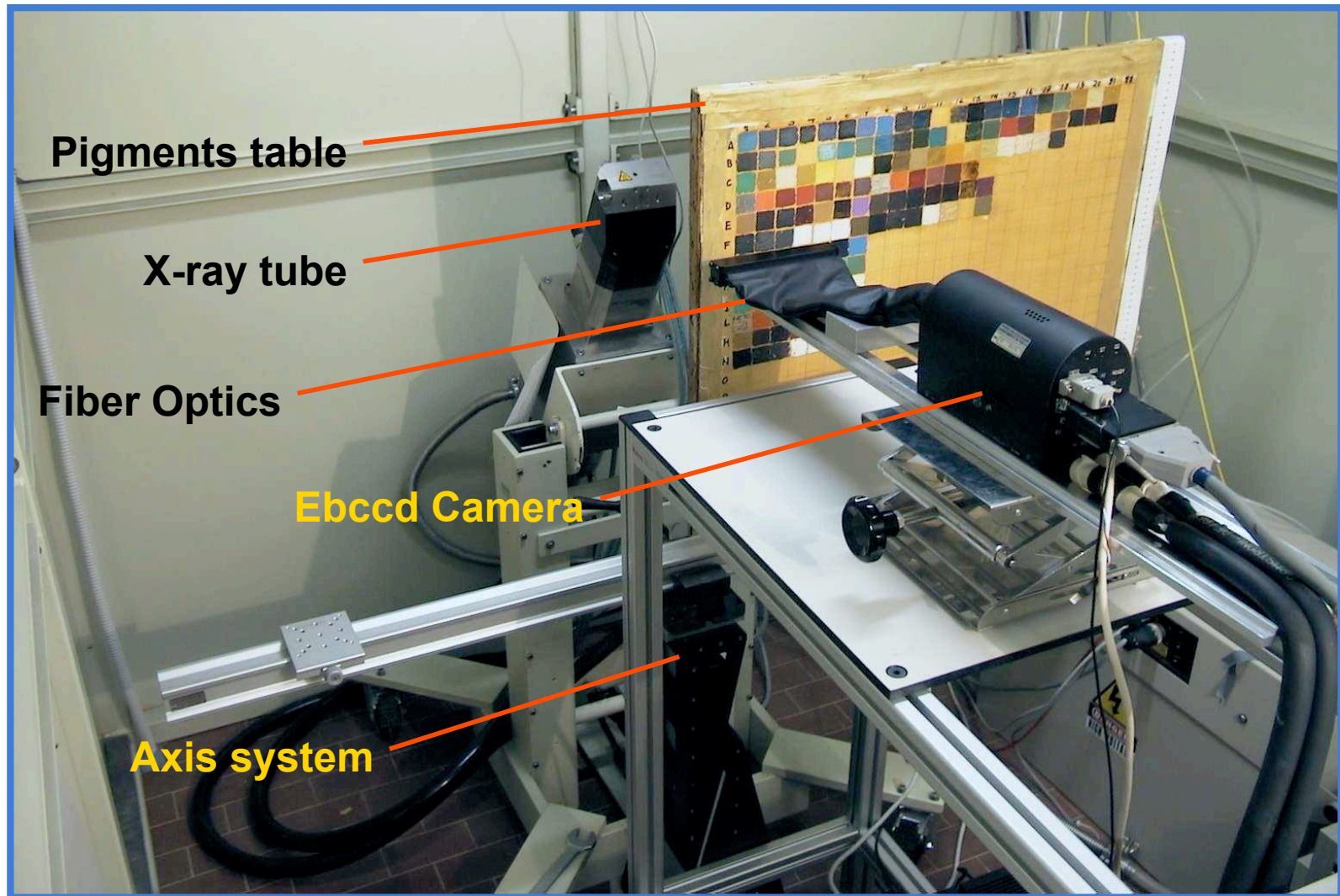


129 mm



Pixel size = 23 μm

Radiografia digitale di dipinti



In collaborazione con Opificio delle Pietre Dure, Firenze

Radiografia digitale

Size

5600 x 5600 pixel

Pixel size

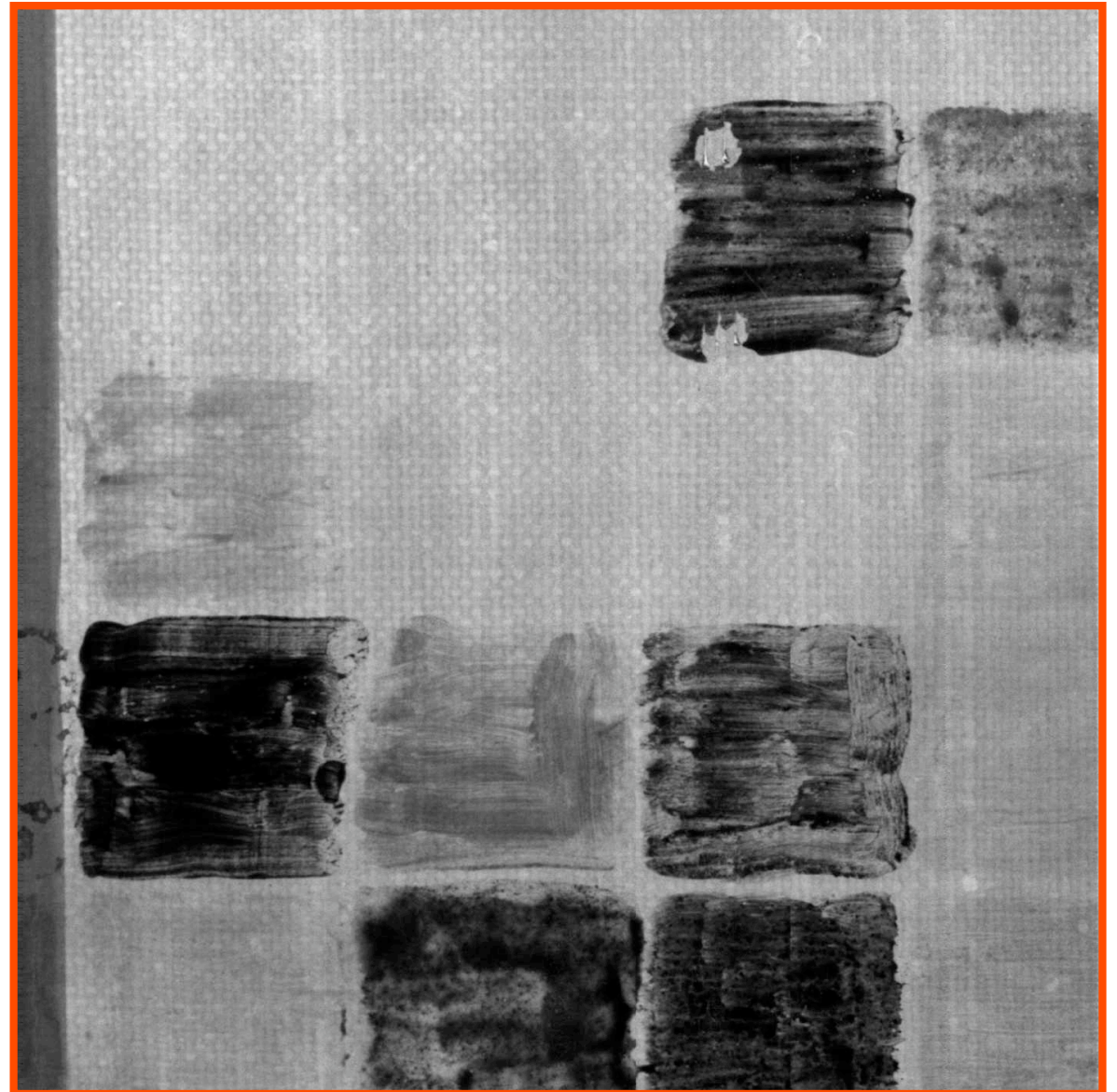
23 microns

Parametri di acquisizione

E_{\max} 25 keV

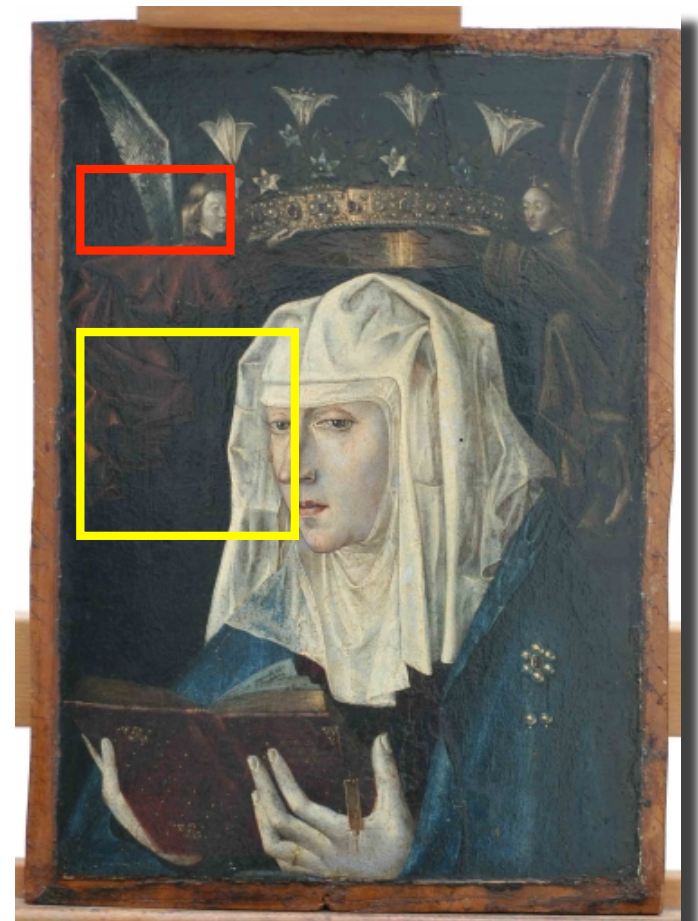
I 0.6 mA

Exp 100 ms / line

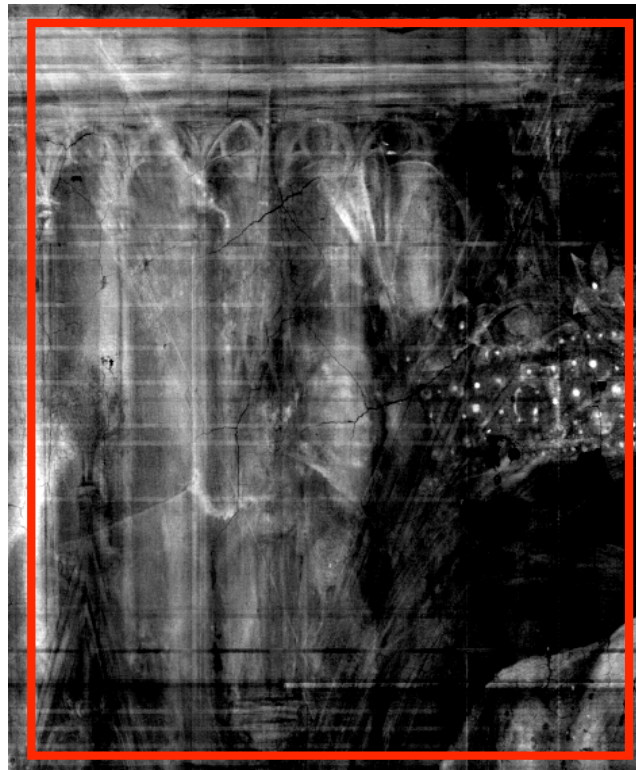


Radiografia digitale di un dipinto attribuito ad Antonello da Messina

- **In collaborazione con:**
 - “Scuderie del Quirinale”, Roma
 - Università di Milano

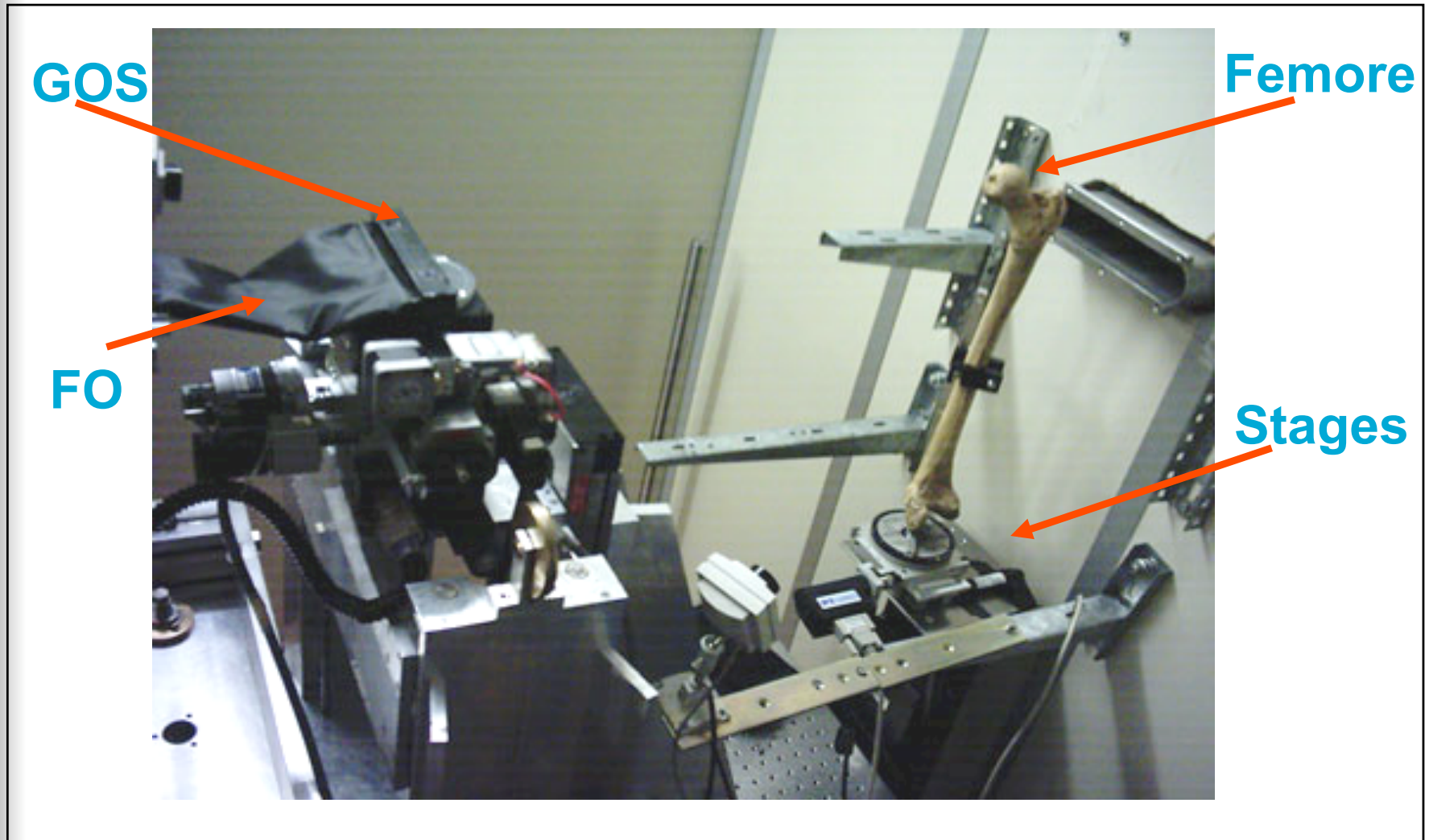


**Vergine leggente,
tempera e olio su tavola**



Tomografia con geometria fan-beam

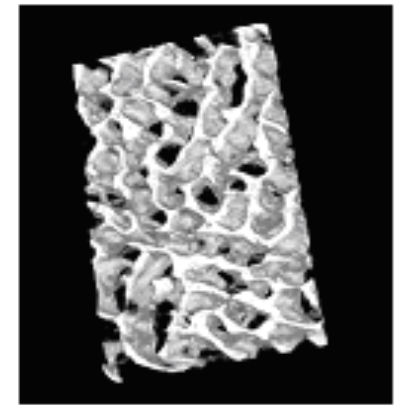
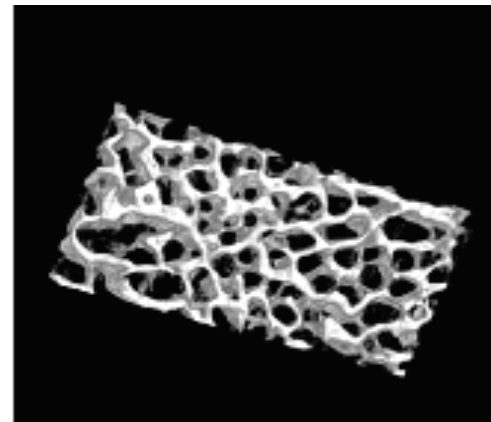
■ Progetto Osteoporosi, Università di Bologna



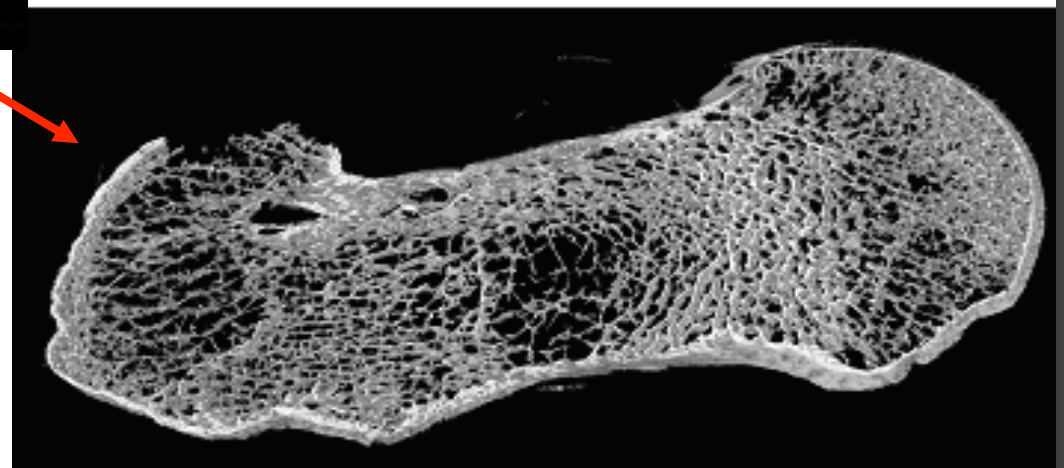
In collaborazione con il Sincrotrone *ELETTRA*, Trieste

Tomografia con geometria fan-beam

- Progetto Osteoporosi, Università di Bologna



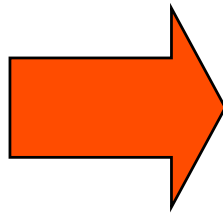
In collaborazione
con il Sincrotrone
ELETTRA, Trieste



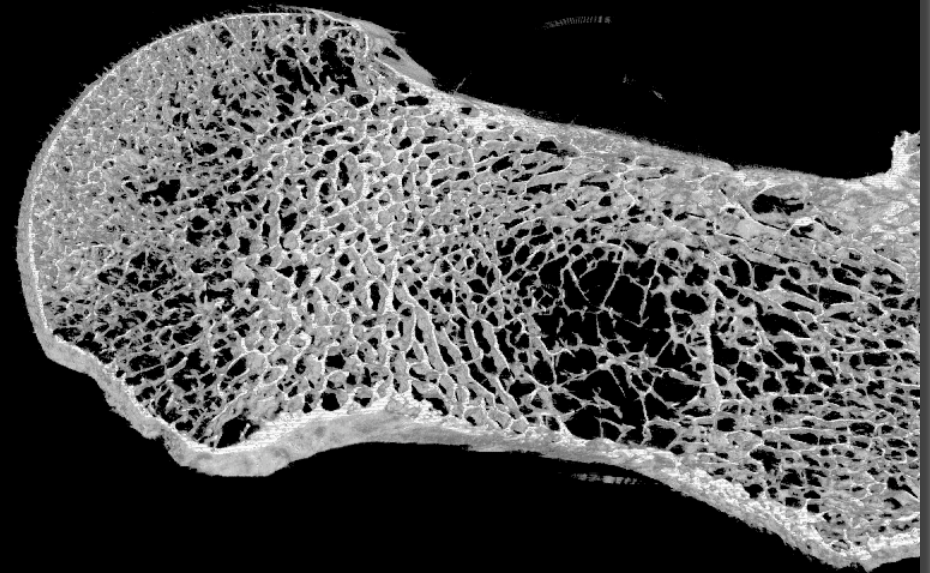
Tomografia con geometria fan-beam

■ Progetto Osteoporosi, Università di Bologna

3D CT



In collaborazione
con il Sincrotrone
ELETTRA, Trieste



Helical /Spiral CT

Applicazione: CT di un campione di roccia

**Piccolo campione di roccia
proveniente dal complesso
“Eclogitic Micaschist” (Western
Alps)**

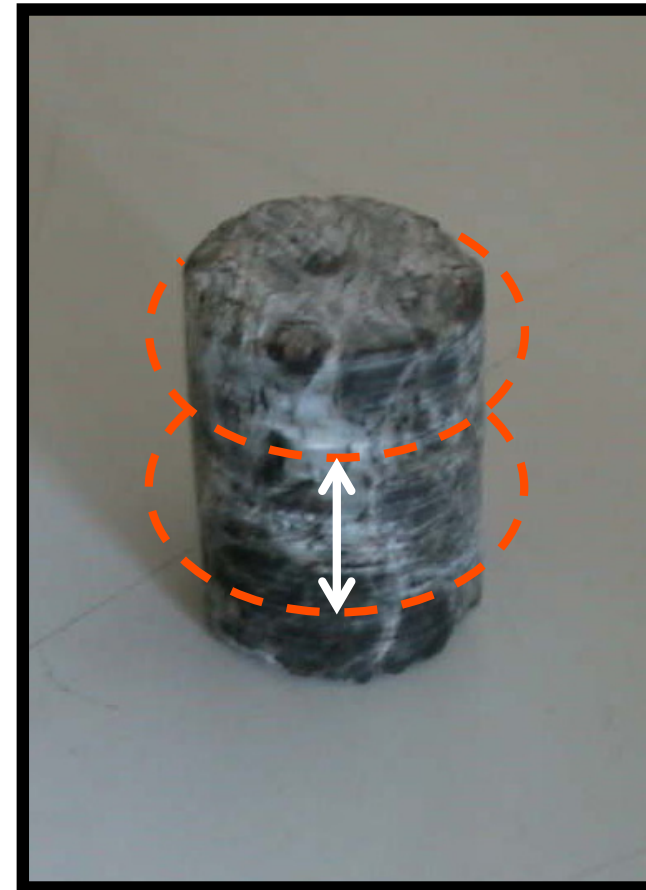
Diametro 20 mm

Altezza
28 mm

Porzione investigata 15 mm

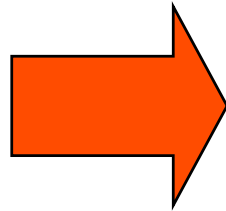
X-ray parameters

E_{\max}	180 keV
Int	1 mA
Exp	2 s / view

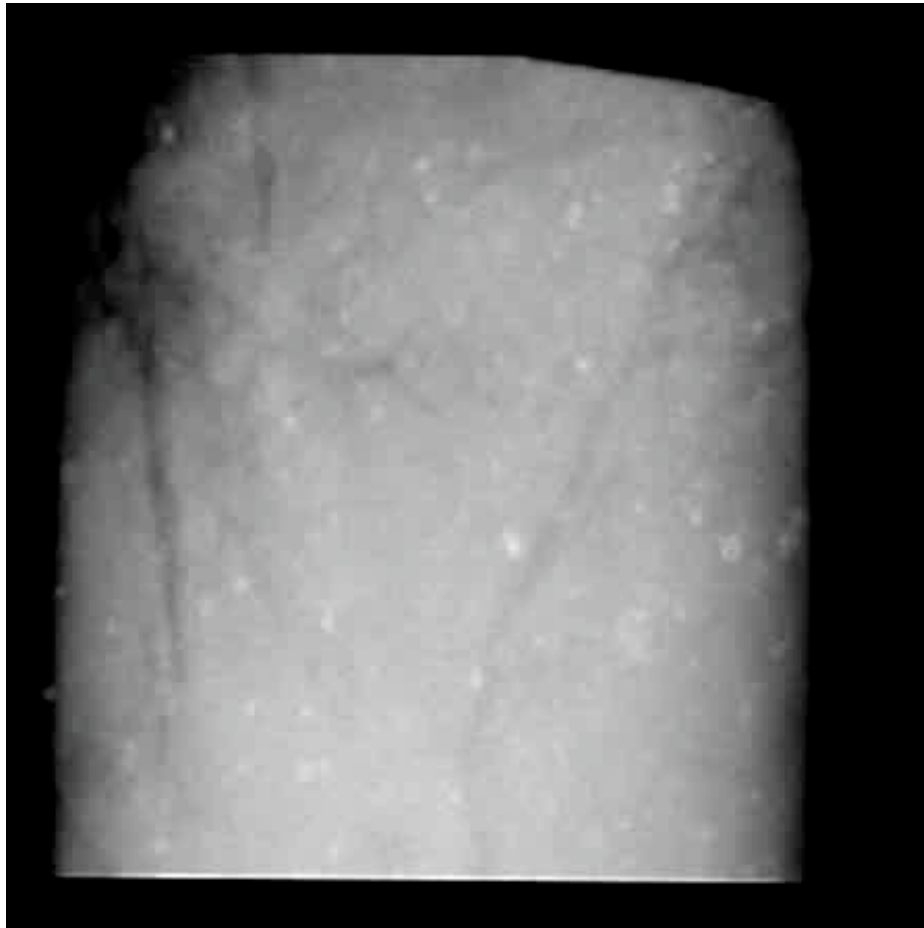


Acquisizione di tipo TAC spirale del campione di roccia

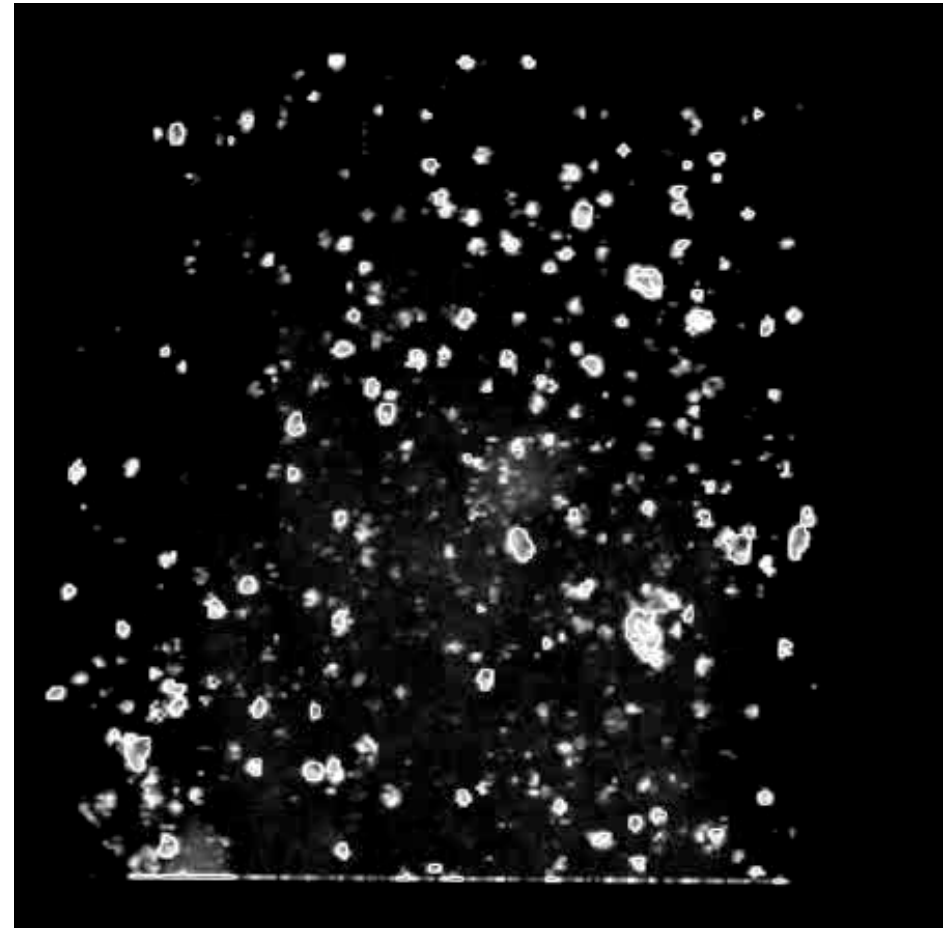
Helical CT



**Ricostruzione 3D del
campione di roccia**

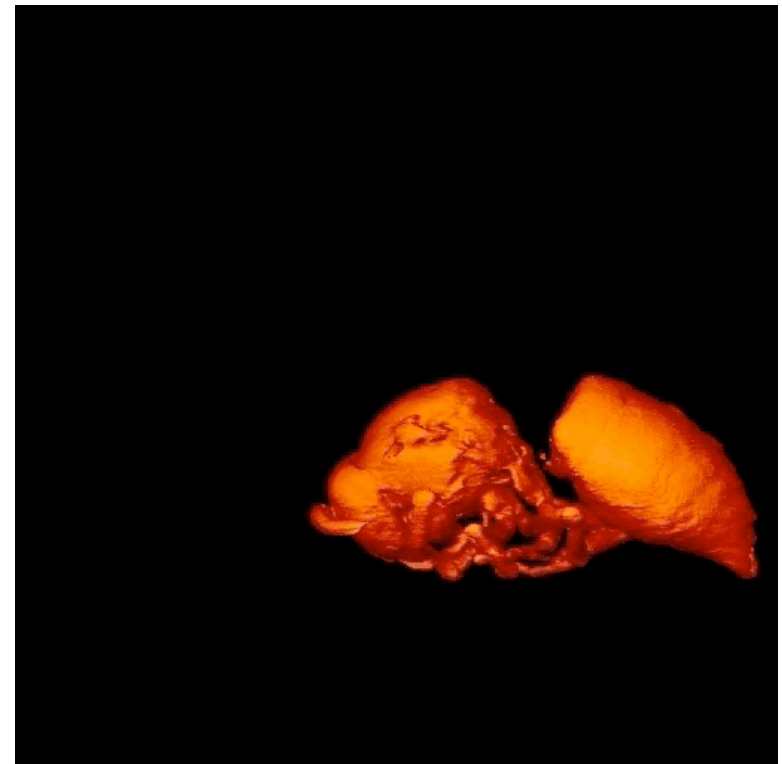
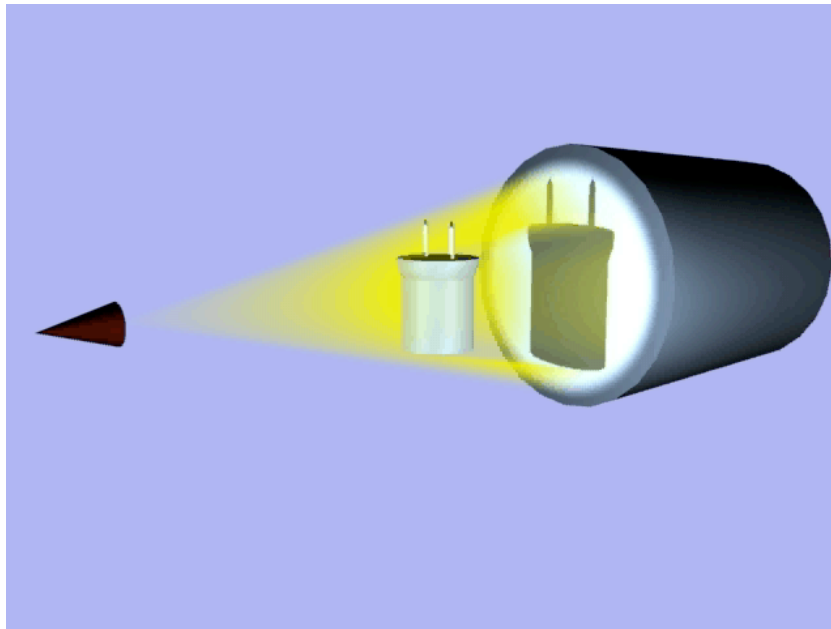


**Segmentazione del volume
ricostruito: estrazione di
cristalli di minerali**



Collaborazione: ENI-AGIP

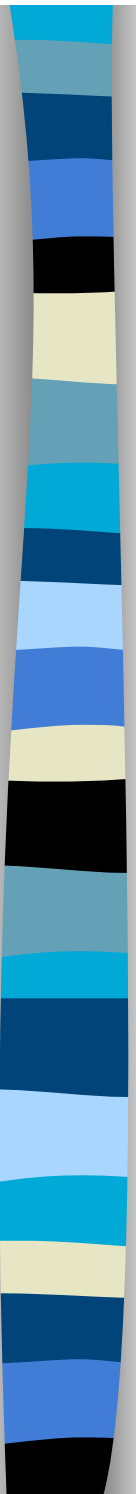
Sistemi tomografici con geometria cone-beam



Analisi CT di un piccolo busto di argilla

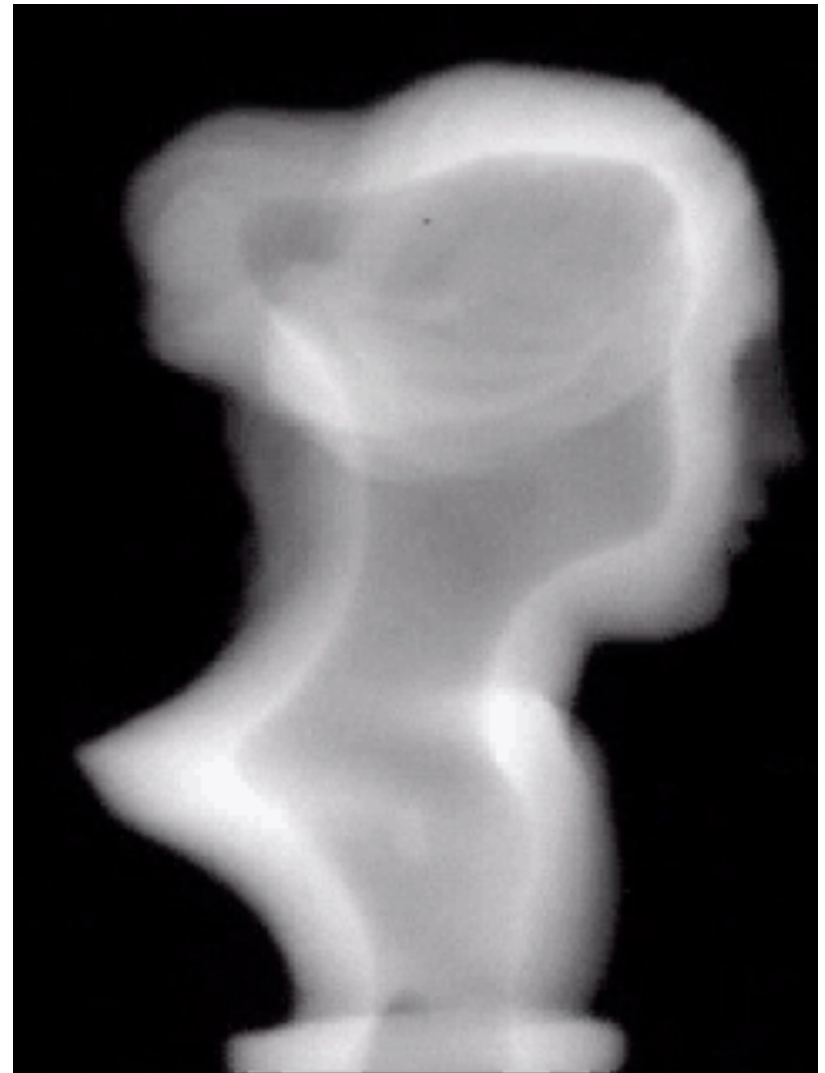
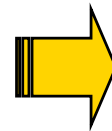
- **Dimensioni:**
- **9.0 x 7.0 x 7.0 cm³**

- **Dettagli:**
- **V / I : 150 kVp / 1 mA**
- **NUM. ANGOLI: 600**
- **VOXEL: 280 μm**



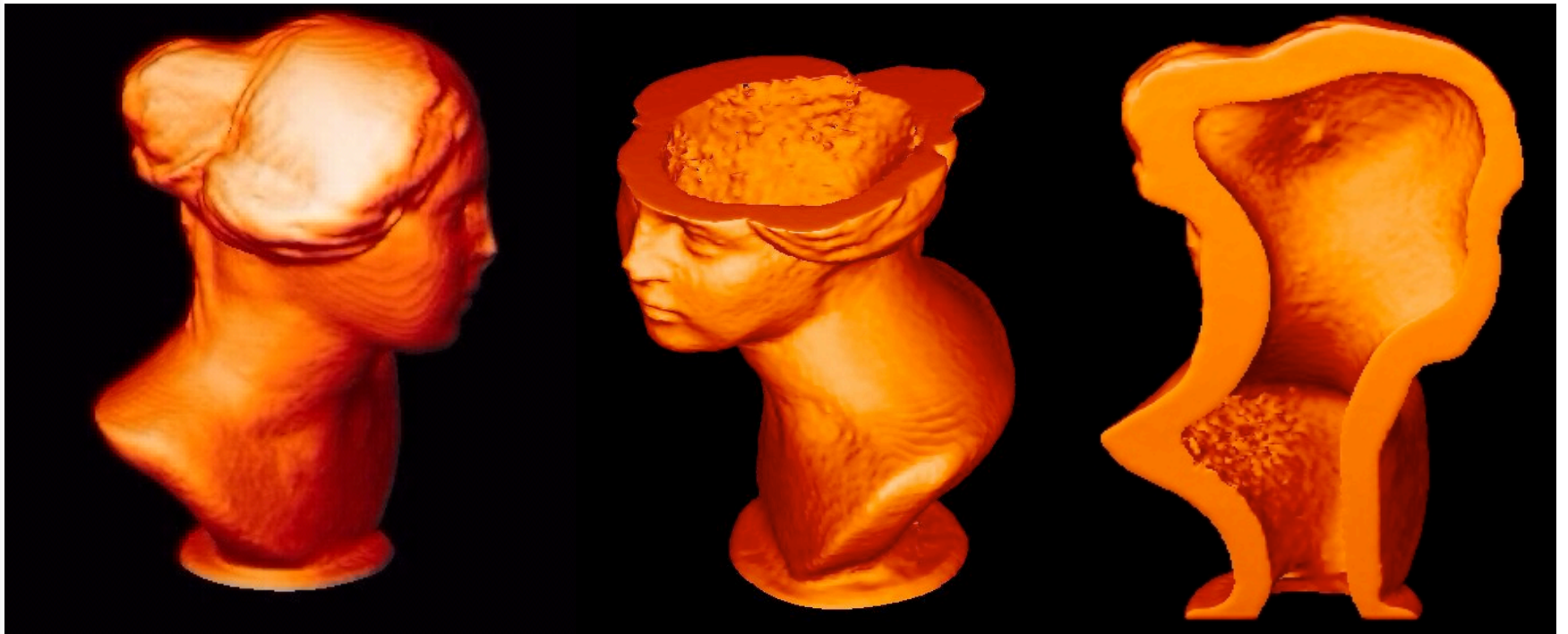
Processo Tomografico

la sequenza di radiografie



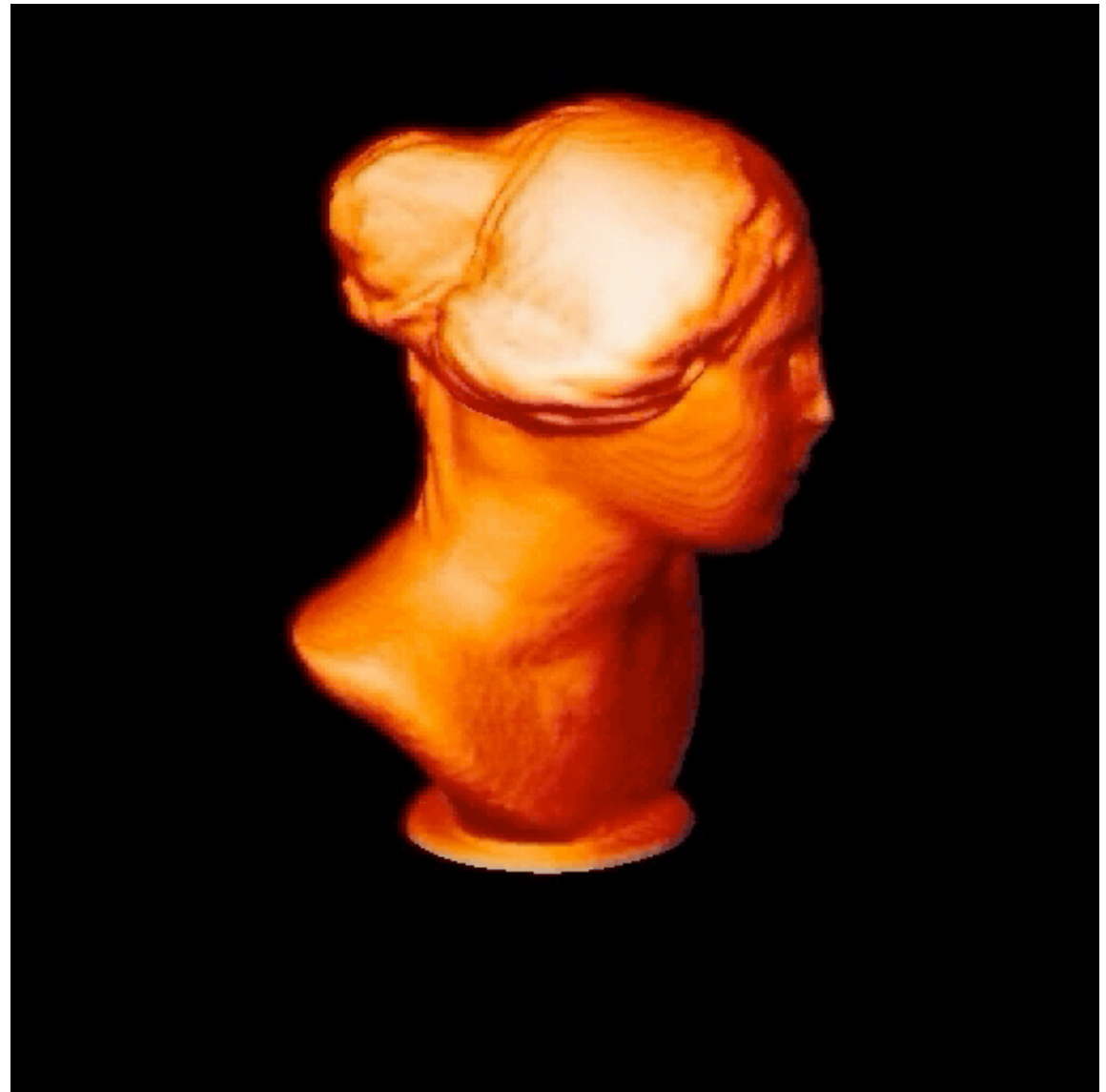
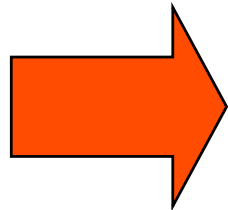
Risultati tomografici

Tagli virtuali

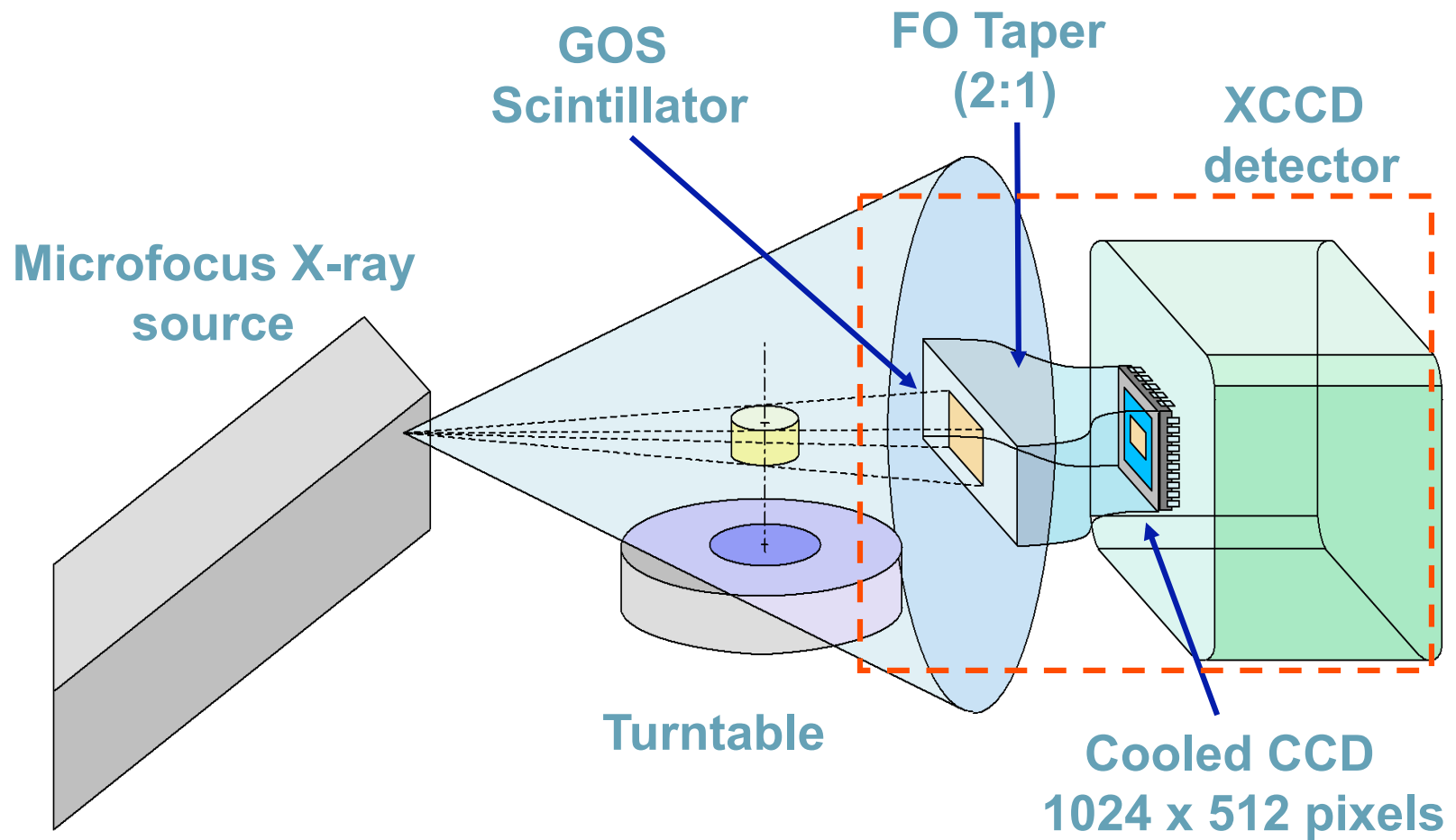


Analisi CT di un busto di argilla pompeiano

Ricostruzione
e
analisi della
struttura interna



Sistema micro-CT





Sistema micro-CT

- Lo studio delle lesioni dentarie può dare informazioni sul trattamento a cui venivano sottoposti i cibi e sulla dieta quotidiana dei nostri antenati (in particolare riguardo all'assunzione di zuccheri).
- In molti casi l'osservazione diretta della corona del dente, o anche una sua radiografia, possono lasciare un margine significativo di incertezza diagnostica. Questo è vero soprattutto nel caso di campioni incompleti, alterati o danneggiati, ovvero nella quasi totalità dei reperti investigati.

In collaborazione con il Museo Nazionale Preistorico Etnografico '*L. Pigorini*' (Roma), abbiamo usato la micro-CT per determinare la natura di lesioni dentarie su campioni di varie epoche.

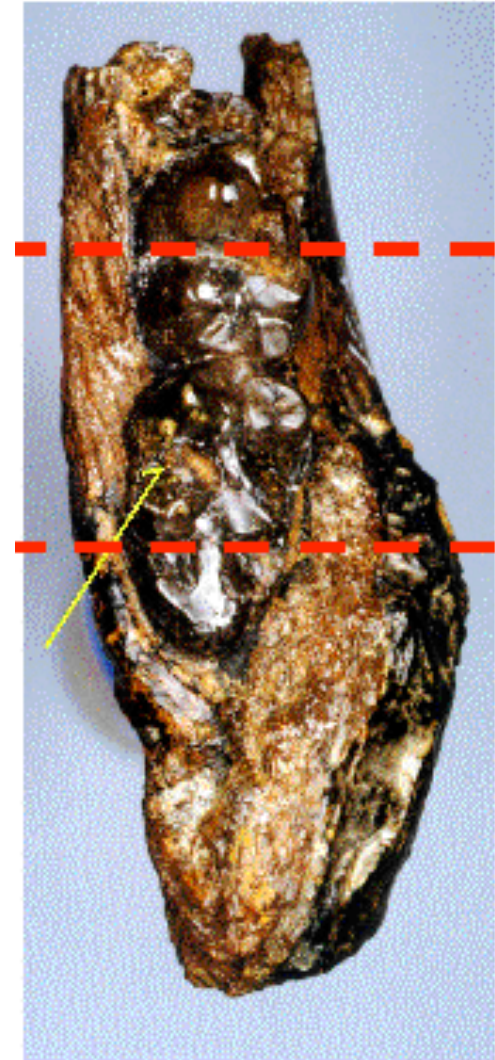
Analisi di una porzione di mandibola fossile di oreopiteco (7-9 milioni di anni)

- **Dimensioni:**
- **3.0 x 2.5 x 2.0 cm³**

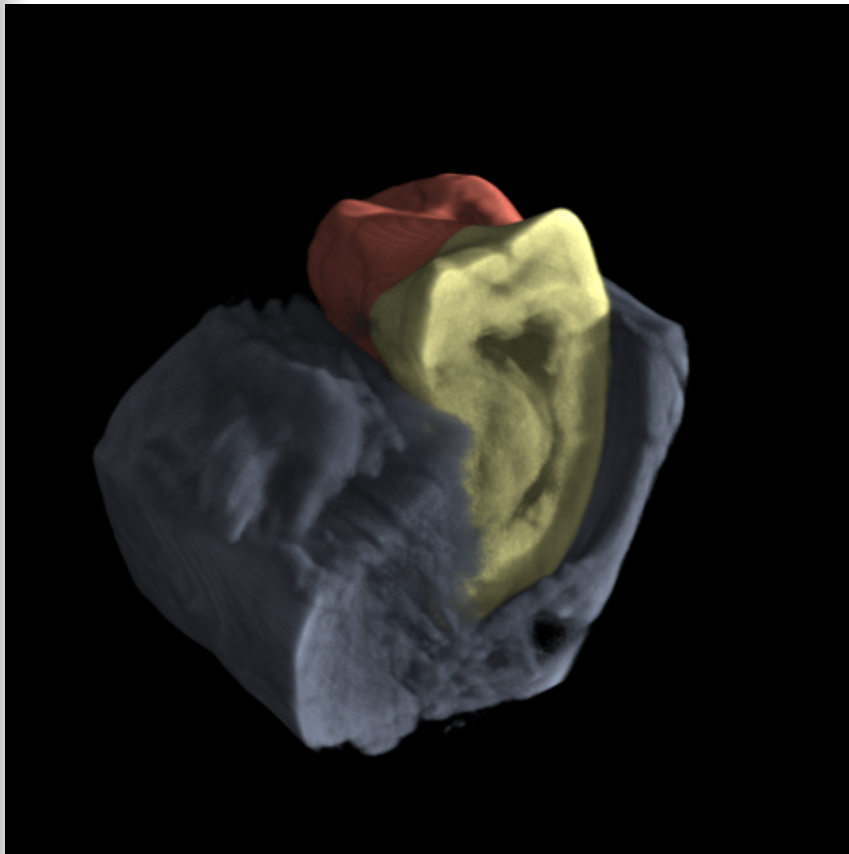
- **Parametri di set-up:**
- **V :** 70 kVp
- **I :** 1000 μ A
- **NUM. ANGOLI:** 600
- **VOXEL:** 30 μ m

***Oreopithecus bambolii*: scimmia antropomorfa bipede**

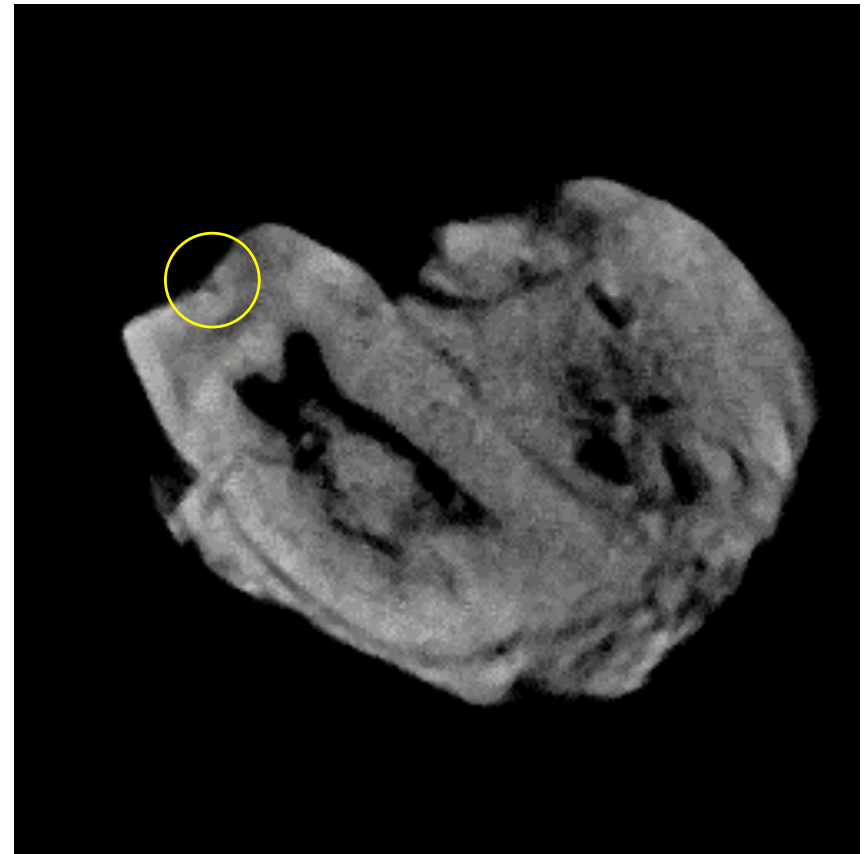
In collaborazione con:
Museo Nazionale Preistorico Etnografico 'L. Pigorini' di Roma



Analisi di una porzione di mandibola fossile di oreopiteco



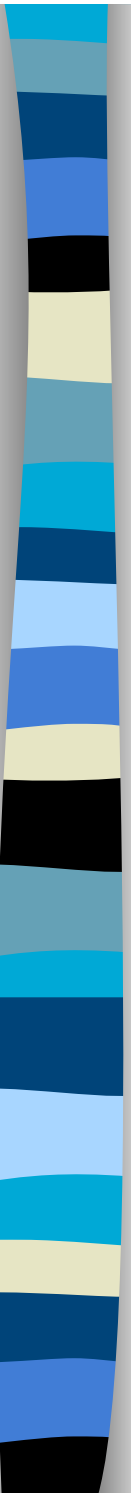
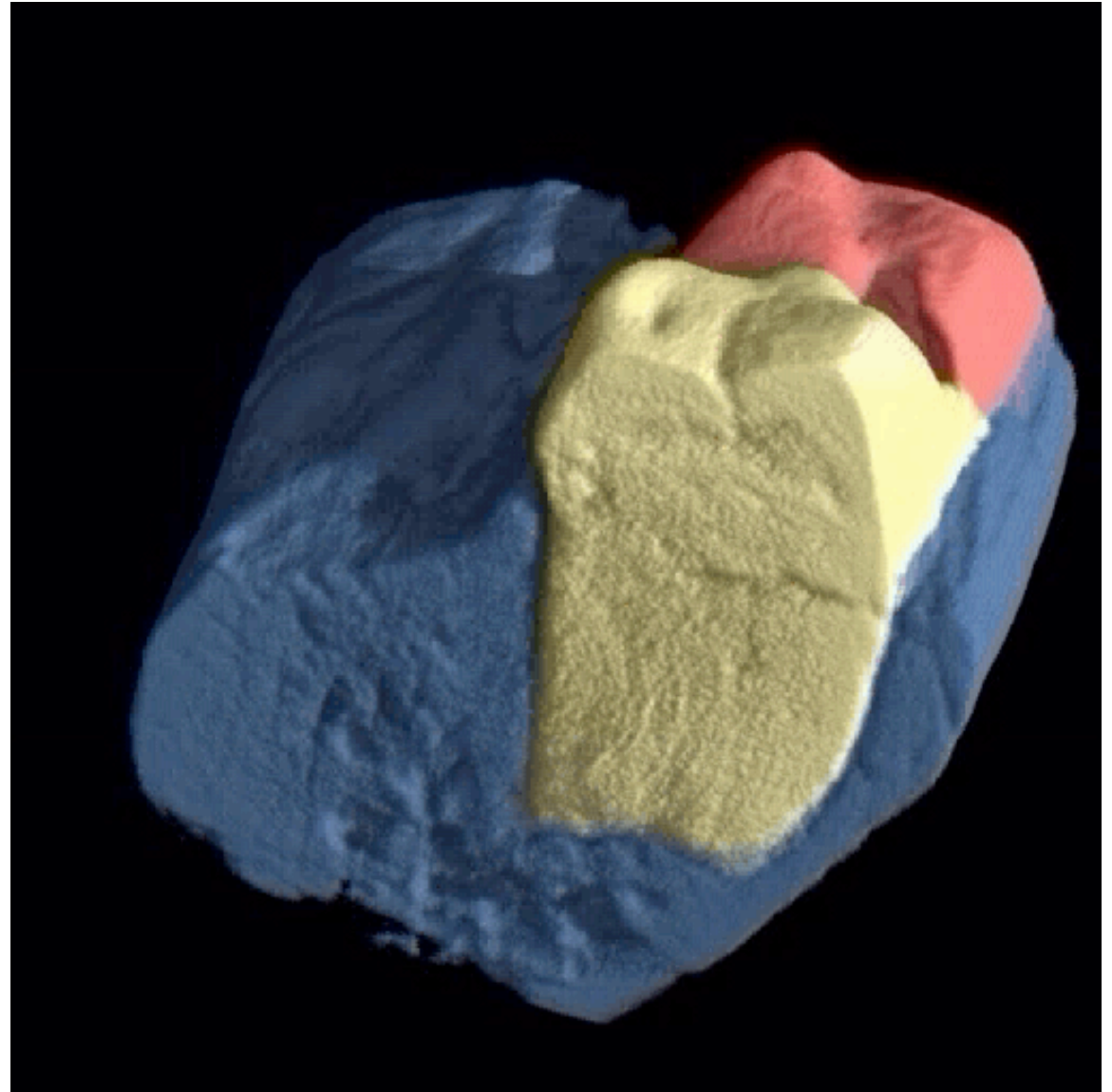
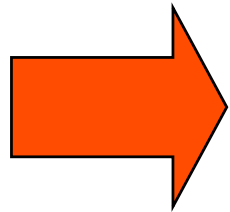
Sezione virtuale della corona di M3 (in giallo) a livello degli apici di protoconide-metaconide (ricostruzione 3D). Si notano in particolare le variazioni nello spessore dello smalto, la camera pulpare, la struttura ossea alveolare.



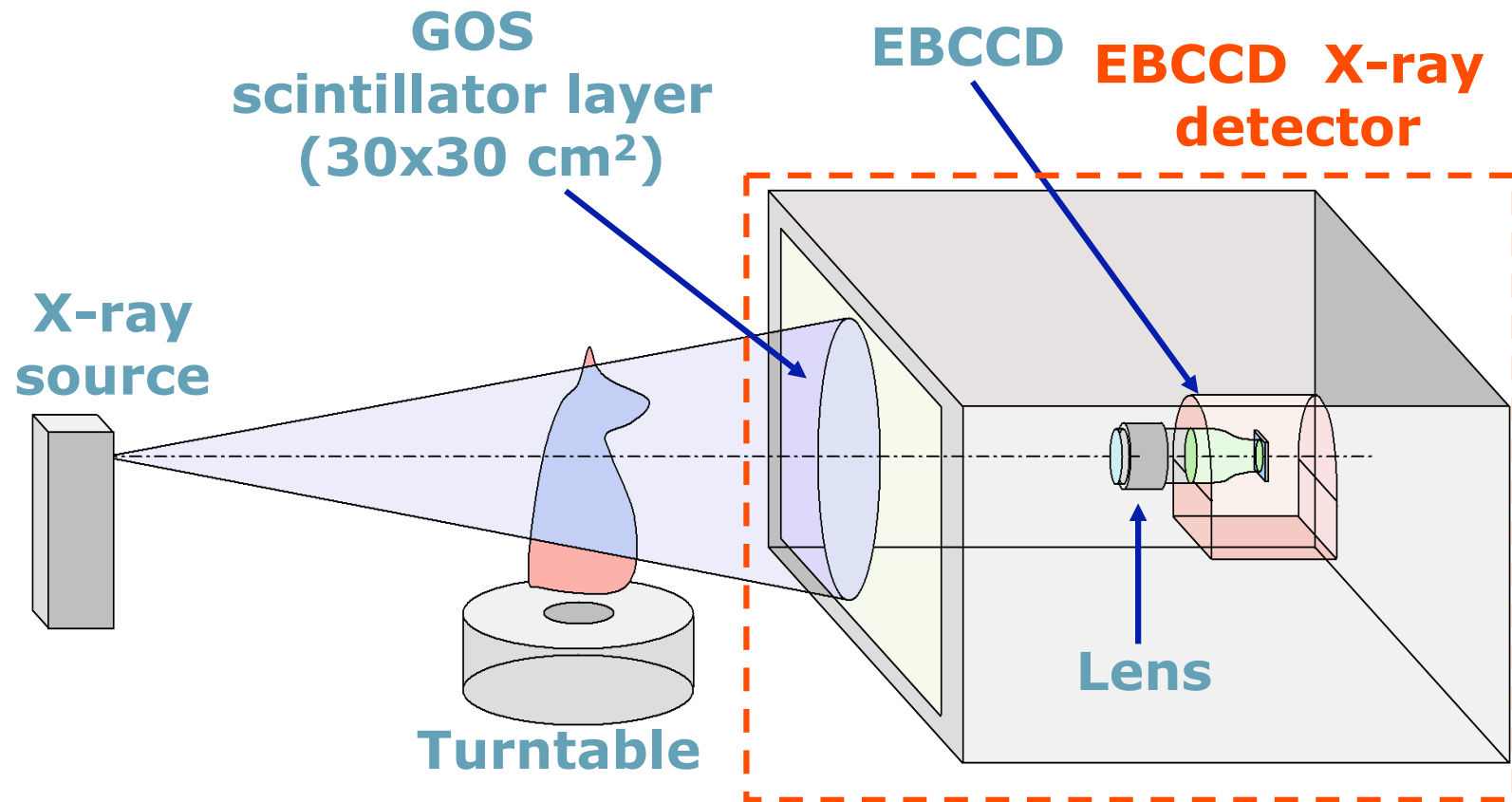
Sezione tomografica para-sagittale di una porzione del reperto fossile. Si nota l'M3 *in situ* con carie penetrante lo smalto e la dentina; sono anche bene apprezzabili la morfologia e le dimensioni della camera pulpare del dente.

Analisi di una porzione di mandibola fossile di oreopiteco

Ricostruzione



Sistema CT per oggetti di medie dimensioni



Analisi CT di un sarcofago egizio a forma di gatto con mummia

Dimensioni :
37 x 10 x 19.5 cm³

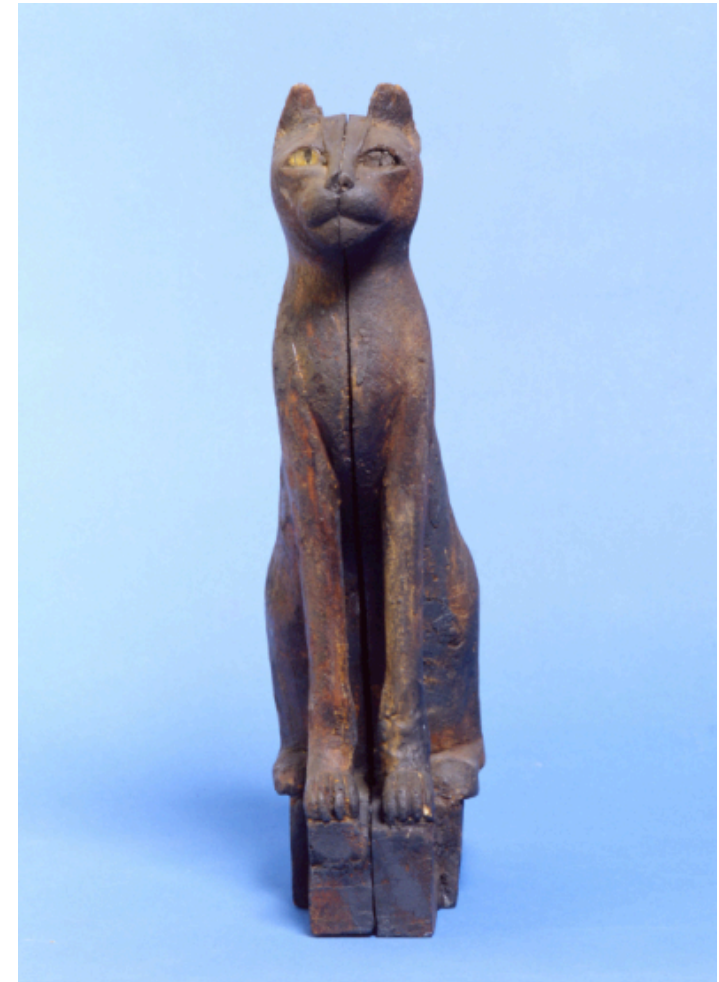
Parametri di set-up:

V : **70**
kVp

I : **3000 μ A**

NUM. ANGOLI: **360**

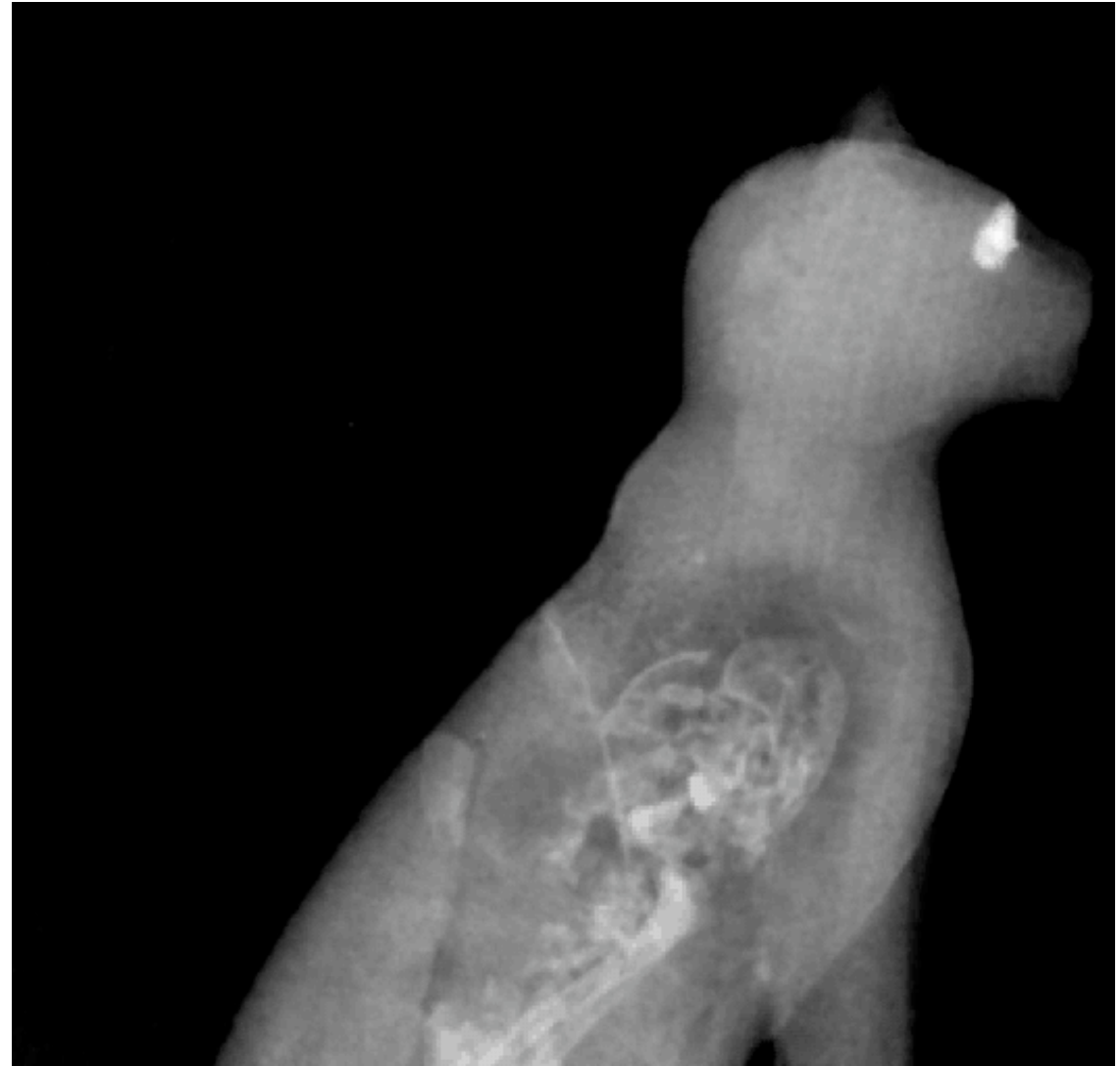
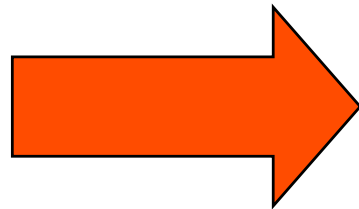
VOXEL: **600 μ m**



In collaborazione con il Museo Archeologico di Bologna

Analisi CT di un sarcofago egizio a forma di gatto con mummia

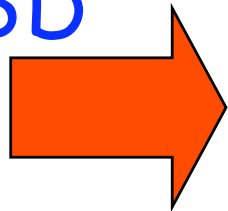
Sequenza radiografie



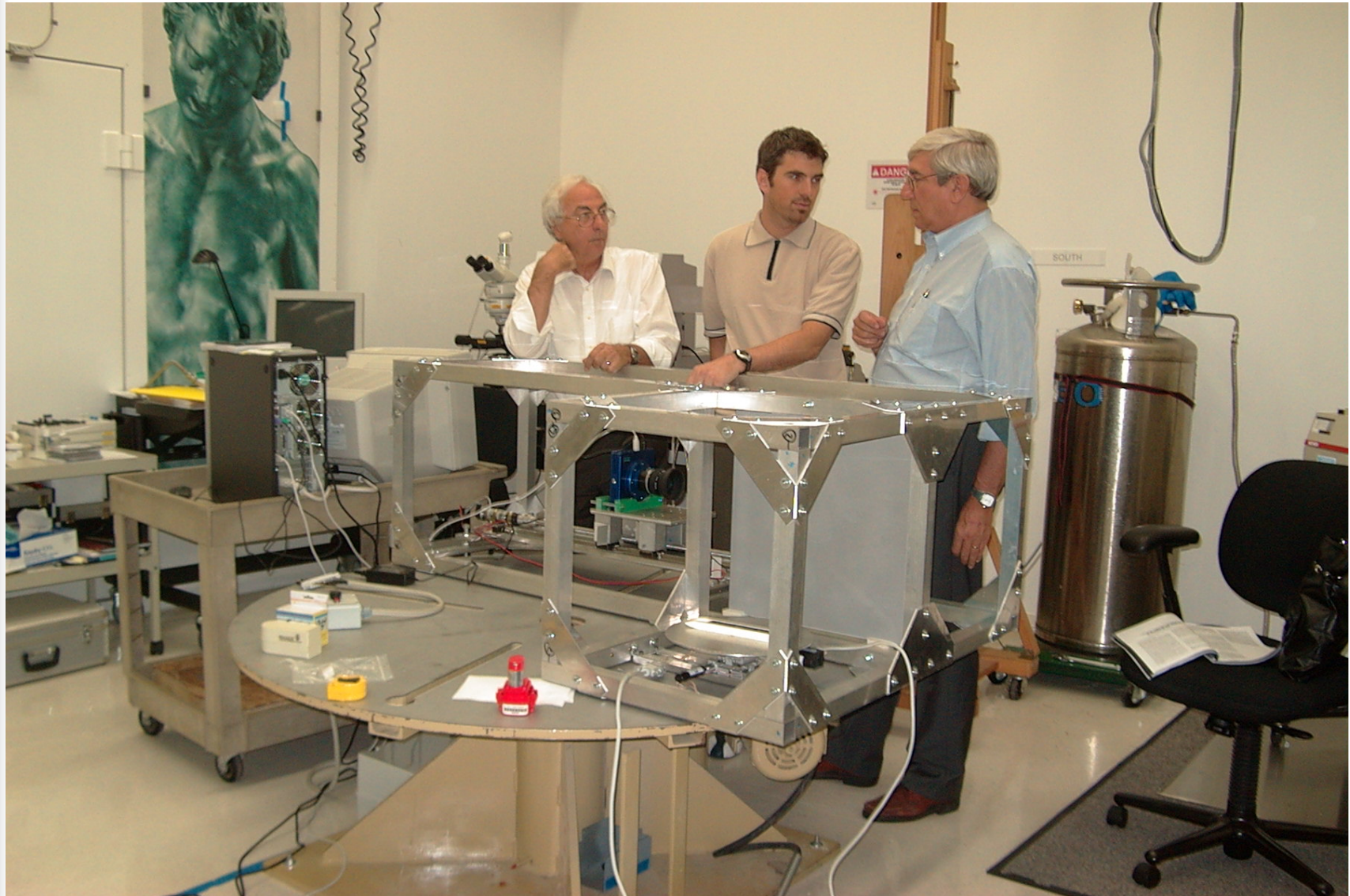
Analisi CT di un sarcofago egizio a forma di gatto con mummia

Ricostruzione

3D



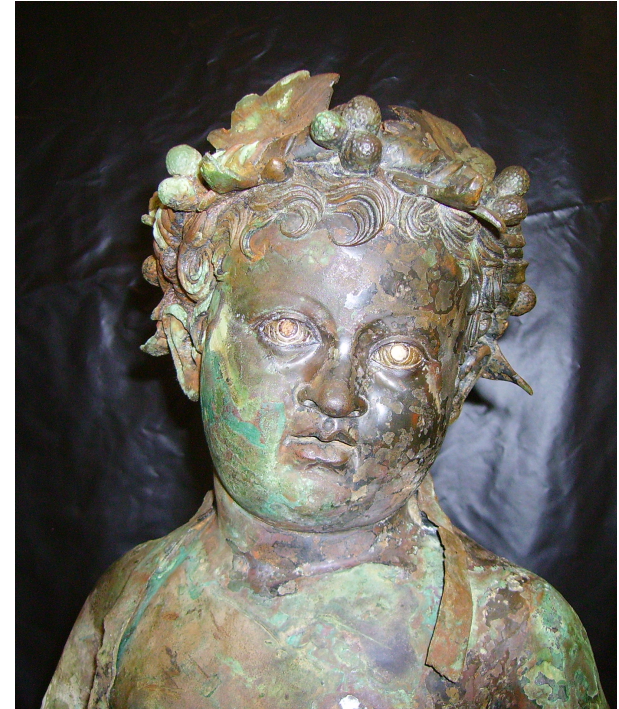
Realizzazione di un sistema CT per il Getty Conservation Institute di Los Angeles



Eros in bronzo di epoca romana

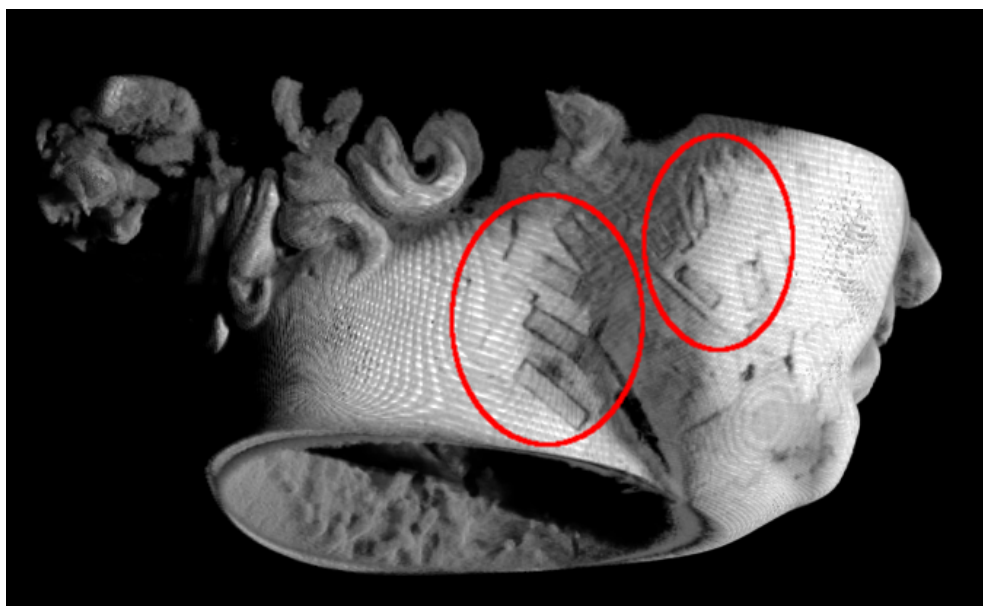


- **Bronzo Romano
I secolo d.C.**



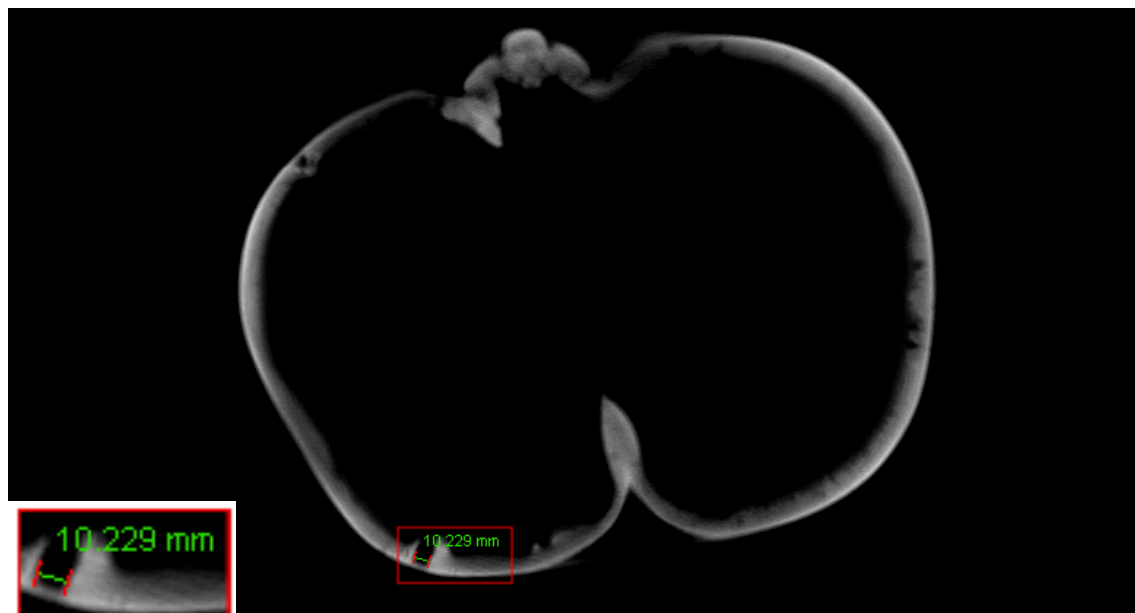
Altezza: 63.5 cm

**In collaborazione con: Getty
Conservation Institute (Los Angeles)**

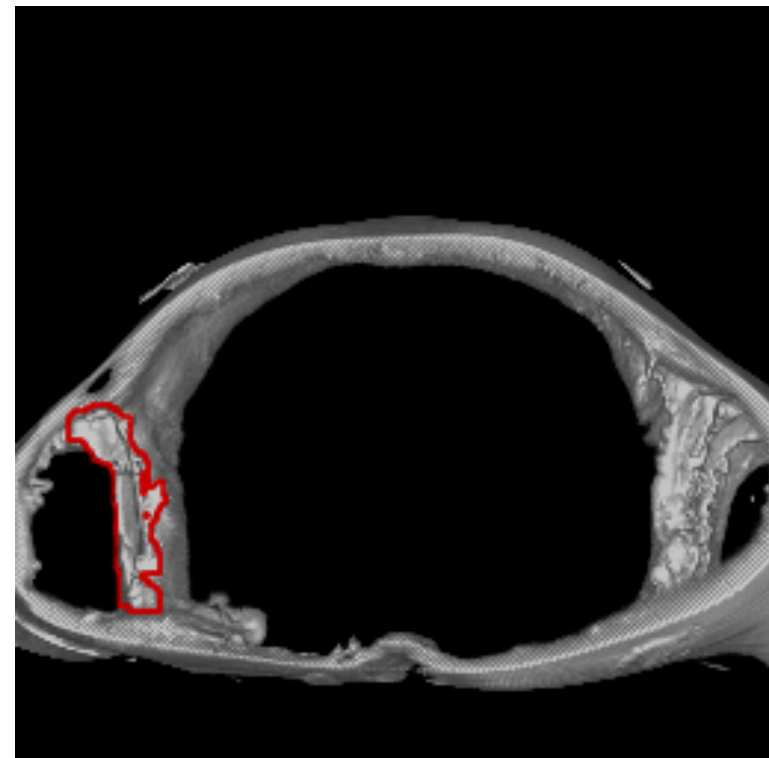
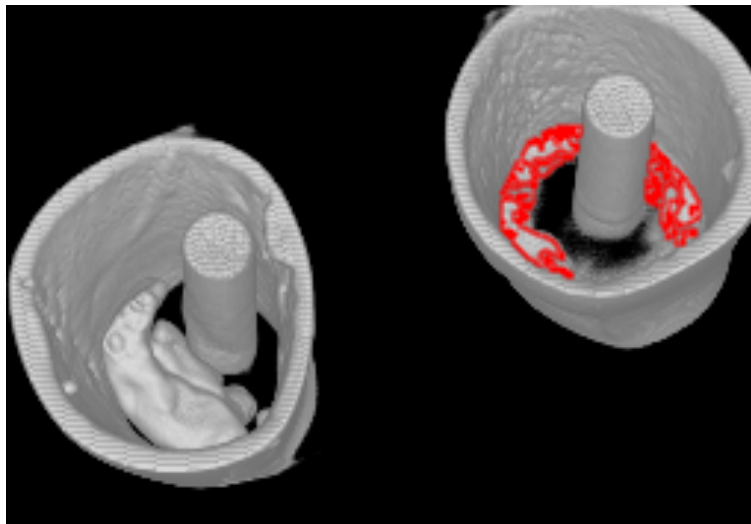
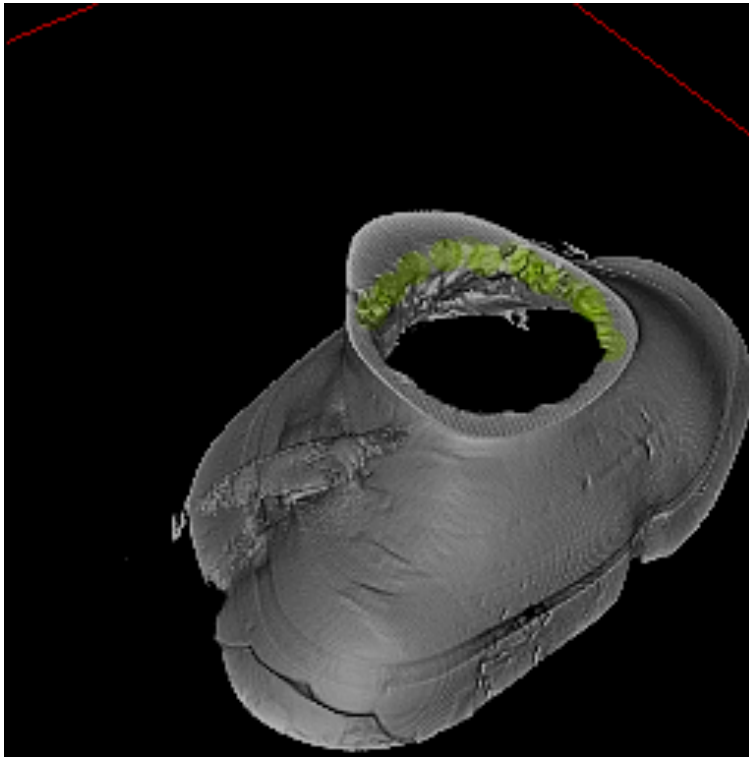


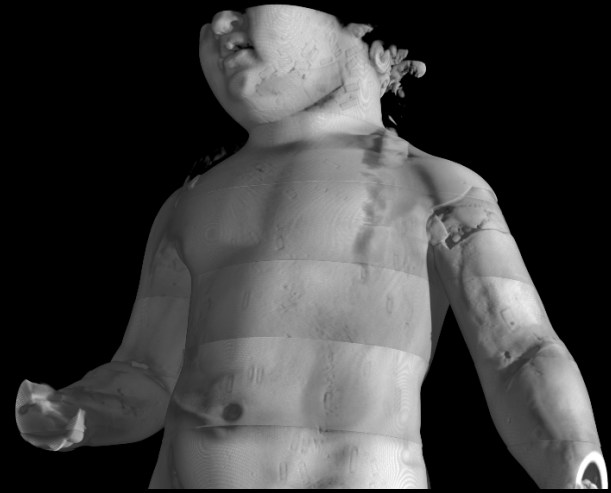
**Particolare della testa
che mostra la presenza
di tasselli riparatori.**

**Slice assiale in
corrispondenza del
bacino: si evidenzia
nel gluteo sinistro
l'assottigliamento
dello strato di bronzo
in corrispondenza di
un tassello
riparatore.**



La presenza di creste di fusione permette di stabilire che per la realizzazione dell'Eros fu utilizzata la "tecnica di fusione a cera persa indiretta".







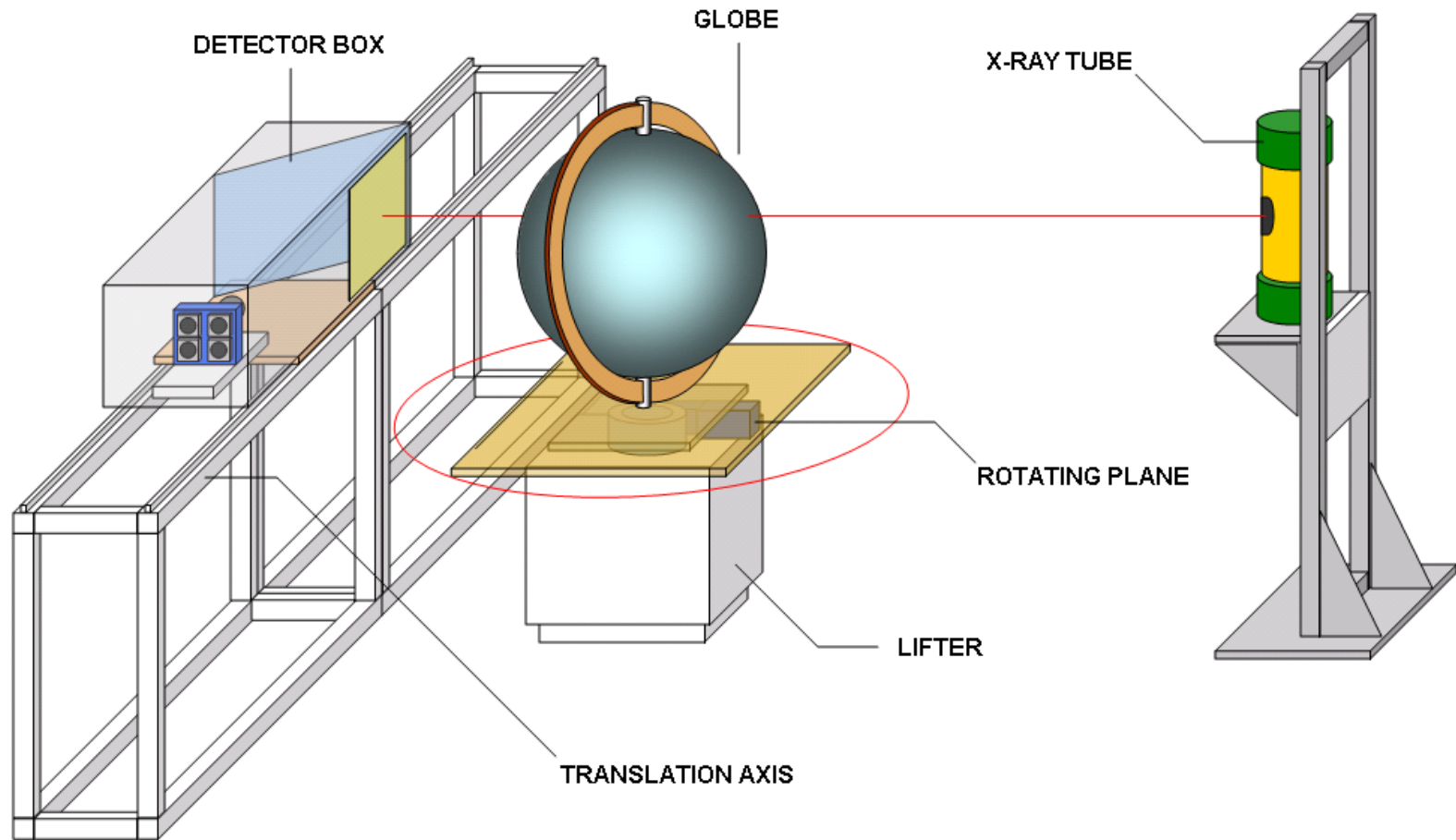
Tomografia 3D di oggetti di grandi dimensioni

Globo celeste di Vincenzo Coronelli, conservato presso la Biblioteca Comunale di Faenza (RA).



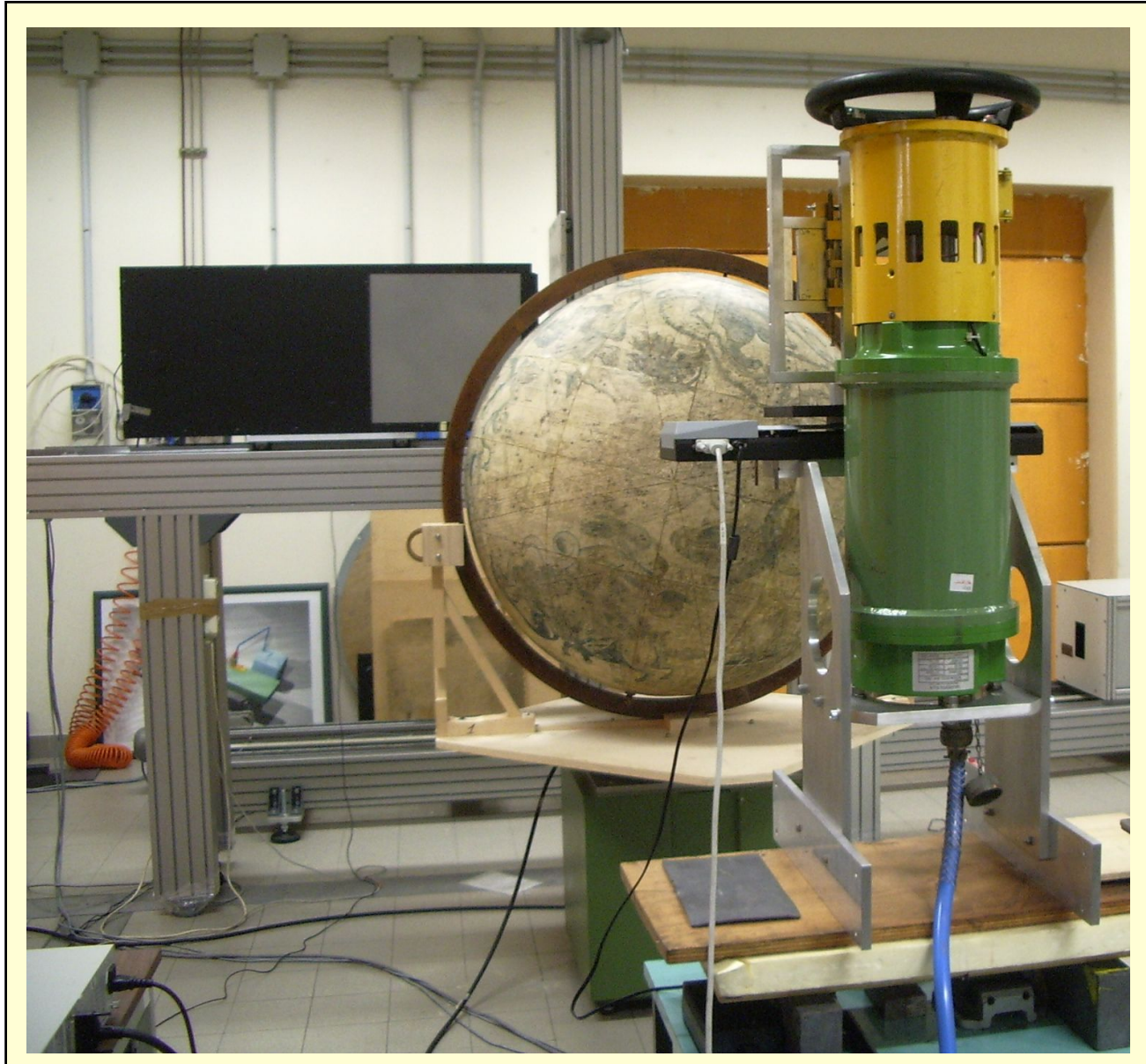
**Vincenzo Coronelli
(1650 - 1718)**

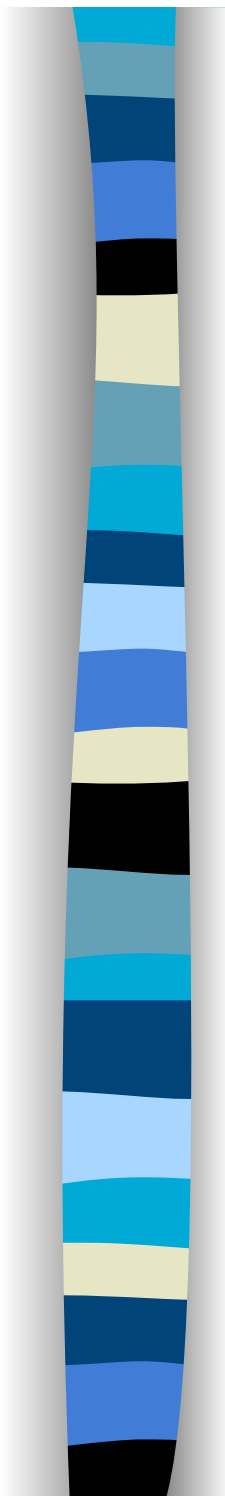
Schema del sistema tomografico



A destra il tubo a raggi X, al centro il globo sulla piattaforma rotante e a sinistra il sistema di rivelazione.

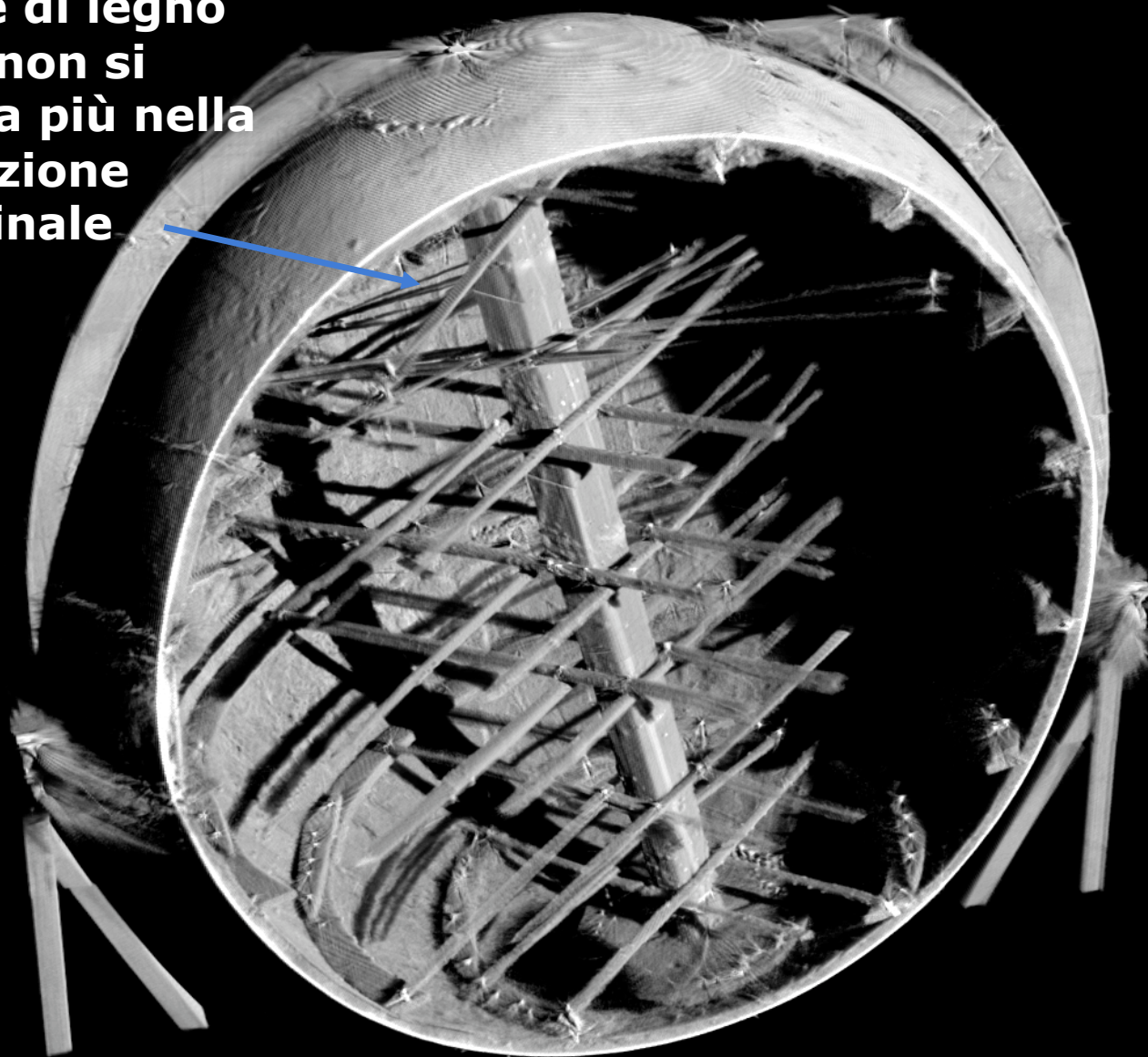
Set-up sperimentale



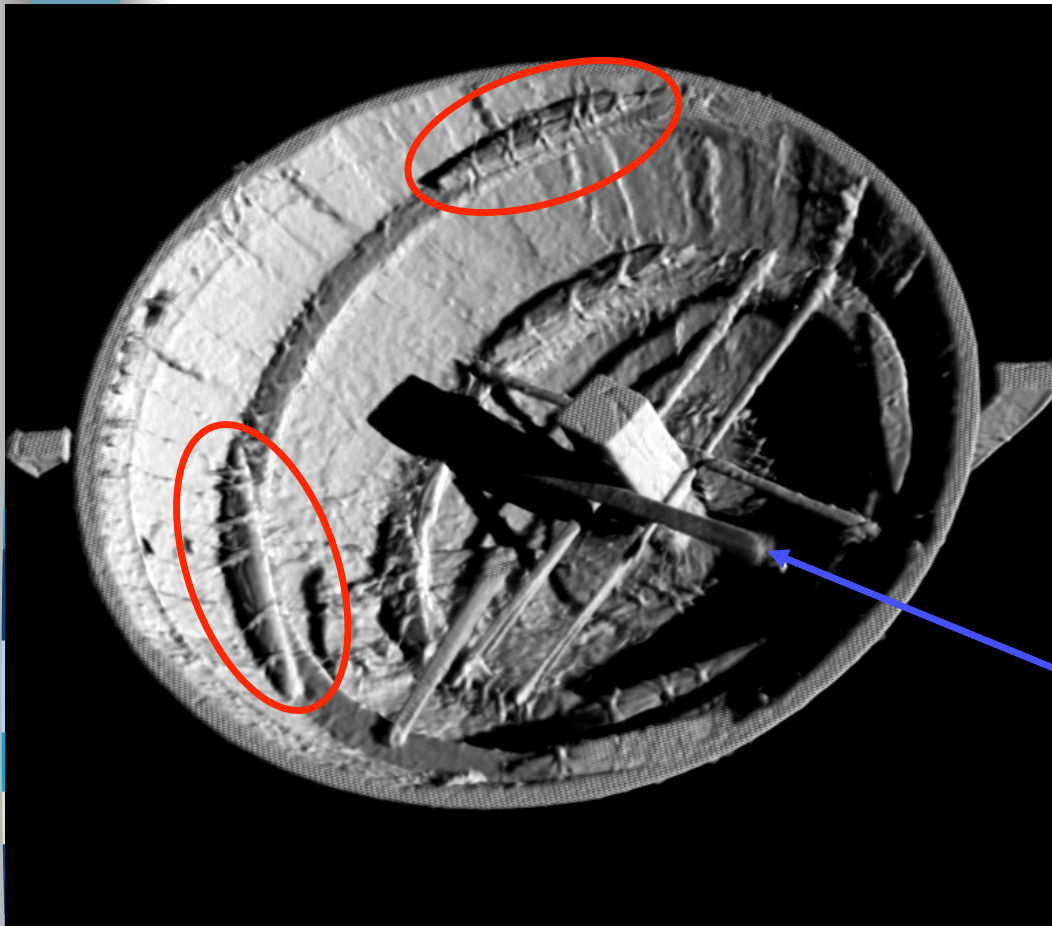


QuickTime™ and a
decompressor
are needed to see this picture.

**Asse di legno
che non si
trova più nella
posizione
originale**



Ricostruzione tomografica 3D della calotta polare superiore



QuickTime™ and a decompressor are needed to see this picture.

Asse di legno danneggiata

La Madonna del Cardellino di Raffaello



- **1506 circa:** a quanto afferma Vasari, la Madonna del Cardellino fu dipinta da Raffaello in occasione delle nozze dell'amico Lorenzo Nasi.
- **1548 circa:** palazzo Nasi crollò insieme ad altri edifici a causa dello smottamento del monte di San Giorgio. In quella occasione l'opera rimase sotto le rovine, subendo notevoli danni.

“E così rimasero i pezzi di quella che poi ritrovati fra i calcinacci, furono da Batista suo figliuolo, amorevolissimo di tale arte, fatti rimettere insieme in quel miglior modo che si potette.”

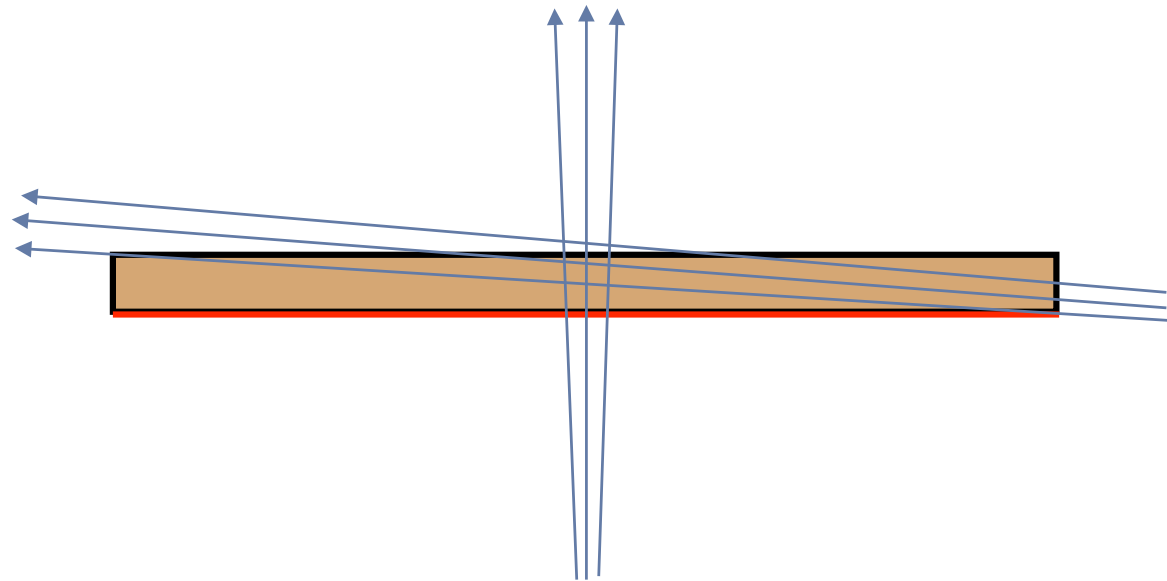
107x77 cm²

In collaborazione con: Opificio delle Pietre Dure (Firenze)

Il problema dell'assorbimento

Spessore minimo: $s = 3.5$ cm

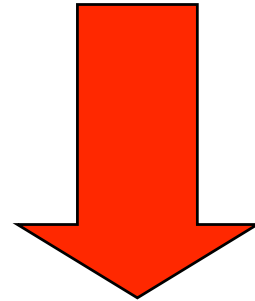
Spessore
massimo:
 $d = 77$ cm



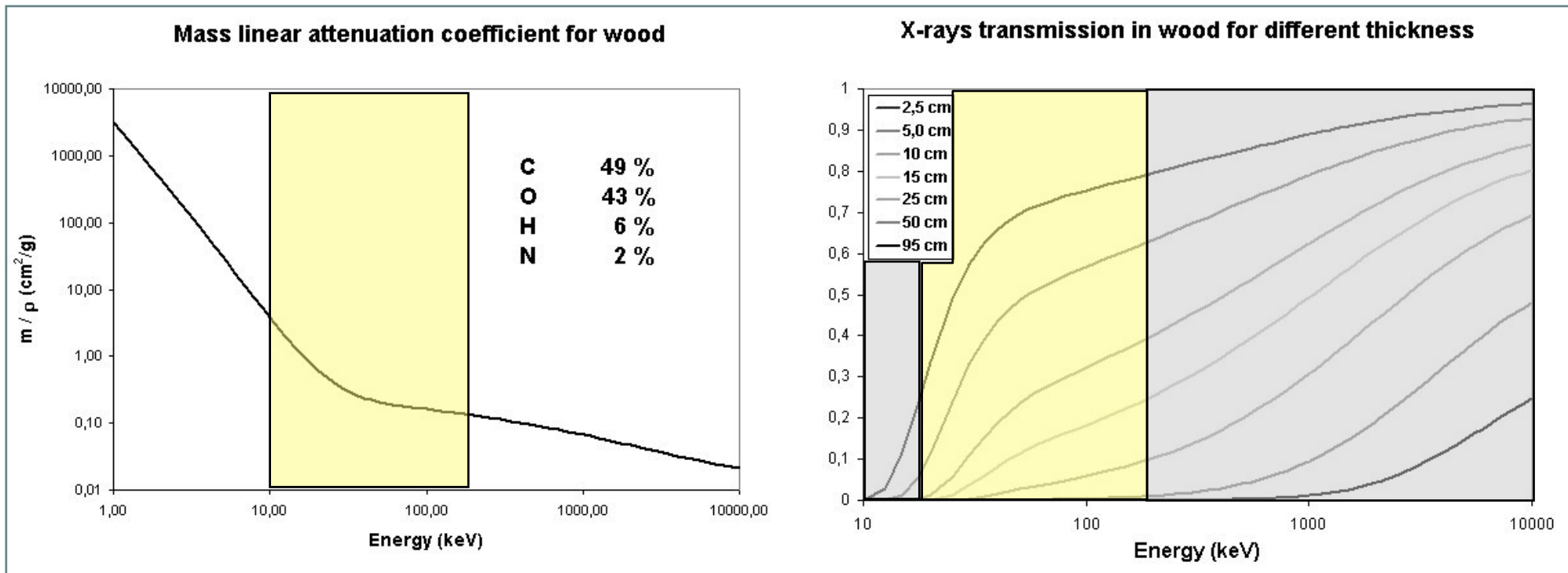
Il problema dell'assorbimento

Valutazione della composizione media del legno, componenti principali:

Carbonio	49 %
Ossigeno	43 %
Idrogeno	6 %
Azoto	2%

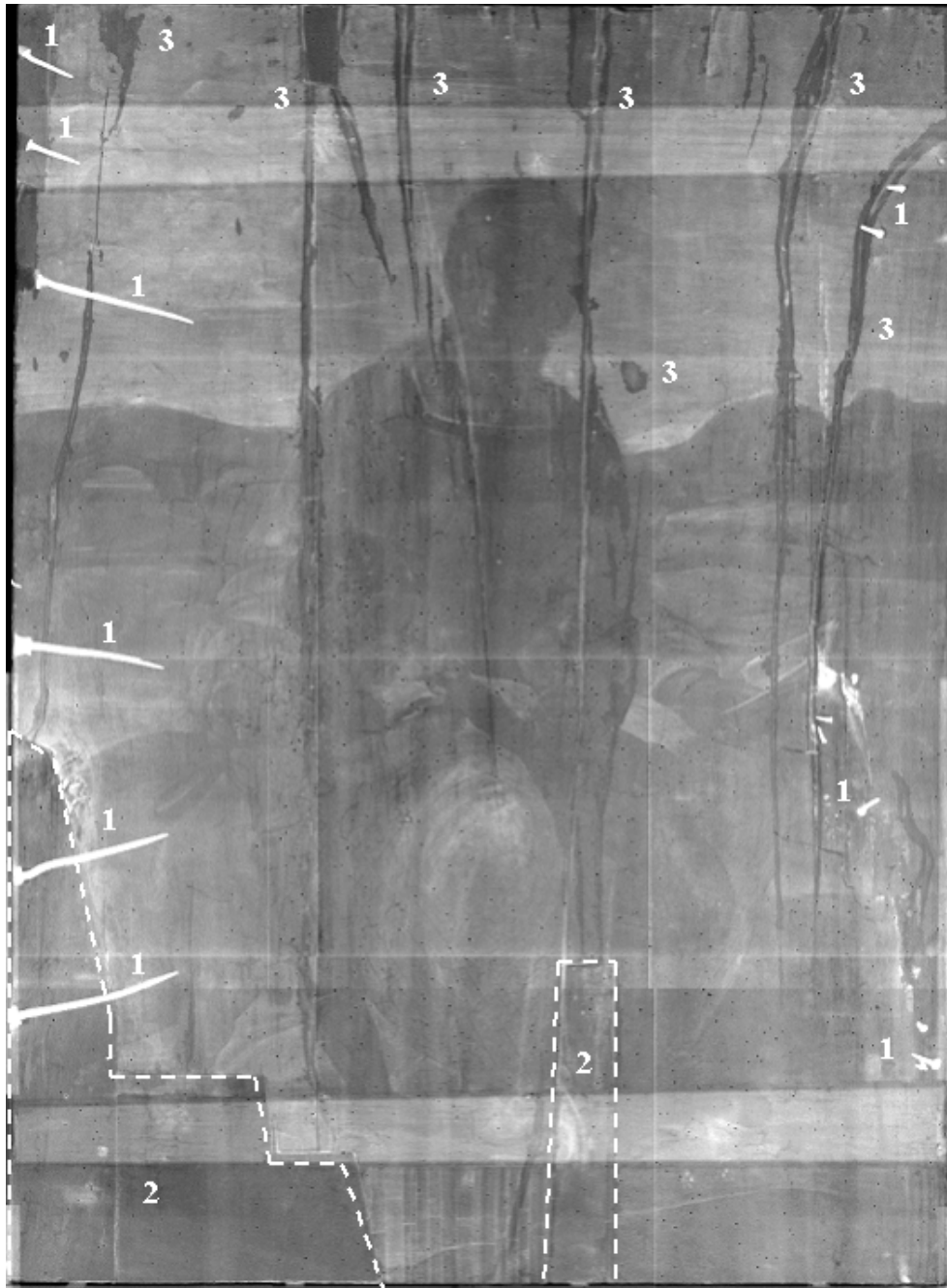


$$I = I_0 e^{-\mu x}$$



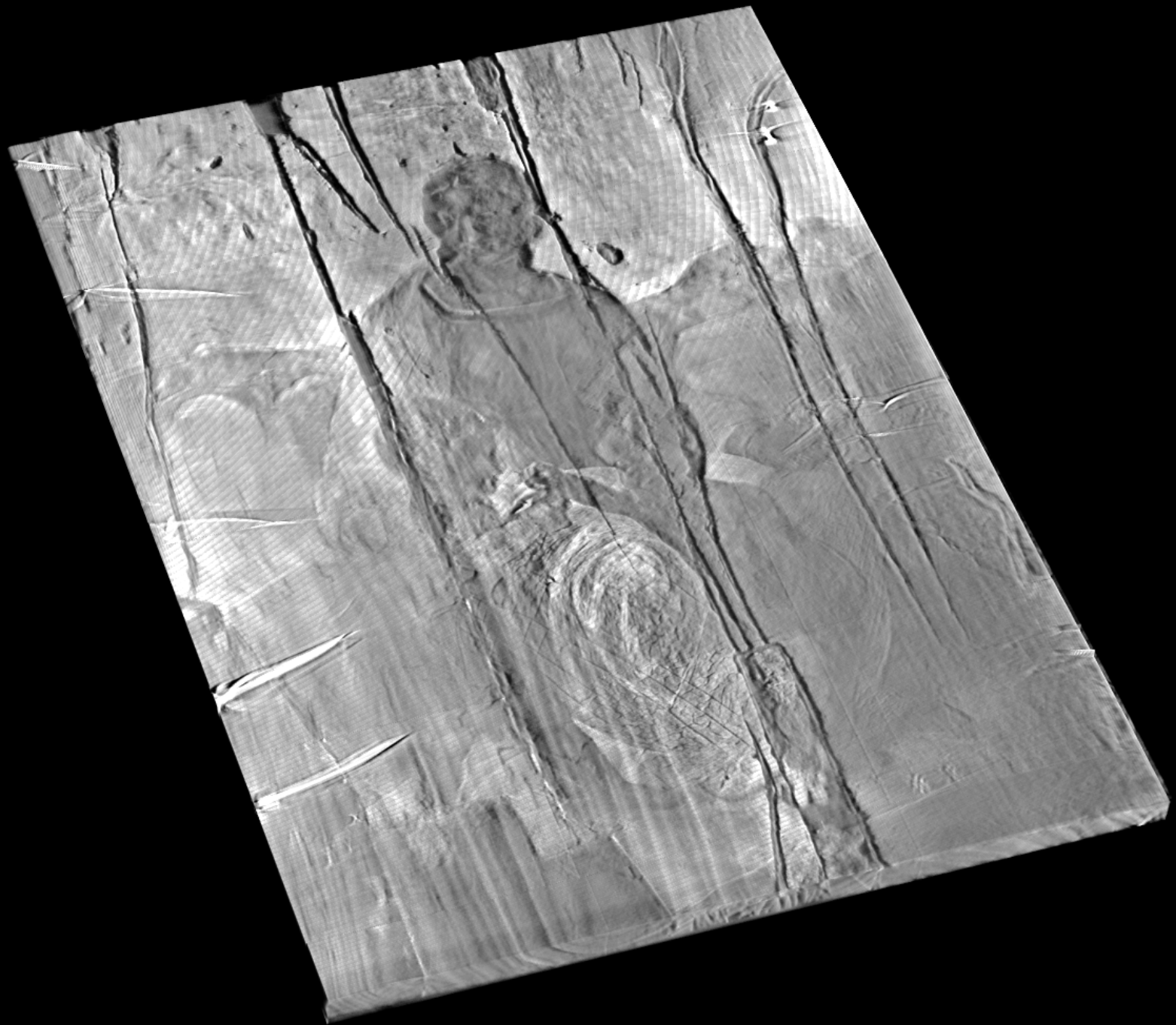
Il sistema tomografico all'opera



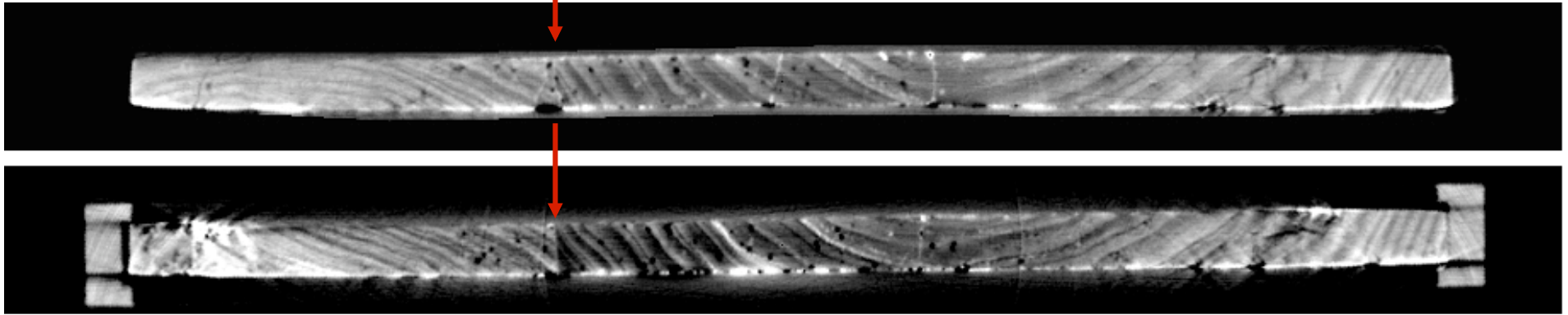


Radiografia digitale del dipinto che mostra la presenza di:

- 1) grossi chiodi, usati per ricomporre i diversi frammenti della tavola**
- 2) inserti di legno ridipinti**
- 3) fratture della tavola e lacune dello strato pittorico.**

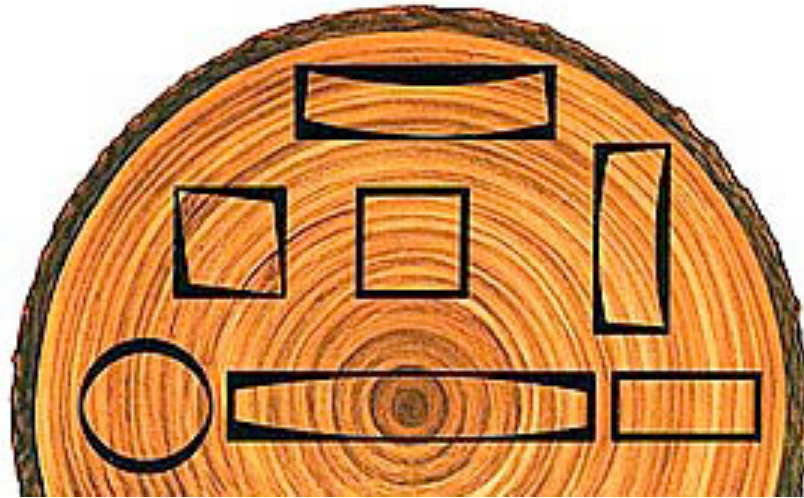


Risultati

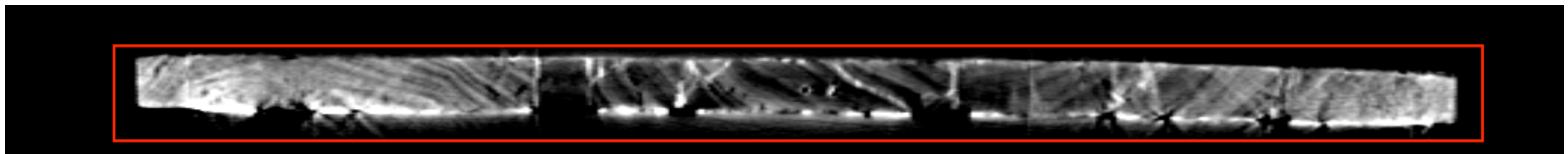


Il supporto è costituito da due tavole di diverse dimensioni: 24 cm e 53 cm circa.

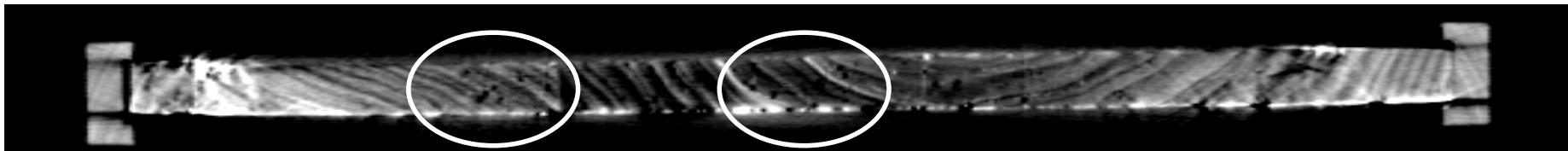
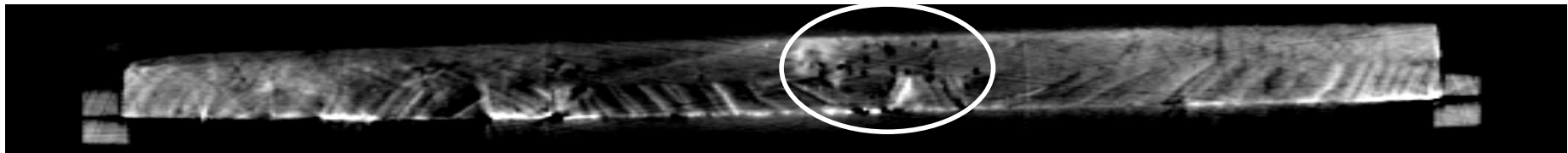
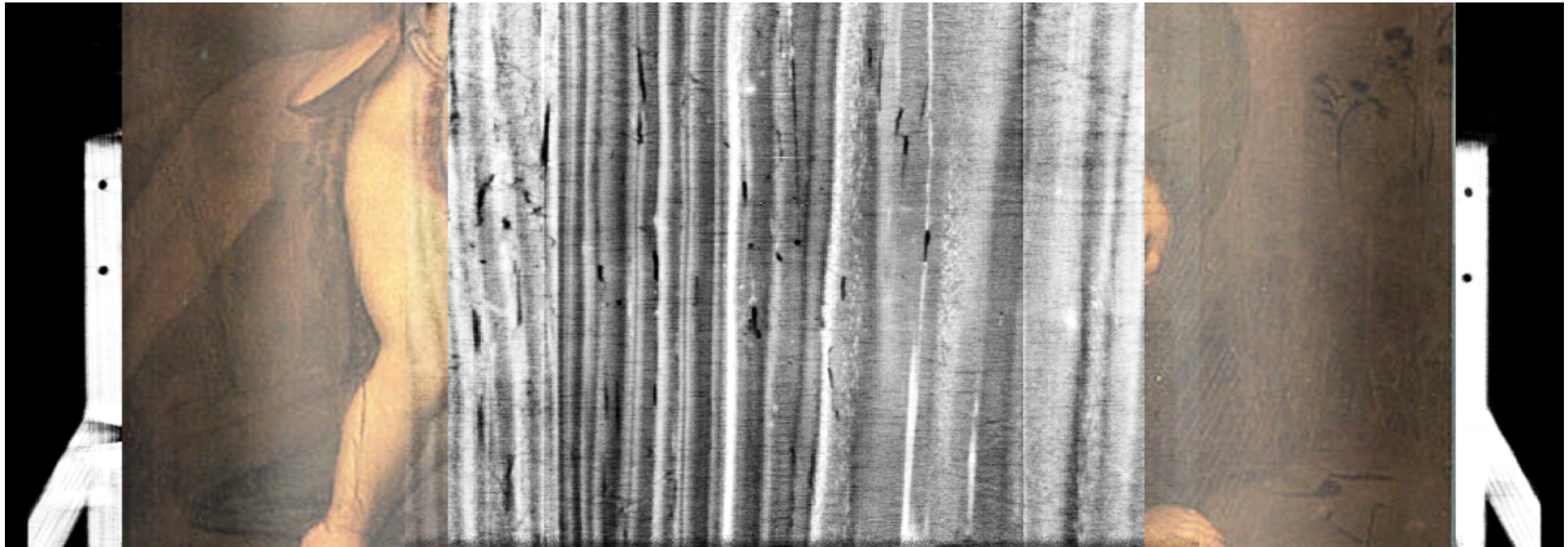
- ✓ **la più piccola è una tavola tangenziale con anelli di accrescimento abbastanza stretti.**
- ✓ **la più grande è anch'essa una tavola tangenziale, ma ha la particolarità di essere posta al verso, poiché lo strato pittorico poggia sulla faccia esterna della tavola, contravvenendo così ad una regola pressochè costante.**



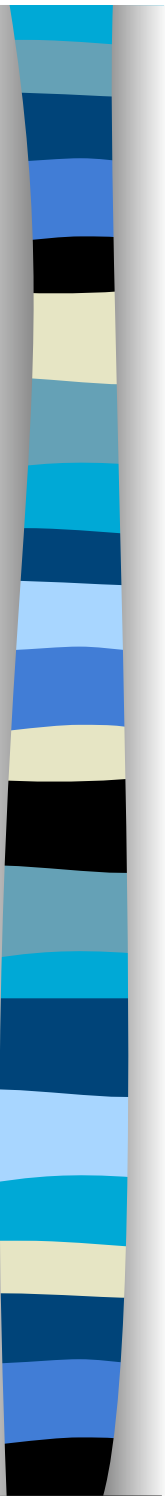
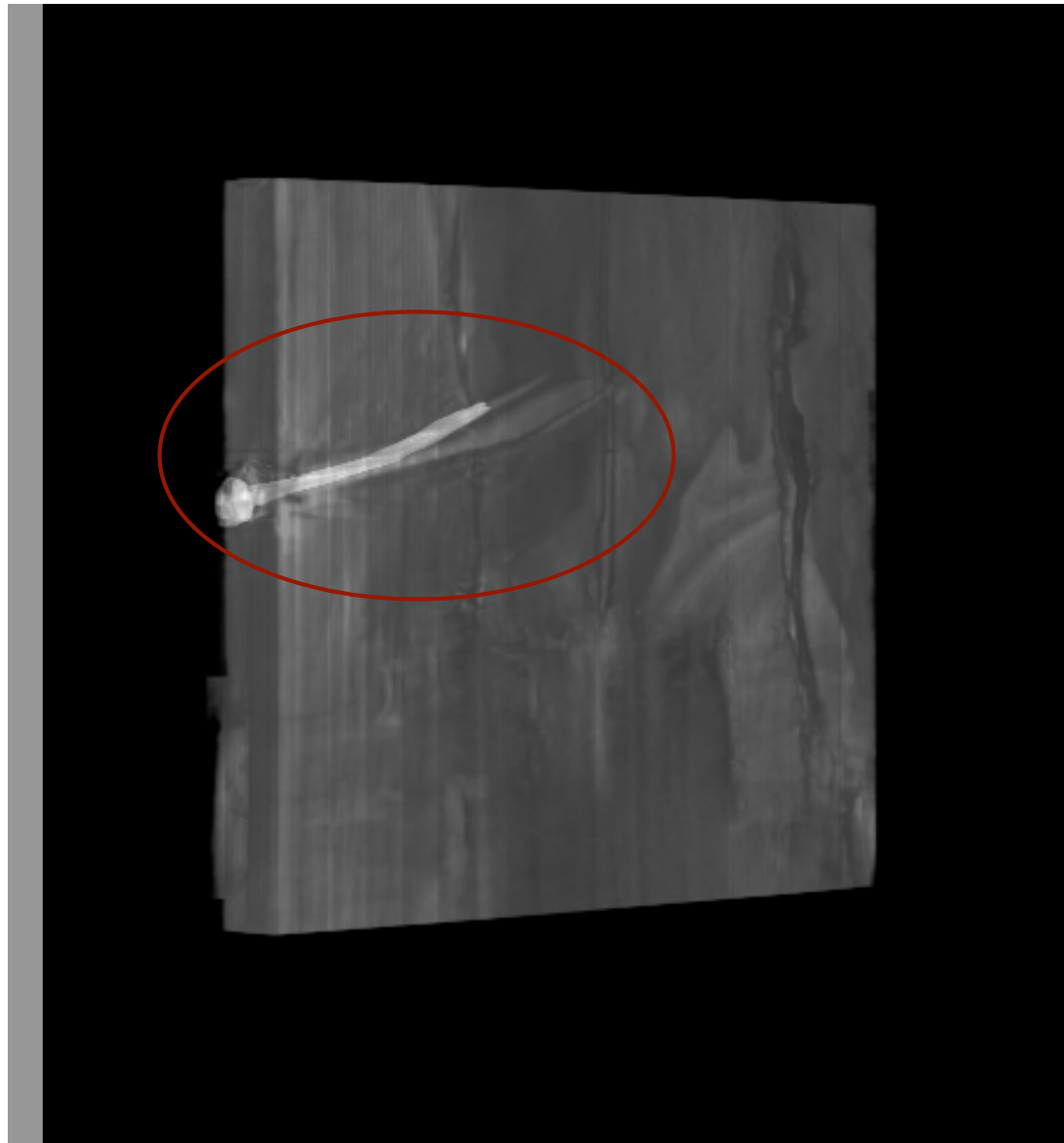
- **Aver posto le tavole con le facce contrapposte ha provocato una particolare deformazione del supporto ligneo.**



Insetti xilofagi



I chiodi





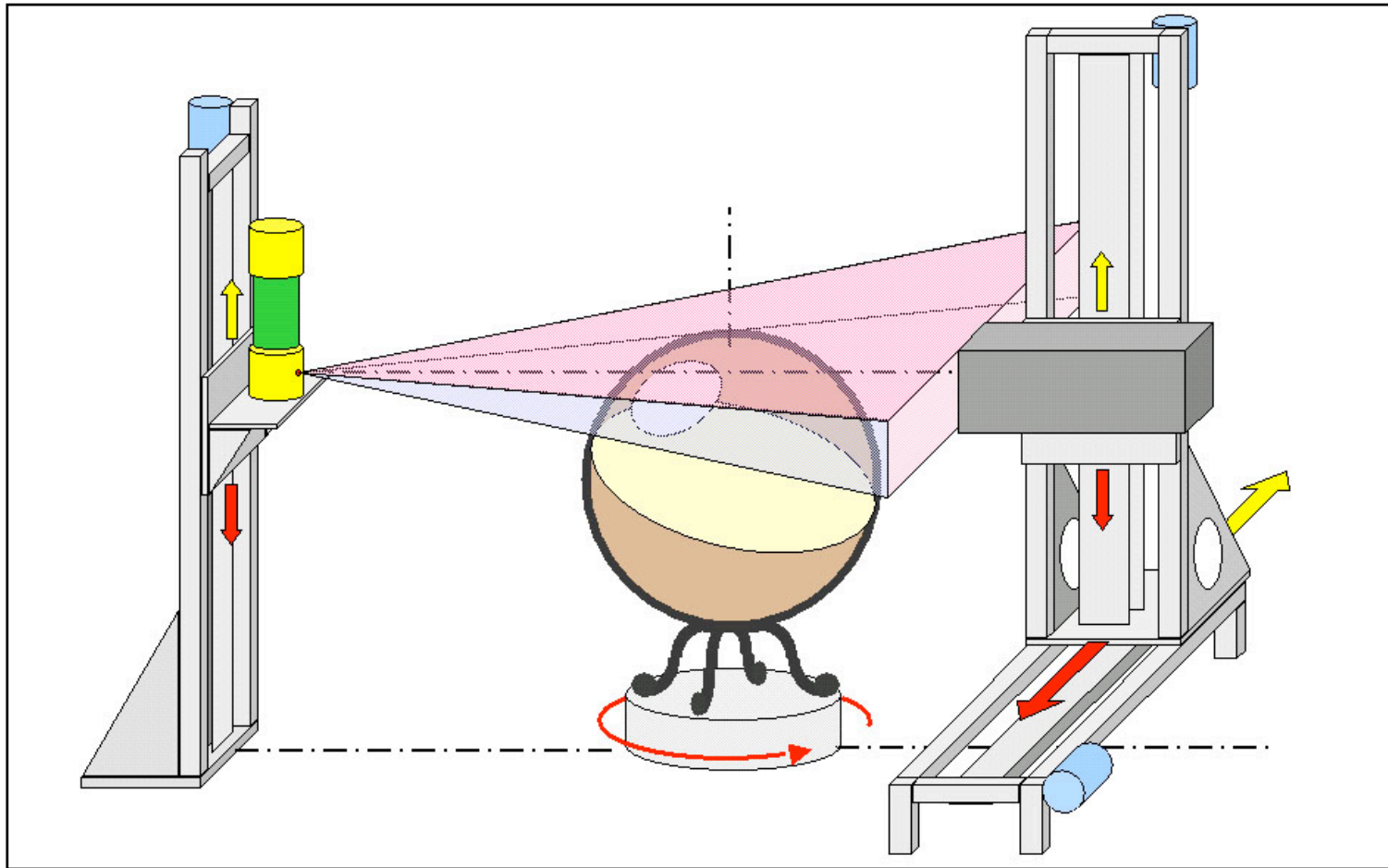
**Tomografia
Computerizzata del
globo terrestre di
Egnazio Danti
Palazzo Vecchio -
Firenze**

La Sala delle “Carte geografiche” a Palazzo Vecchio con il globo realizzato dal monaco domenicano Egnazio Danti nel 1567, su commissione di Cosimo I de’ Medici, duca di Firenze.



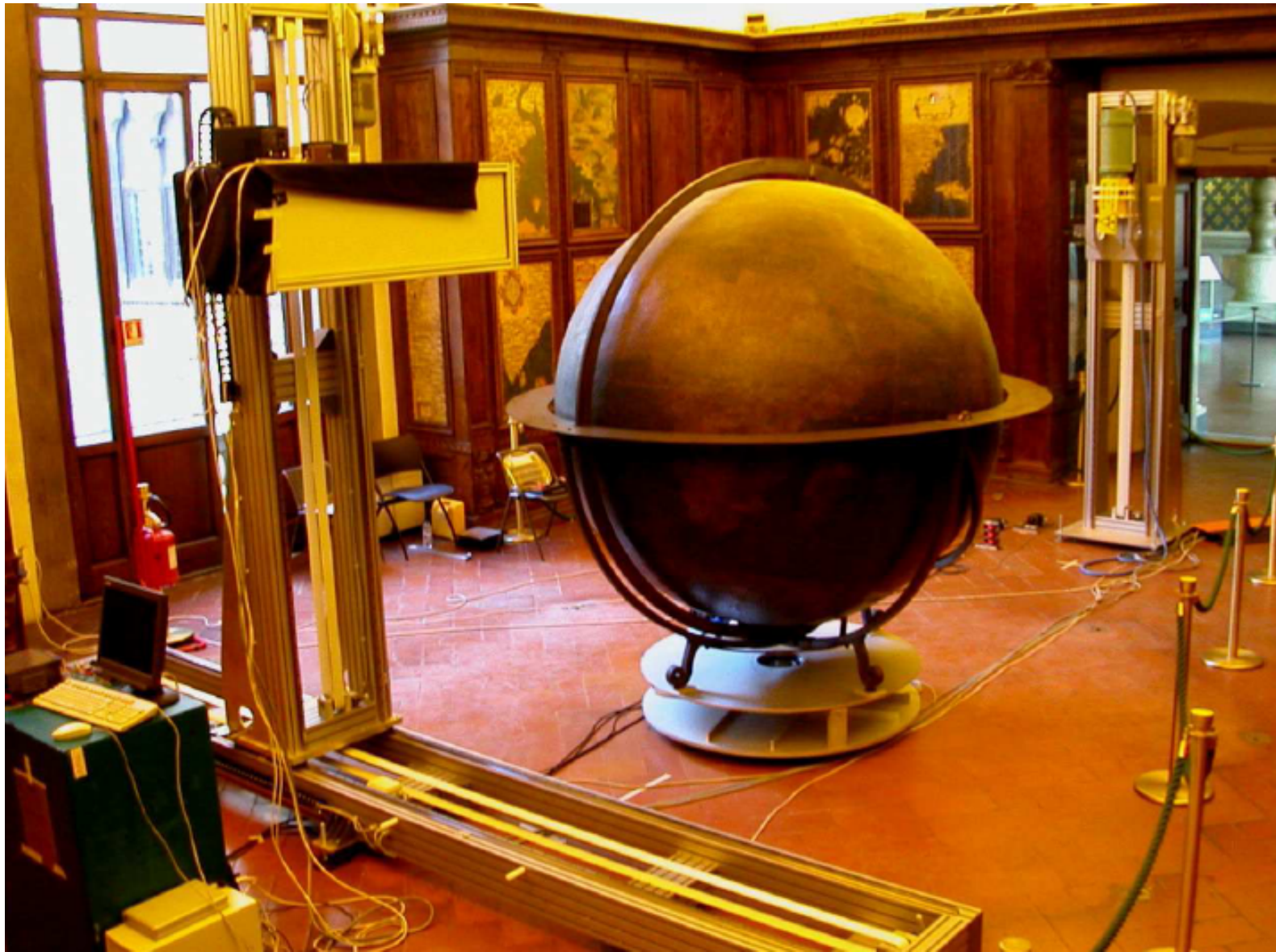
1536 - 1586

Schema dell'apparato sperimentale

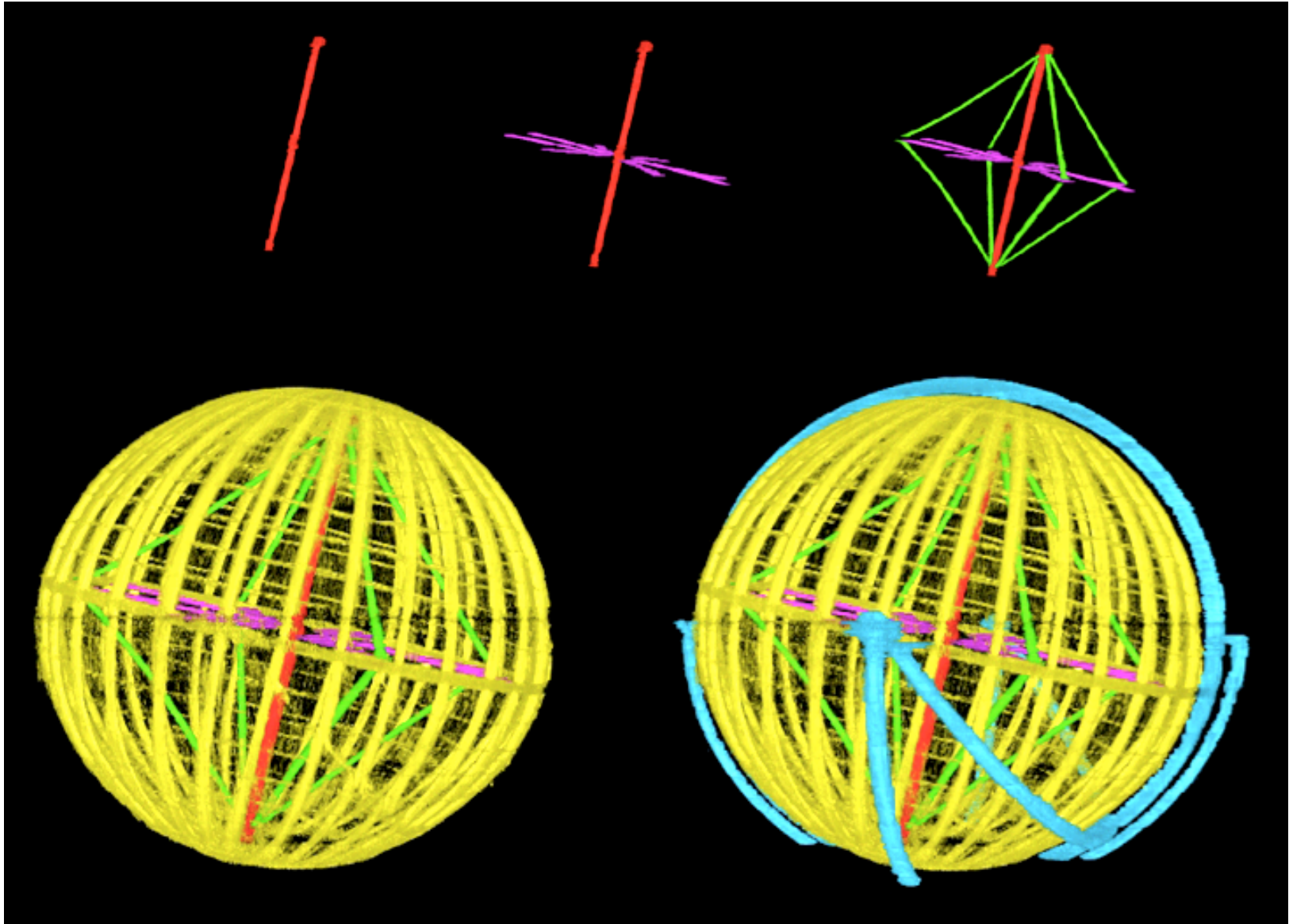


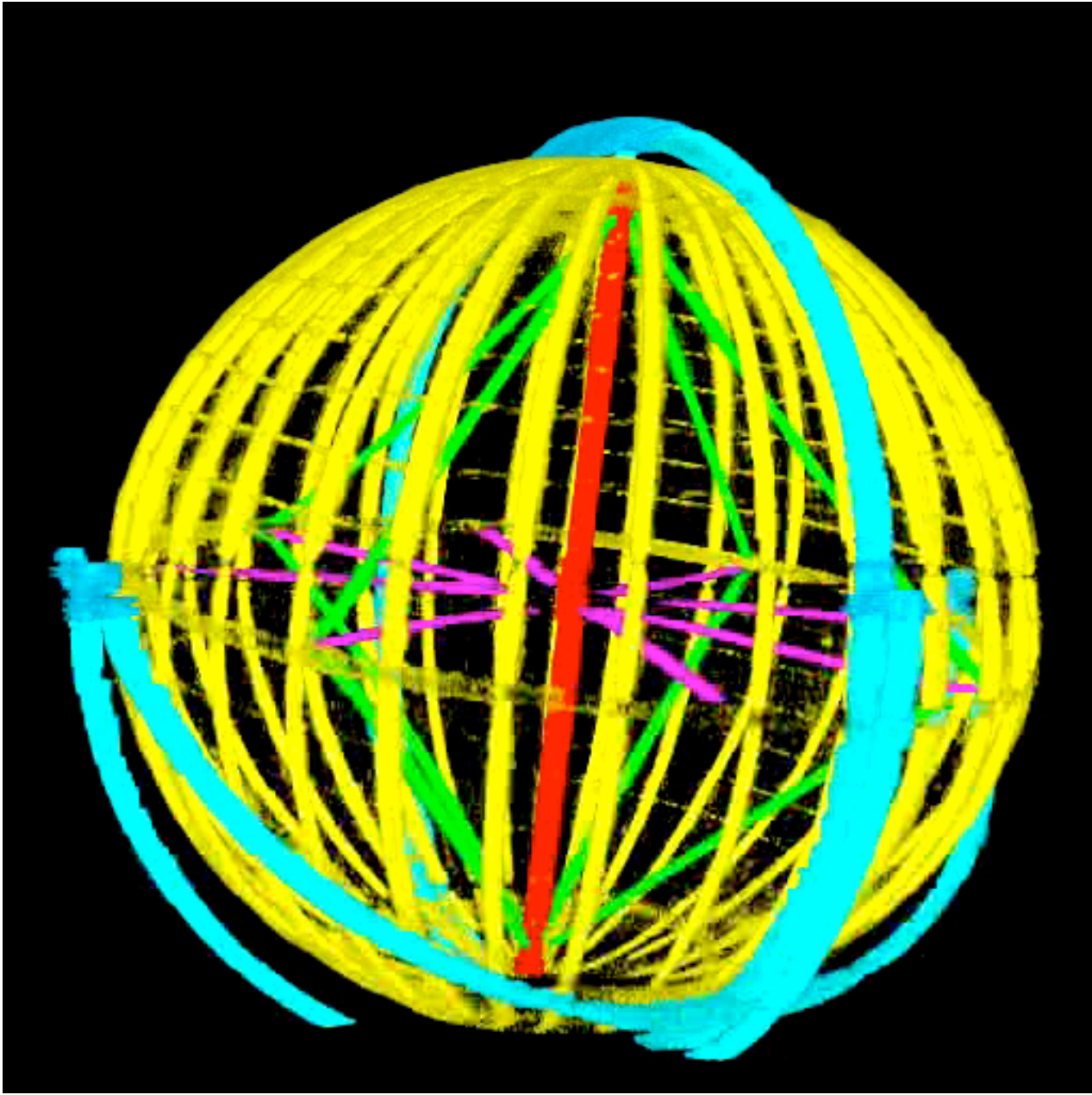
A sinistra il tubo a raggi X, al centro il globo sulla piattaforma rotante e a destra il rivelatore.

Il set-up sperimentale

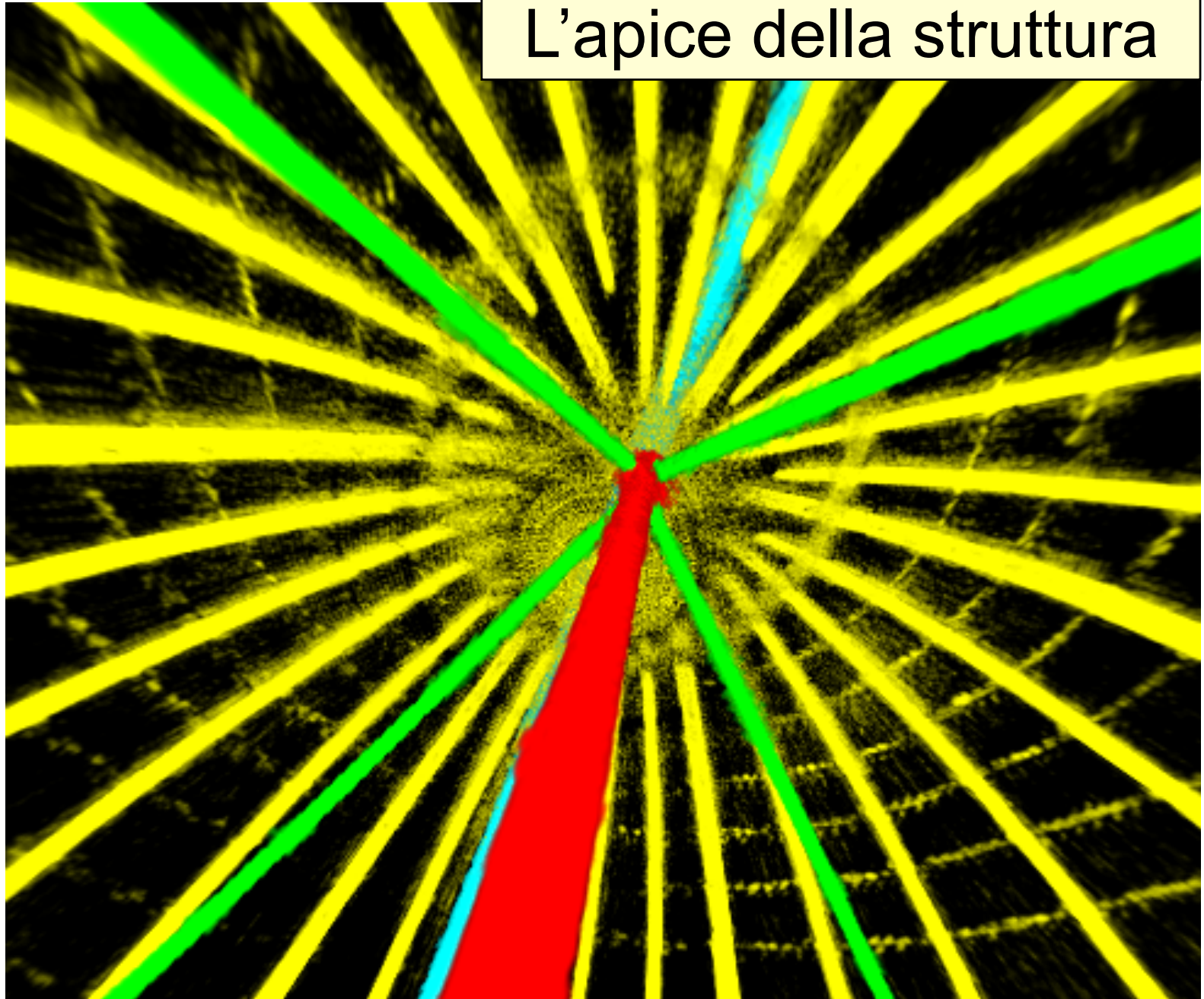


Elementi della struttura

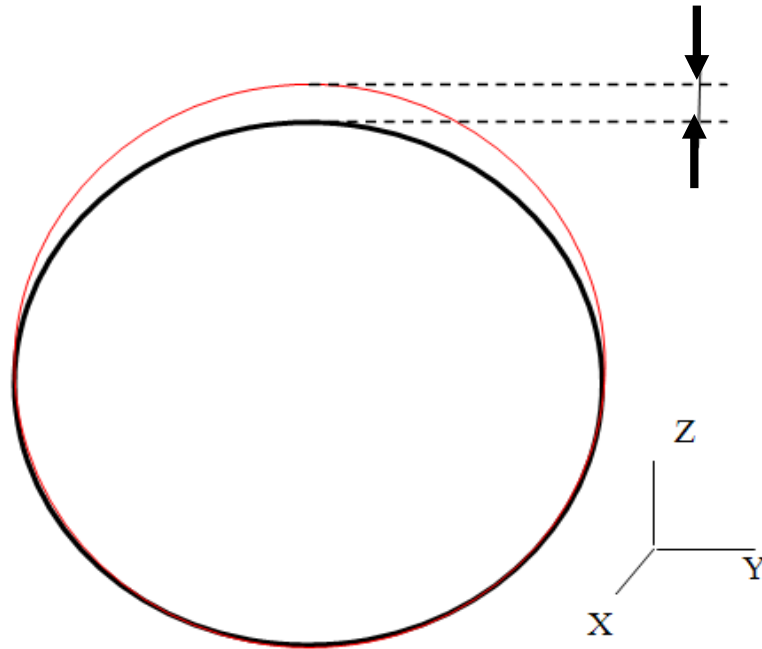




L'apice della struttura

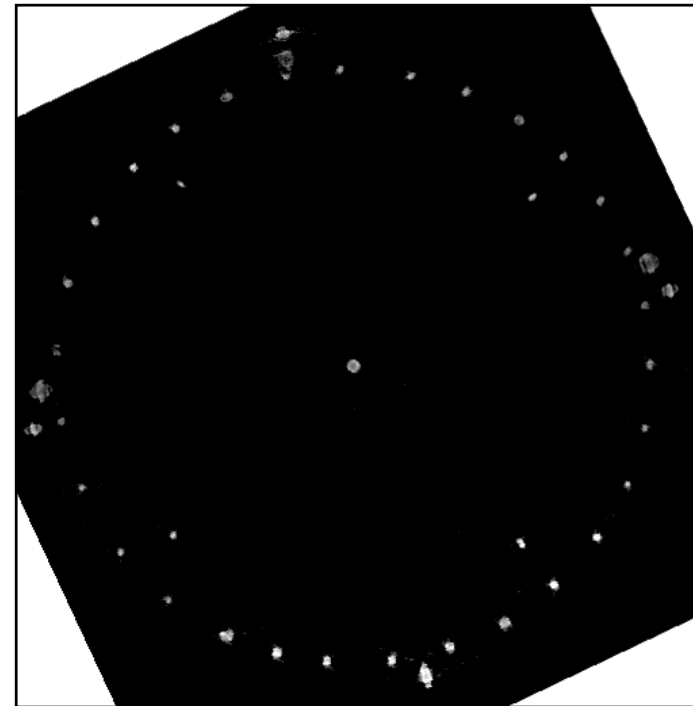


Analisi della struttura

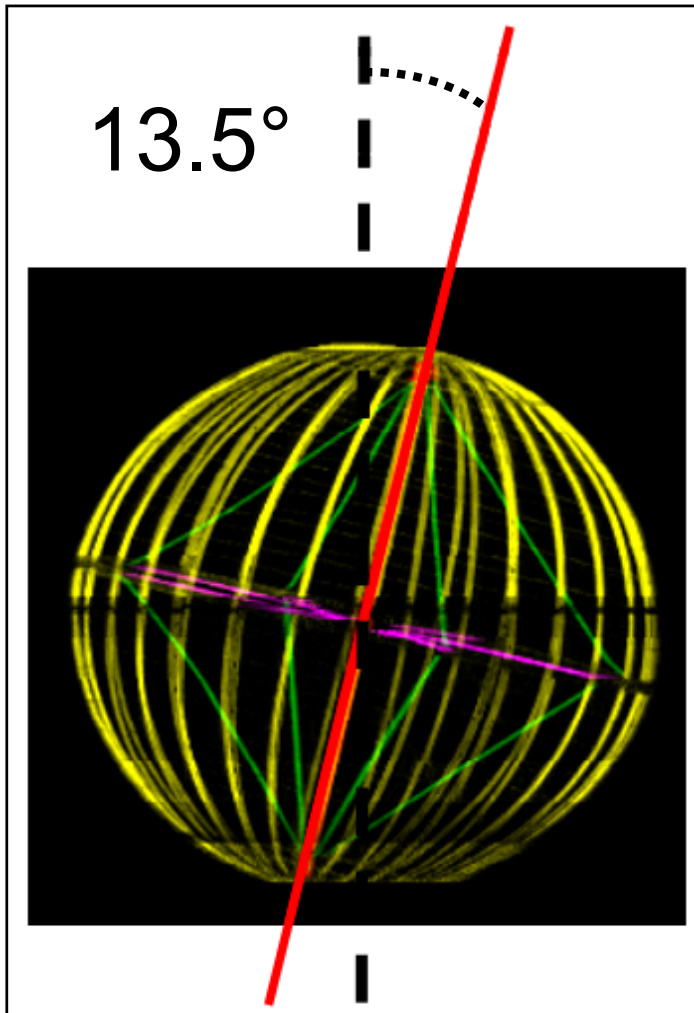


Il globo non è una sfera perfetta, infatti è collassato di circa di circa 10 cm

30 meridiani,
ciascuno distanziato
di 12°



Analisi della struttura



Inclinazione asse
(terra 23.45°)

Il globo è fatto
principalmente di ferro



Peso calcolato del ferro:

TOTALE: ~608 Kg

INTERNO: ~350 Kg

il Kongo Rikishi e il Tamon Ten



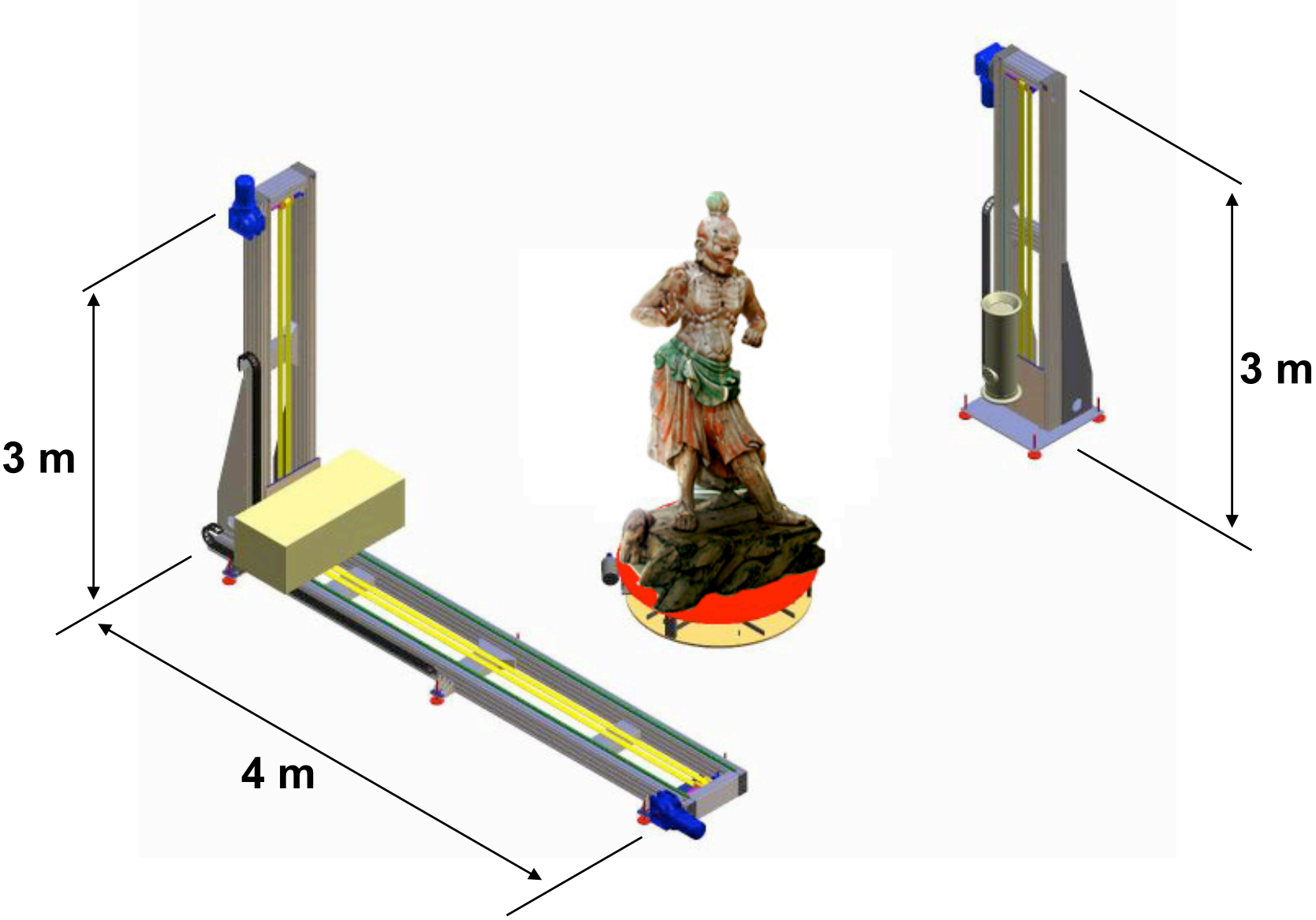
Kongo Rikishi



Tamon Ten

**In collaborazione con: Centro di Conservazione e
Restauro "La Venaria Reale" (Torino)**

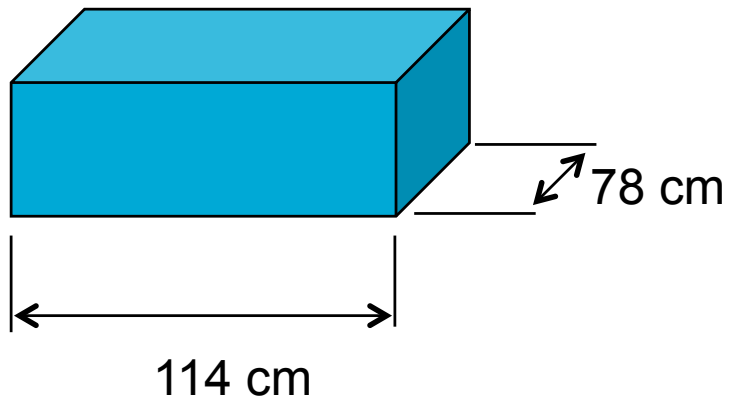
Schema del sistema tomografico



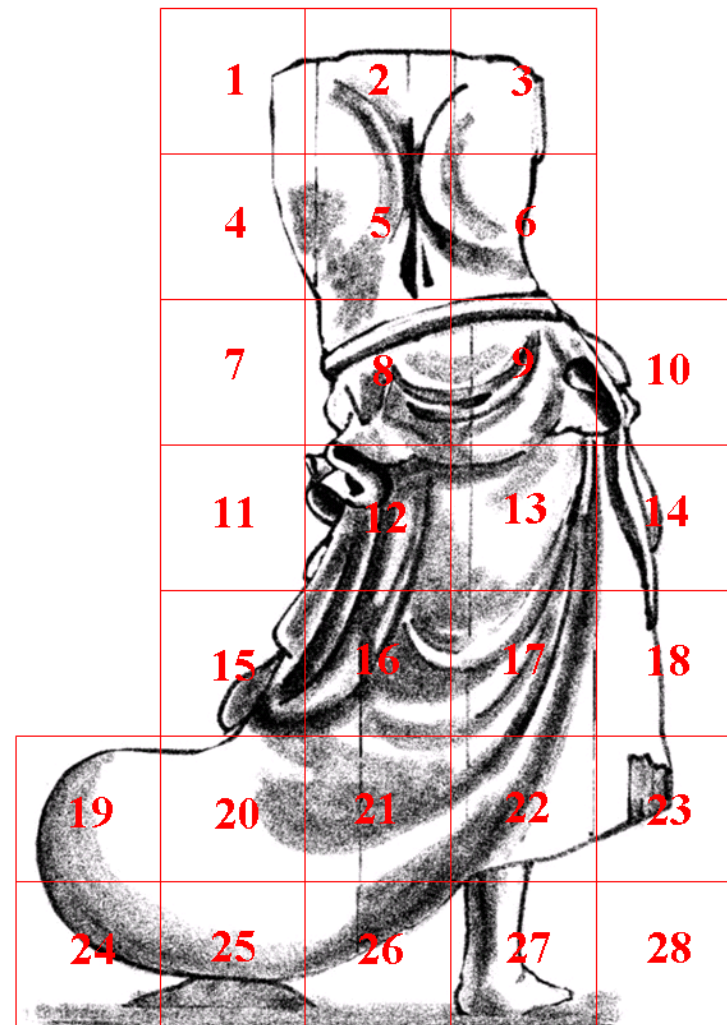
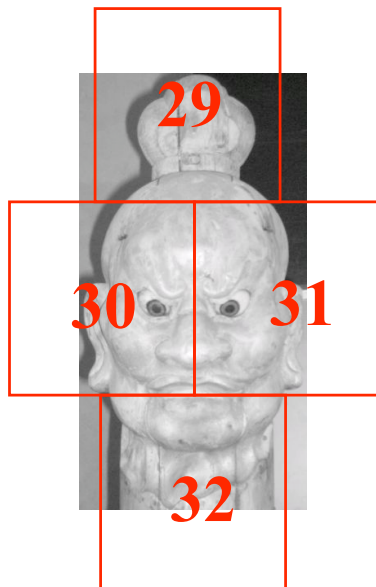
Kongo Rikishi

Scultura lignea policroma giapponese del periodo Kamakura (XIII secolo).

E' stata costruita assemblando numerosi masselli di legno di cipresso giapponese (*hinoki*), secondo una complessa tecnica chiamata *yosegi-zukuri*.

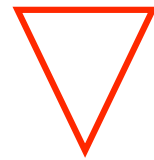
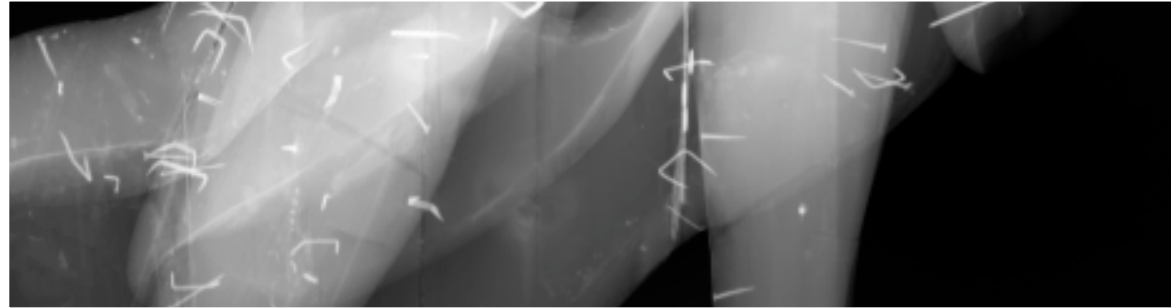


Kongo Rikishi

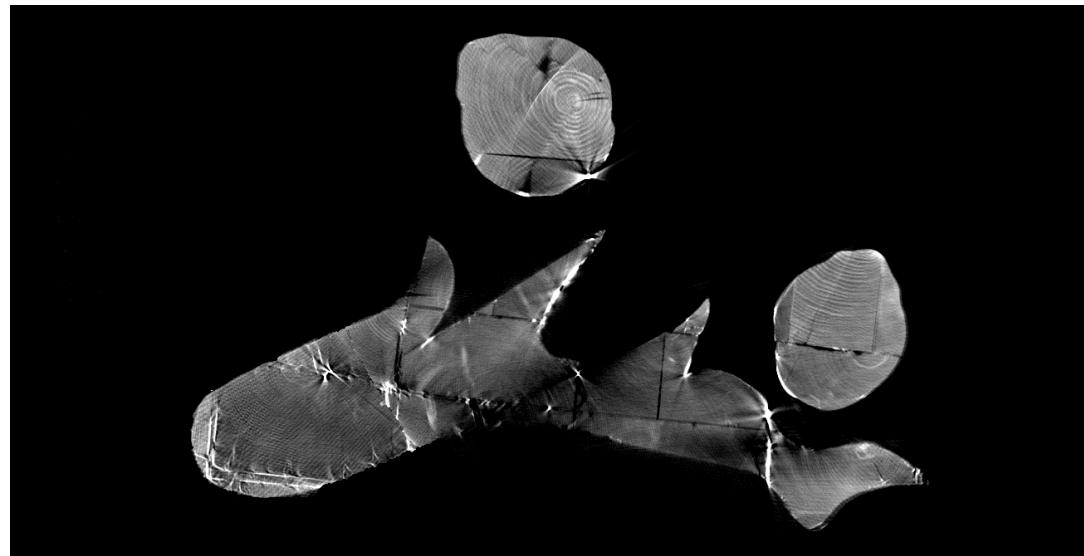


In collaborazione con: Centro di Conservazione e
Restauro "La Venaria Reale" (Torino)

Scansione: sequenza di radiografie



Ricostruzione: slice



**Rendering
tridimensionale
della testa che
mette in
evidenza il
procedimento di
ricostruzione
3D, basato sulla
sovrapposizione
di molteplici
sezioni
trasversali
(slice).**



Kongo Rikishi



**In collaborazione con: Centro di Conservazione e
Restauro "La Venaria Reale" (Torino)**

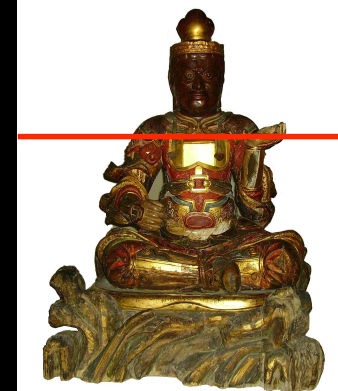
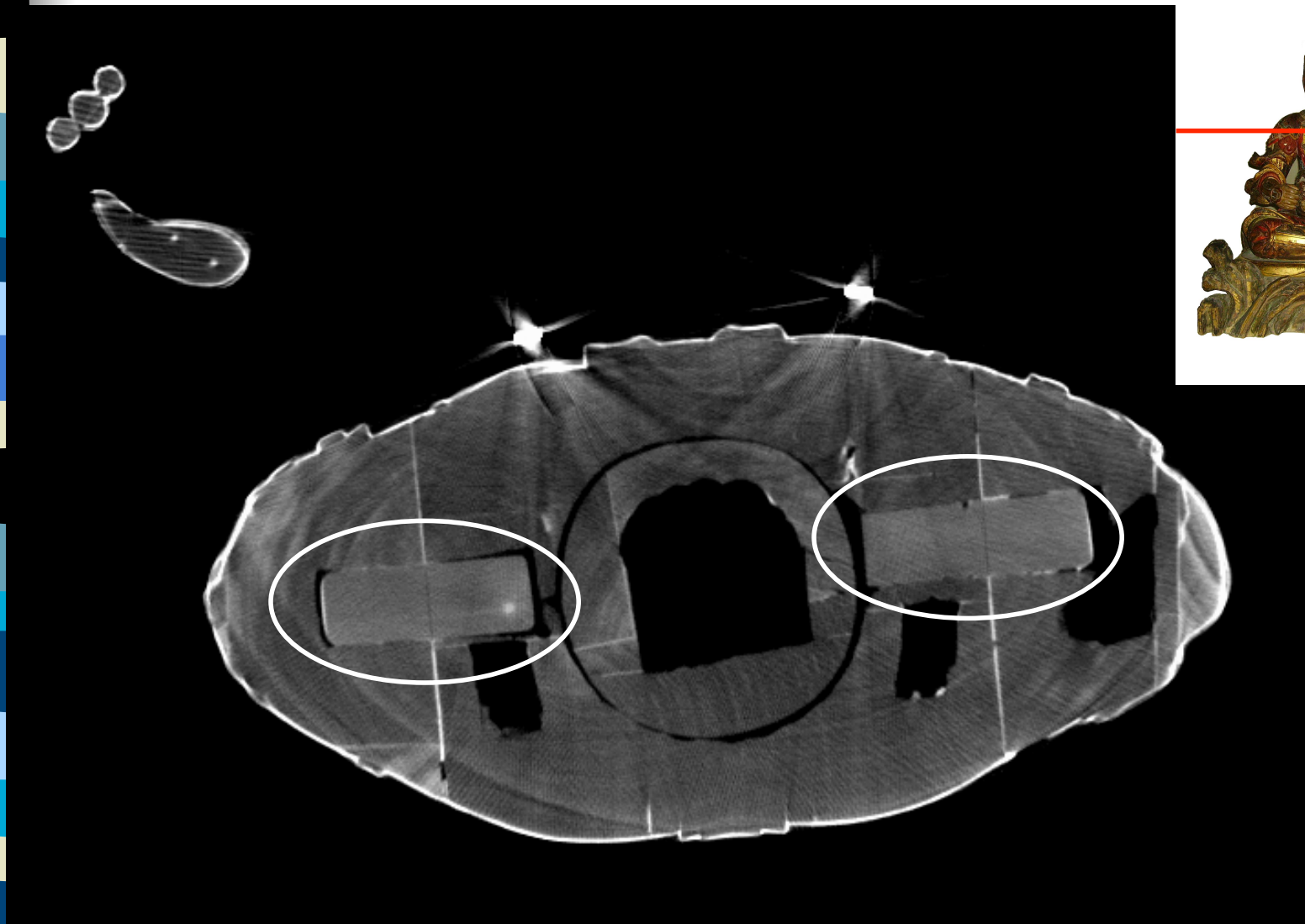
Tamon Ten

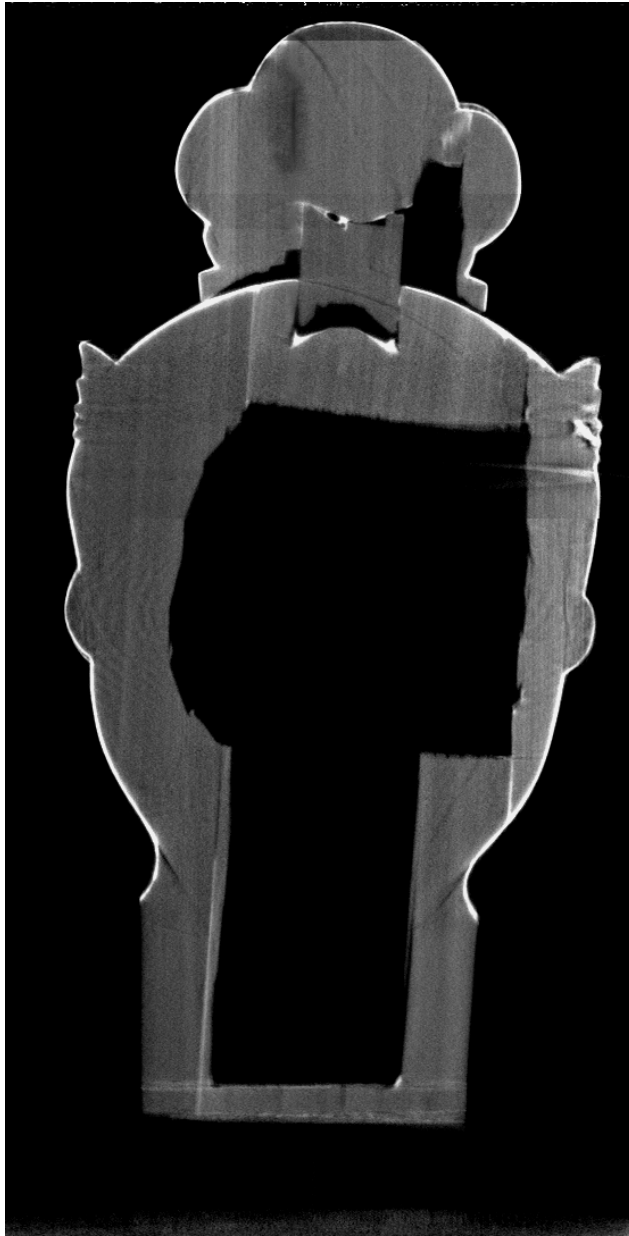
Statua policroma in legno del periodo EDO (XVII secolo), che raffigura il “Guardiano del Nord”.

La statua è seduta su un basamento dorato ed è costituita da alcuni masselli principali, che possiamo identificare nel torace, nella schiena, nelle gambe e nel manto adiacente alla base.

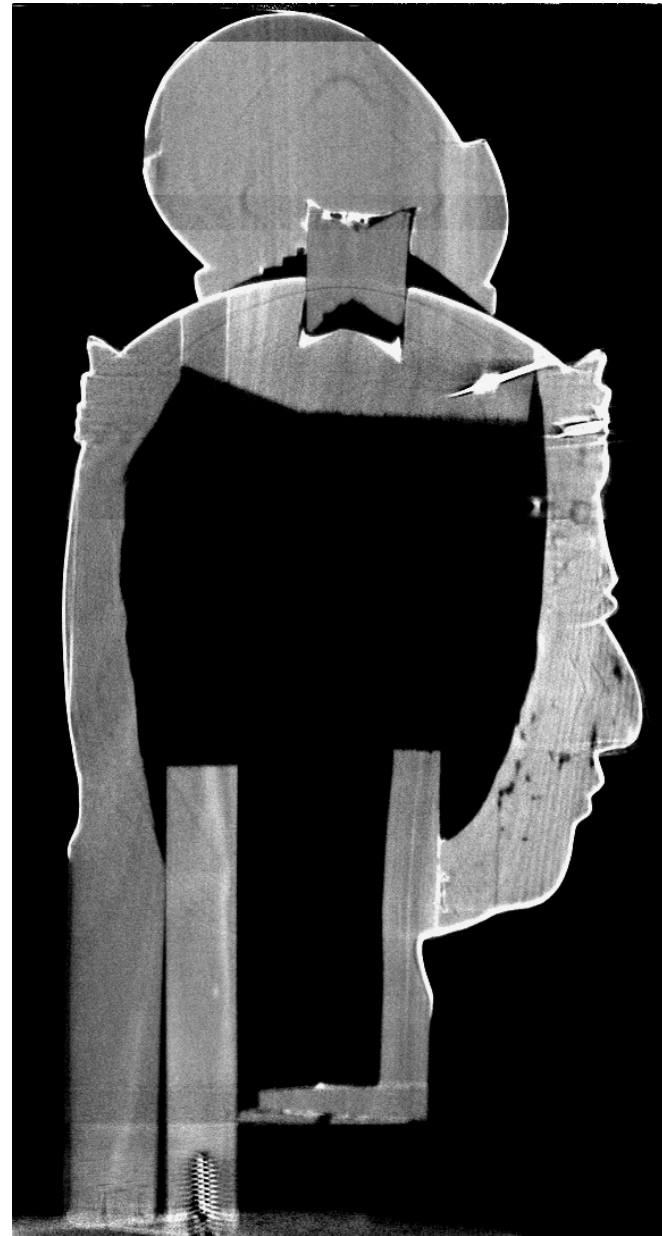


Slice tomografica che mostra i due tenoni utilizzati per unire le braccia al corpo.





Sezione coronale

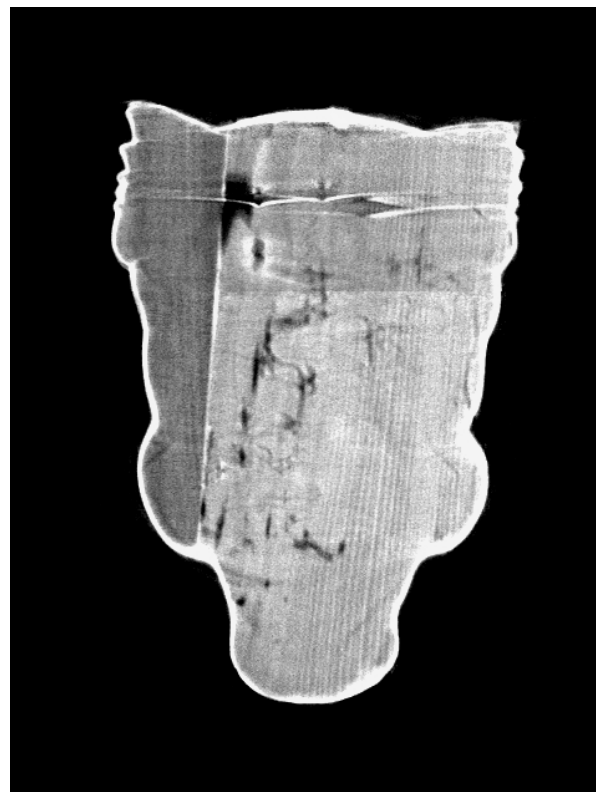


Sezione sagittale

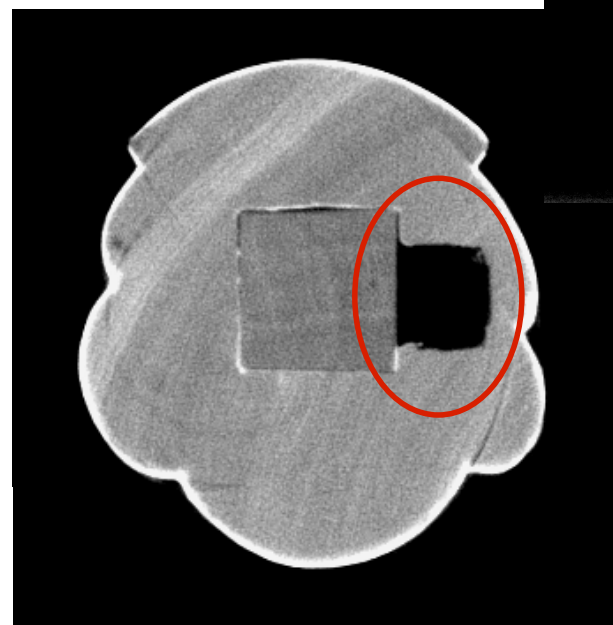
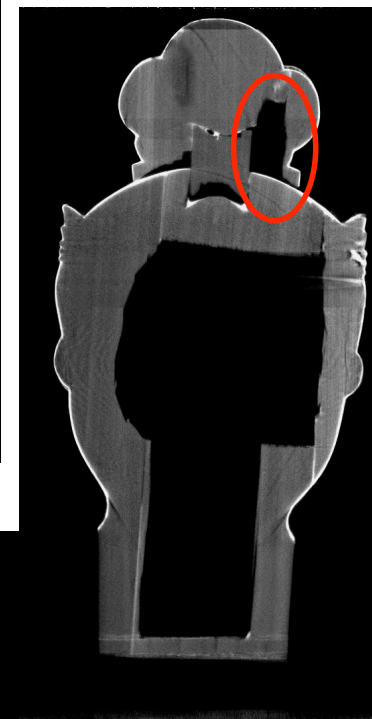
**Sezione trasversale della testa
del Tamon Ten**



**La cavità all'interno
dello chignon**



**La maschera
facciale**



Parallel Reconstruction Tests Microsoft HPC Cluster, Redmond, WA, USA



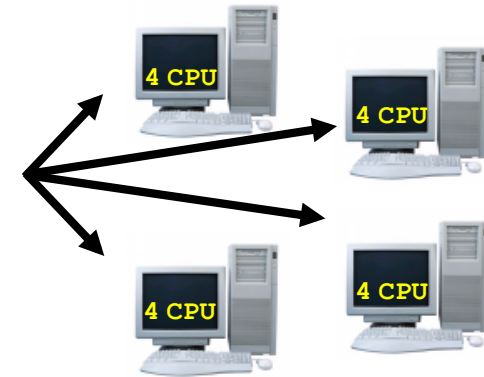
Parallel CT Reconstruction: HPC



Dual core PC UNIBO



HPC-Cluster



Characteristic	PC located at Physics Department of Bologna University	HPC-Cluster, courtesy of Microsoft, Redmond:
Operative system	Windows Professional XP 2002 with SP2.	Windows Server HPC Edition 2007 with SP1.
Number and type of CPU	Intel Core™ 2 CPU	Intel Xeon 4 CPU
CPU and Frequency	6300 @ 1.86 GHz	E5335 @ 2GHz
Bit word	32-bit	64-bit
RAM	2GB	8 GB
Number of core per PC	2	4
Gbyte per core	1	2
Number of nodes	1	5

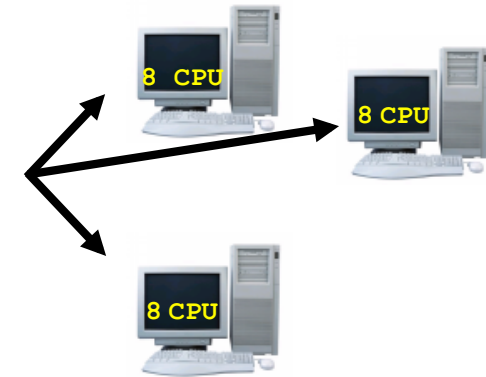
Parallel CT Reconstruction: E4



Dual core PC UNIBO



E4-Cluster



Characteristic	PC located at Physics Department of Bologna University	HPC-Cluster, courtesy of Microsoft, Redmond	E4 cluster, courtesy of E4, Bologna
Operative system	Windows Professional XP 2002 with SP2.	Windows Server HPC Edition 2007 with SP1	Windows Server HPC Edition 2008
Number and type of CPU	Intel Core™ 2 CPU	Intel Xeon 4 CPU	Intel Xeon 4 CPU
CPU and Frequency	6300 @ 1.86 GHz	E5335 @ 2GHz	E5520 @ 2.27 GHz (2 processors)
Bit word	32-bit	64-bit	64-bit
RAM	2GB	8 GB	6/12 GB
Number of core per PC	2	4	8
Gbyte per core	1	2	2/4
Number of nodes	1	5	4 (3 used)

Parallel CT Reconstruction: E4

System	bit	cores	Tasks	Total time	Sec/slice	SRF <u>Unibo</u>	SRF HPC
<u>Unibo</u>	32	1	1	20:15:24:18	226.98	1	---
HPC	64	20	800	00:17:15:43	7.89	28.76	1
E4	64	20	240	00:10:47:55	4.94	45.97	1.60
E4	64	24	800	00:08:45:00	4.00	56.74	1.97
E4	64	32	800	00:06:36:37	3.02	75.10	2.61



Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna
Nuovi orizzonti di ricerca con il calcolo ad alte prestazioni

Un centro di eccellenza italiano nell'ambito dell'analisi tomografica supera i vincoli legati alla potenza di calcolo e realizza un sistema unico al mondo per lo studio dei Beni Culturali. La piattaforma di calcolo parallelo necessaria per l'elaborazione in tempo reale di immagini radiografiche per la tomografia tridimensionale è stata sviluppata con Microsoft Windows HPC Server, mentre Microsoft Visual Studio 2008 ha consentito il porting del codice evitandone la riscrittura.

Morigi Maria Pia

email : mariapia.morigi@unibo.it

<http://www.xraytomography.com>



Dipartimento di Fisica
Viale Berti Pichat, 6/2
40127 Bologna - Italy
Tel: +39-051-2095085