

Czy coś tam jest pod spodem?

System do nieinwazyjnego badania dzieł sztuki

T. Fiutowski^a, P. Frączek^b, S. Koperny^a, P. Krupska^b, M. Lankosz^a, B. Łach^a,
A. Mendys-Frodyma^b, B. Mindur^a, A. Sikorska^b, K. Świentek^a, P. Wiącek^a,
P.M.Wróbel^a, W. Dąbrowski^a

^a *Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie*

^b *Muzeum Narodowe w Krakowie*



Plan prezentacji

- Motywacja
- Budowa i ograniczenia systemu DETART
- Wybrane wyniki pomiarów
 - rozróżnianie pigmentów
 - obrazowanie ukrytych warstw
 - obrazowanie obiektów niepłaskich
- Wnioski

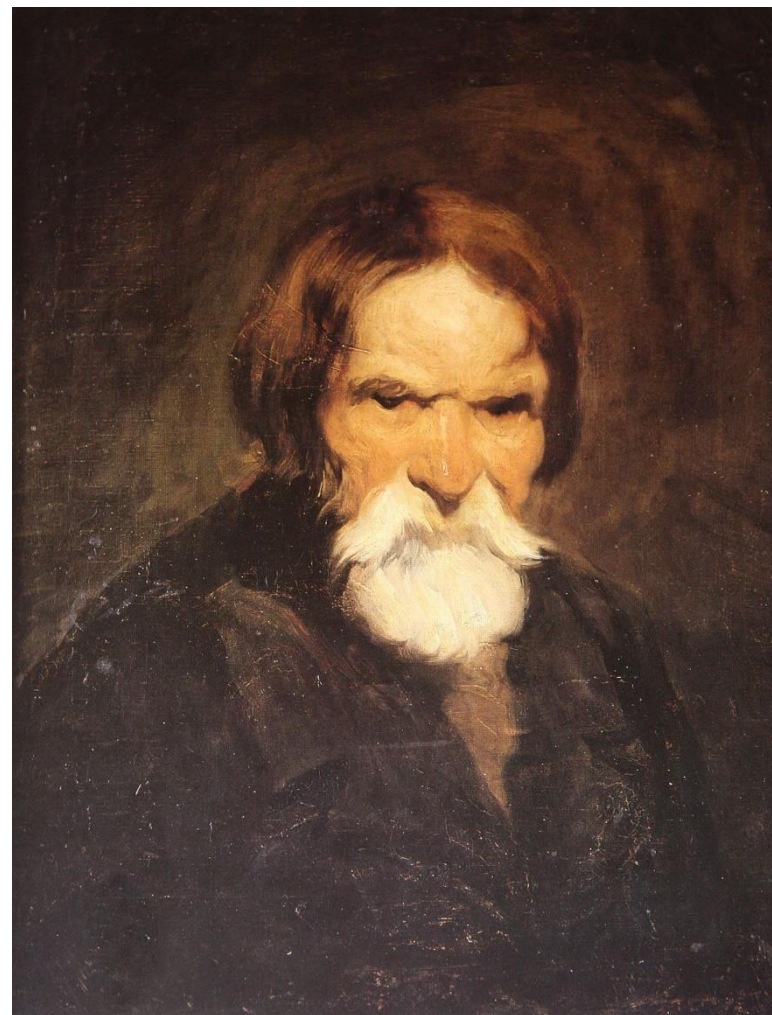
Motywacja

- Duże zainteresowanie w badaniach nieniszczących dzieł sztuki, w szczególności dużych obiektów malarskich
- Obrazowanie rozkładu pierwiastków w warstwach niewidocznych
- Szybkie skanowanie obszarów powyżej 1m²
- Badanie obiektów niepłaskich

Czy coś tam jest pod spodem?

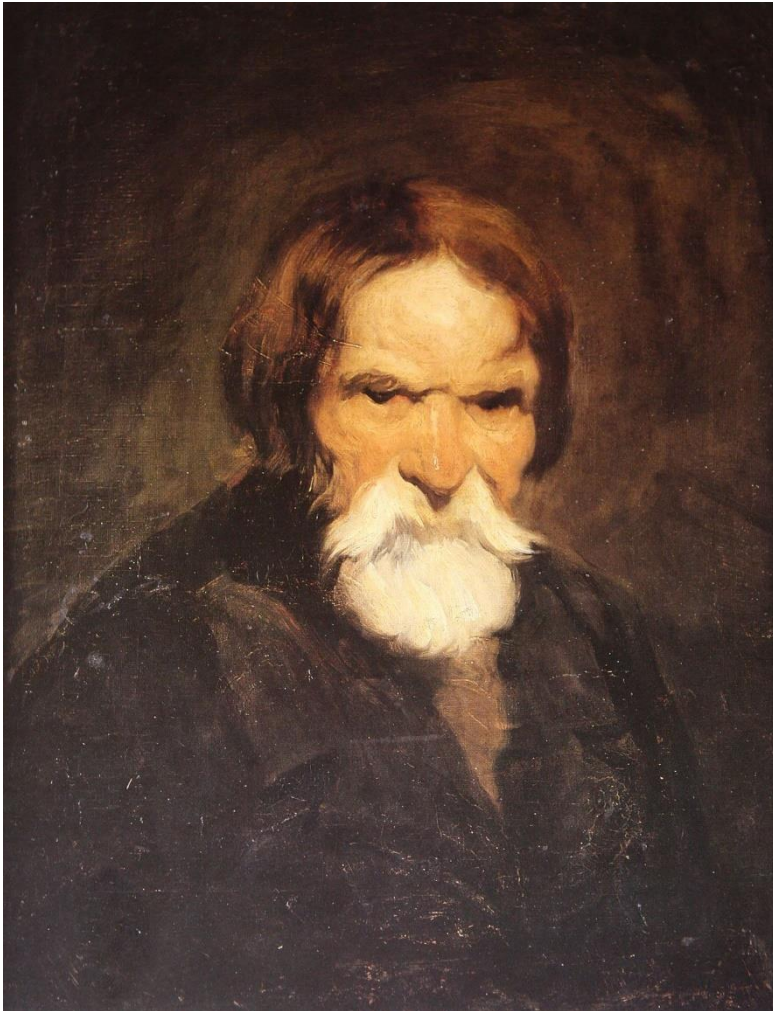


Olej + tempera na desce
1488-1490
54,7 cm × 40,3 cm

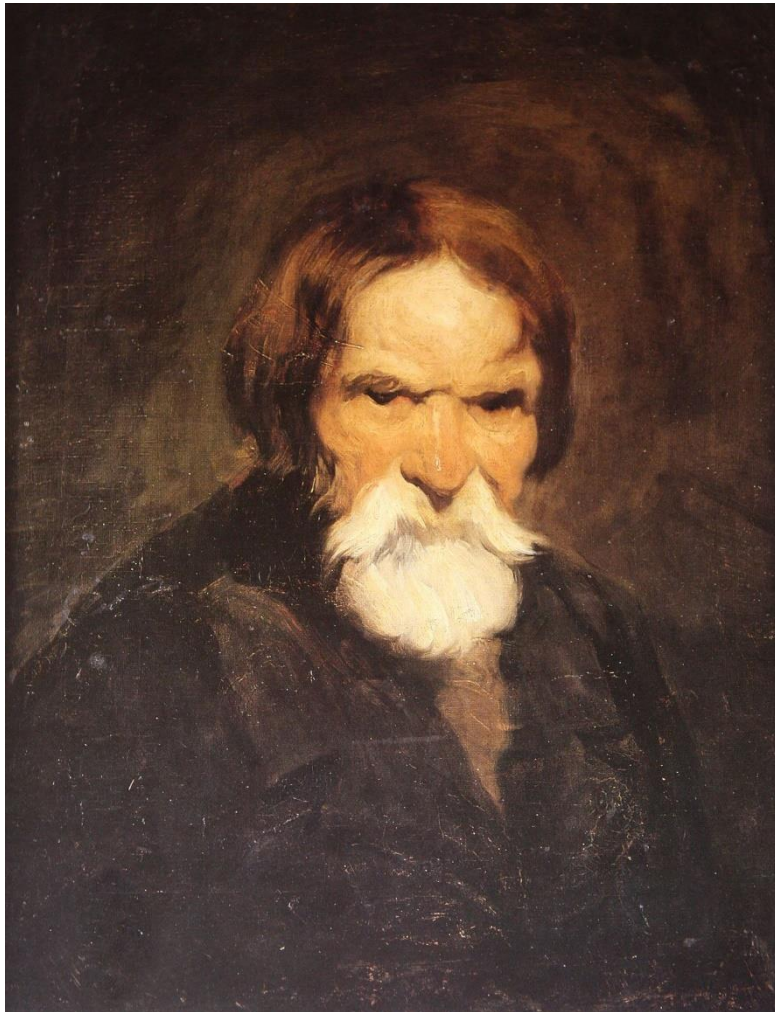


Olej na płótnie
1846-1848
67 cm × 53 cm

Czy coś tam jest pod spodem?

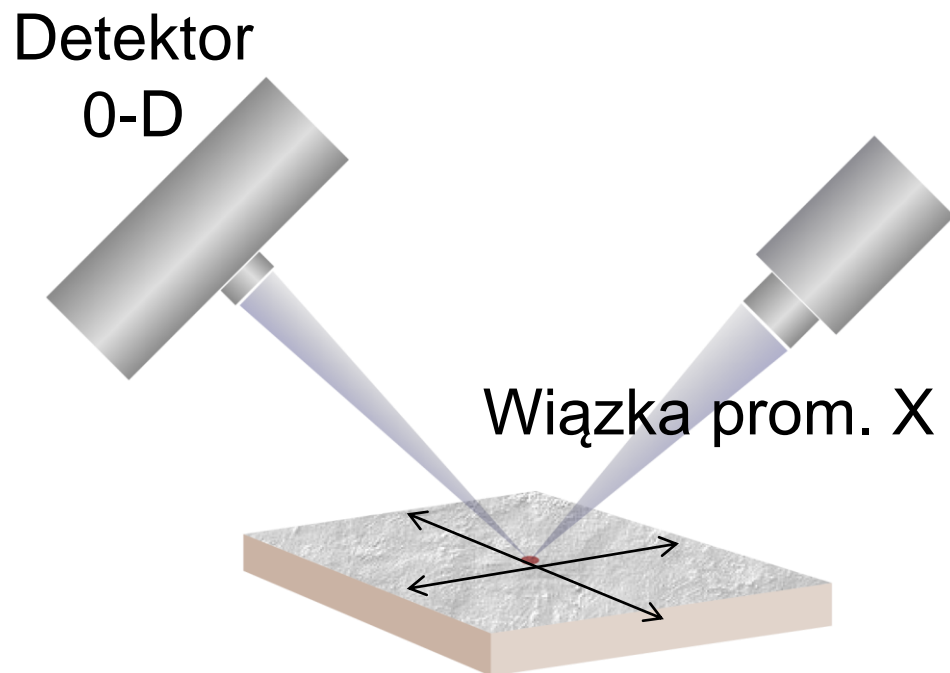


Czy coś tam jest pod spodem?

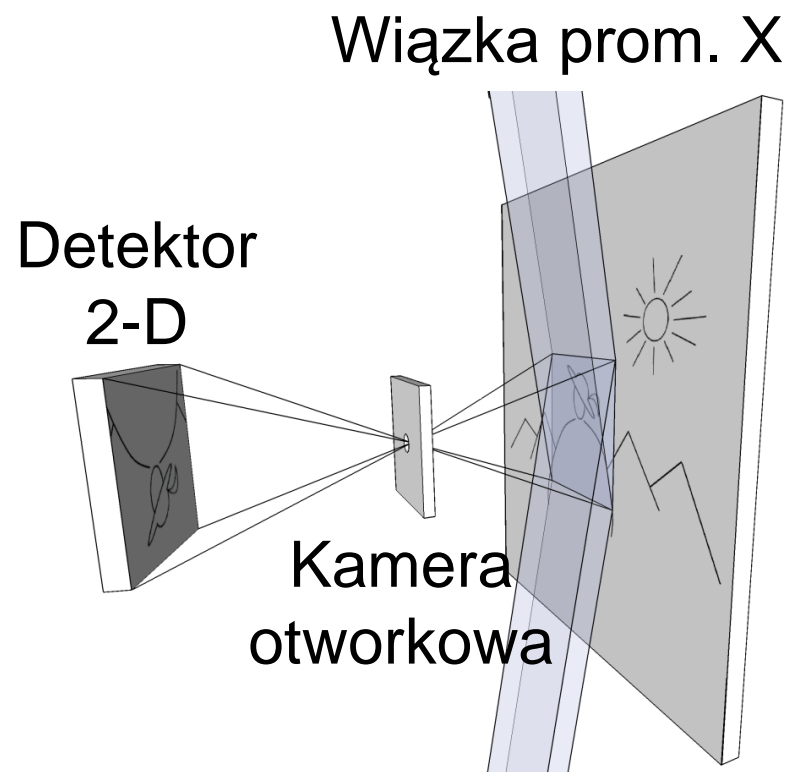


Obrazowanie makro-XRF vs full-field

Obrazowanie makro-XRF



Obrazowanie full-field



Obrazowanie full-field vs makro-XRF

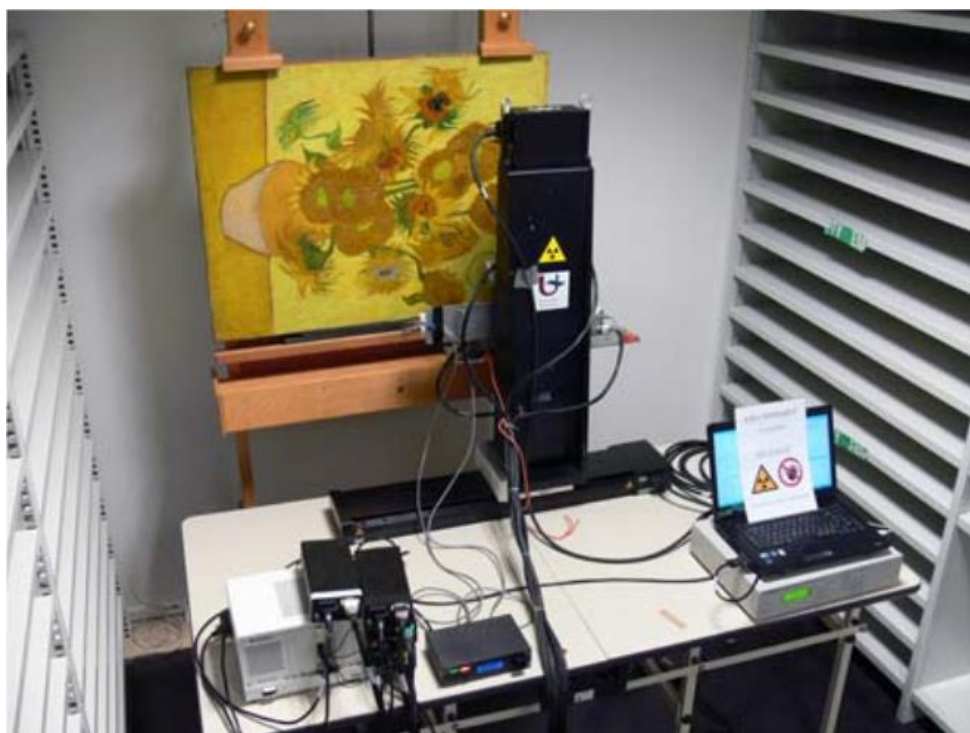
Obrazowanie makro-XRF

- Przewstrzenna zdolność rozdzielcza zależna od wiązki wzbudzającej
- Czasochłonne przy dużych obszarach
- Możliwość zastosowania detektorów 0-D o wysokiej energetycznej zdolności rozdzielczej
- Systemy komercyjne i dedykowane dostępne na rynku

Obrazowanie full-field

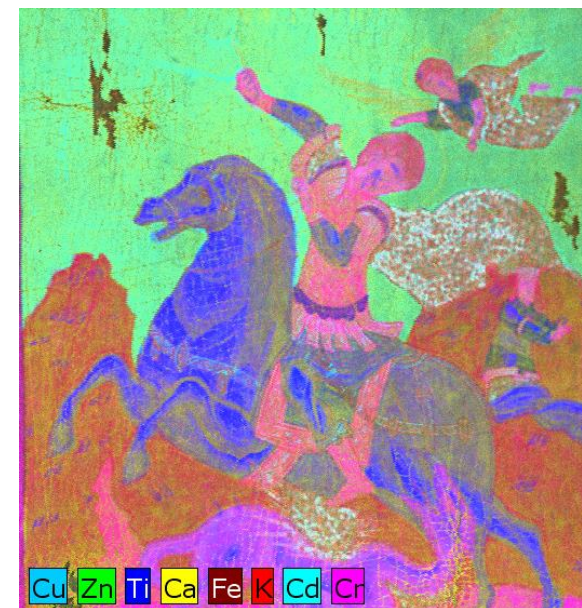
- Przewstrzenna zdolność rozdzielcza zależna od średnicy kamery otworkowej i rozdzielczości detektora
- Równoczesne obrazowanie większych obszarów
- Wymagane pozycjoczułe detektory 2-D z dyspersją energii
- Dedykowane systemy w trakcie rozwoju

Dostępne rozwiązania (makro-XRF)



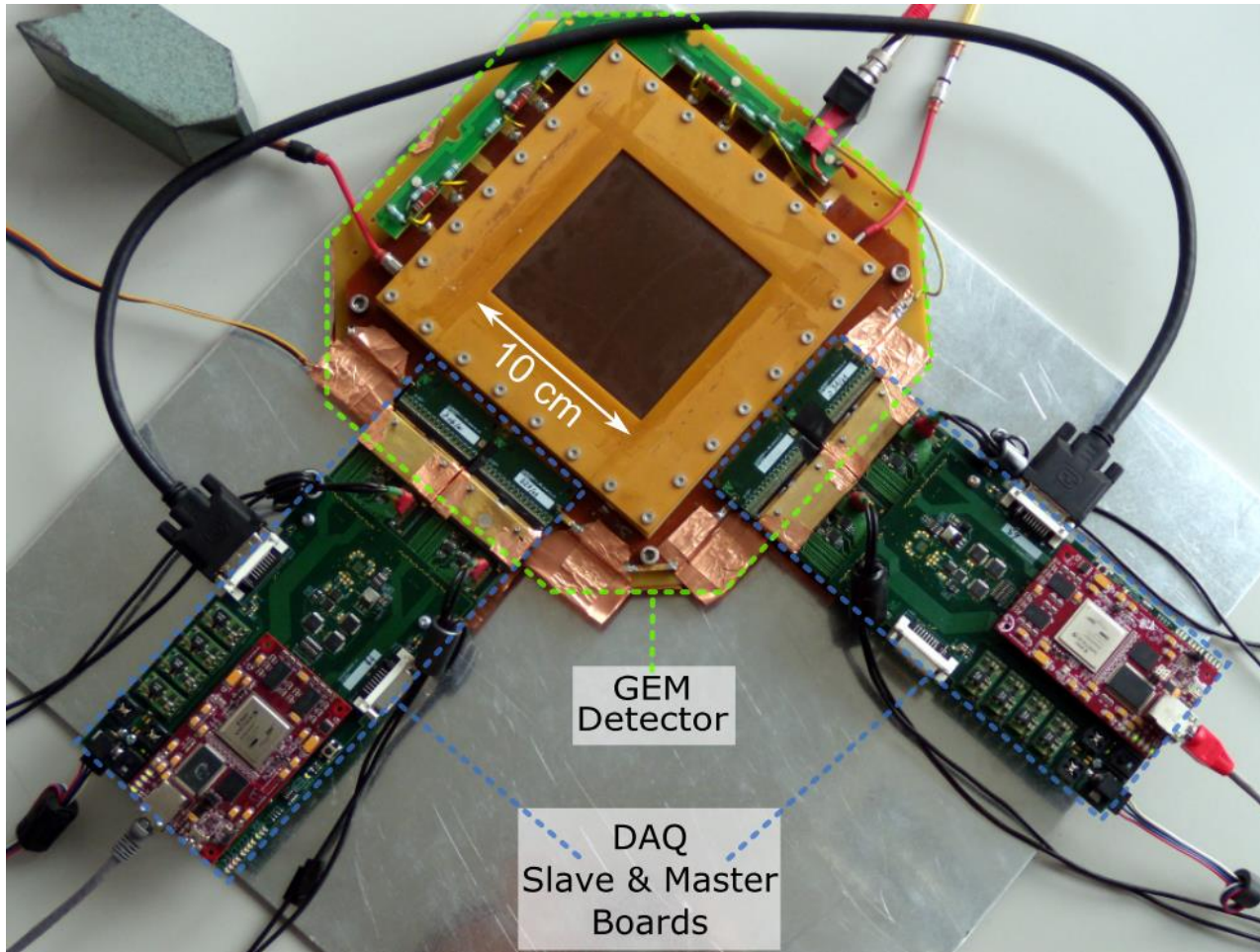
- Lampa RTG
- 4 detektory SDD
- Rozdzielczość: 1mm
- Czas pomiaru: 30cm²/h

Dostępne rozwiązania (makro-XRF)



- Lampa RTG, Detektor SDD 30mm² (2×60mm²)
- Rozdzielczość: 100 – 500μm
- Czas pomiaru: 30cm²/5min
- Obszar pomiarowy: 80×60cm

System odczytowy detektora GEM

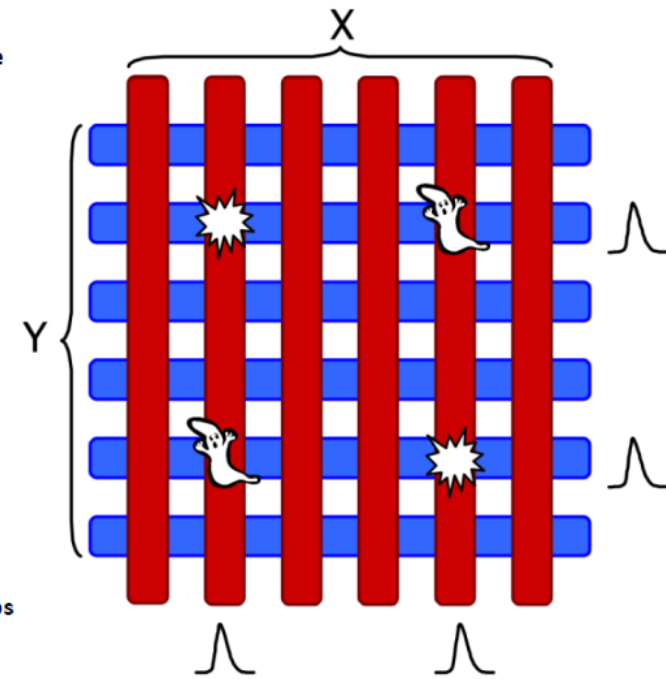
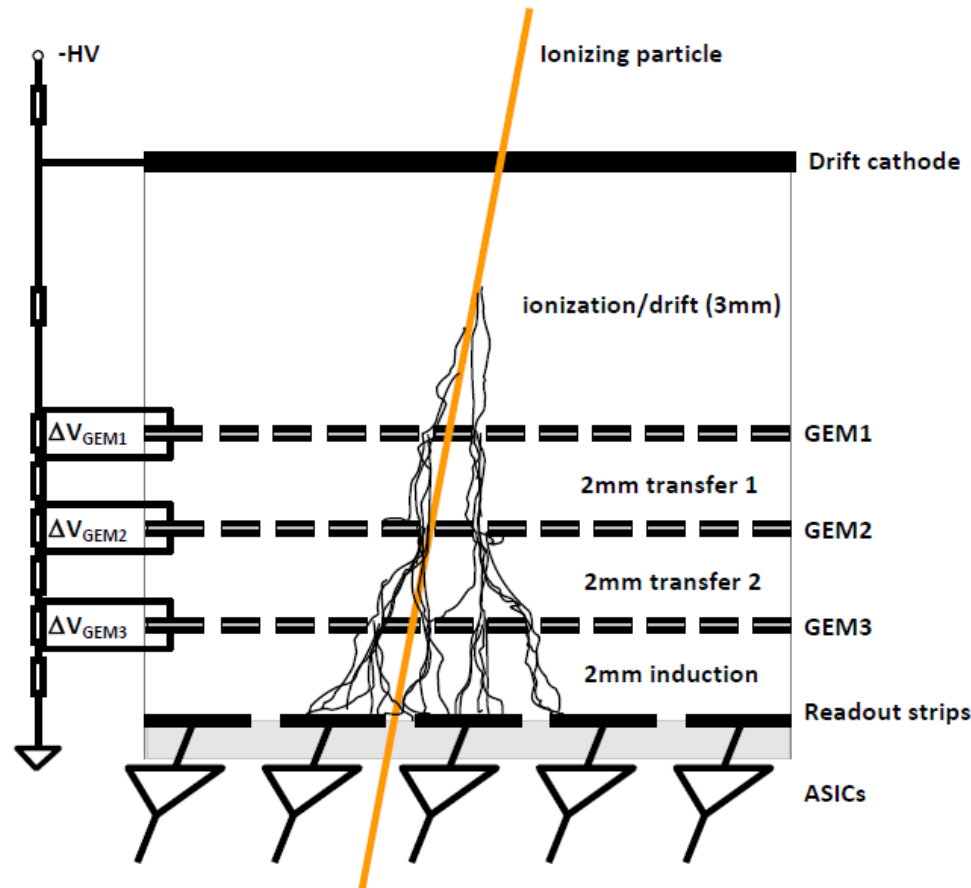
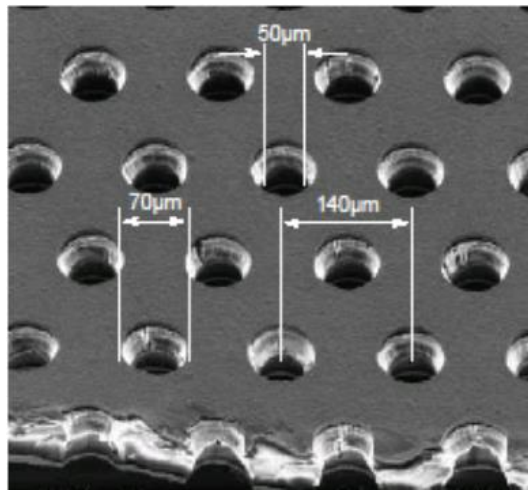


- Potrójny-GEM z odczytem XY
256 × 256 pasków odczytowych
(rozstaw pasków 800 μm)
- Cztery 32-kanałowe układy
GEMROC w każdej
koordynacie (jednej kanał na
dwa paski odczytowe)
- Dedykowany układ zbierania
danych z protokołem
komunikacyjnym Ethernet

T. Fiutowski et al., *Design and performance of the GEMROC ASIC for 2-D readout of gas electron multiplier detectors*, 2011 IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec., (2011)

B. Mindur et al., *A compact system for two-dimensional readout of Gas Electron Multiplier detectors*, JINST 8 T01005 (2013)

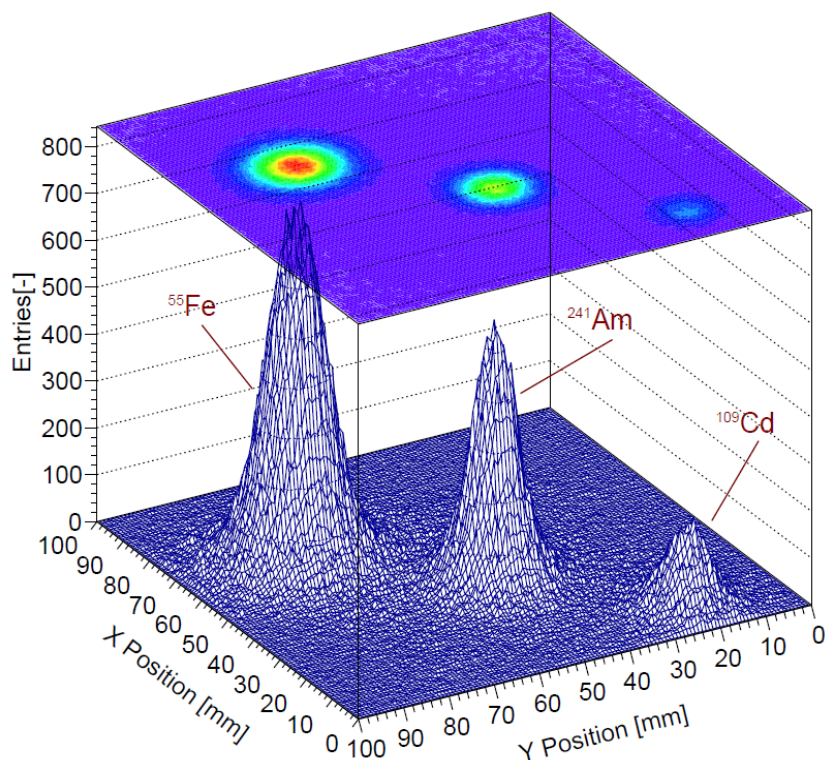
Detektor GEM z odczytem XY



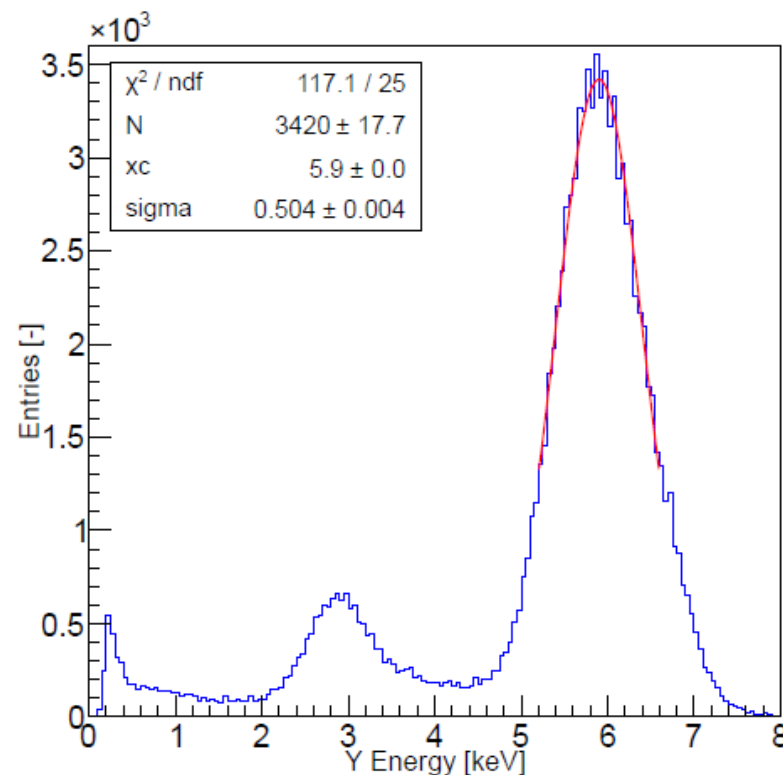
Pozycja wyznaczana jest na podstawie koincydencji sygnatur czasowych sygnałów zarejestrowanych w płaszczyznach X i Y.



Parametry systemu

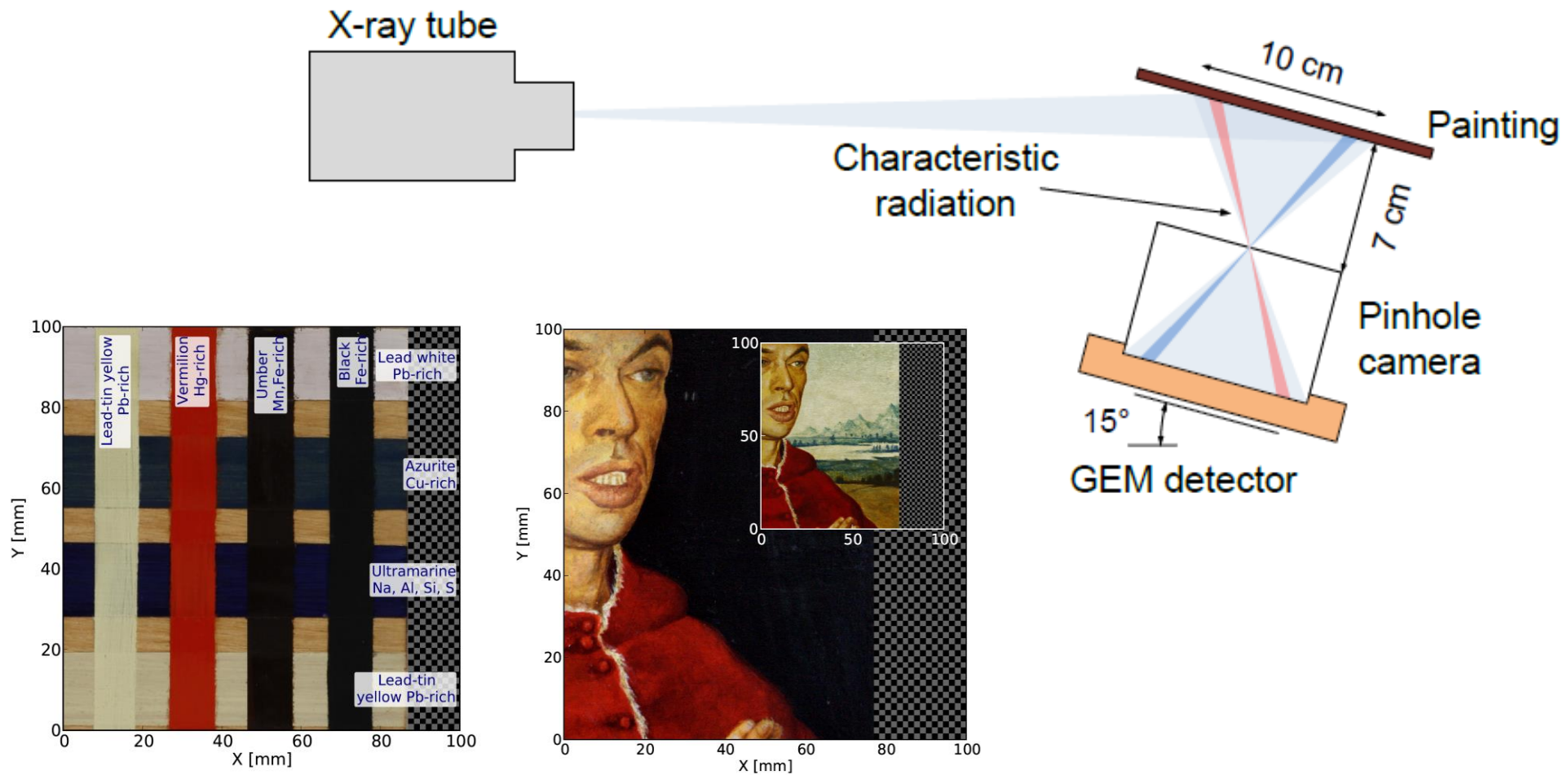


Częstość zliczeń:
~5,5 Mcps (~9 kcps/mm²)



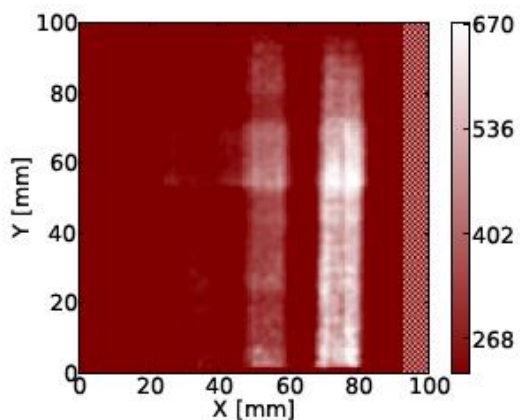
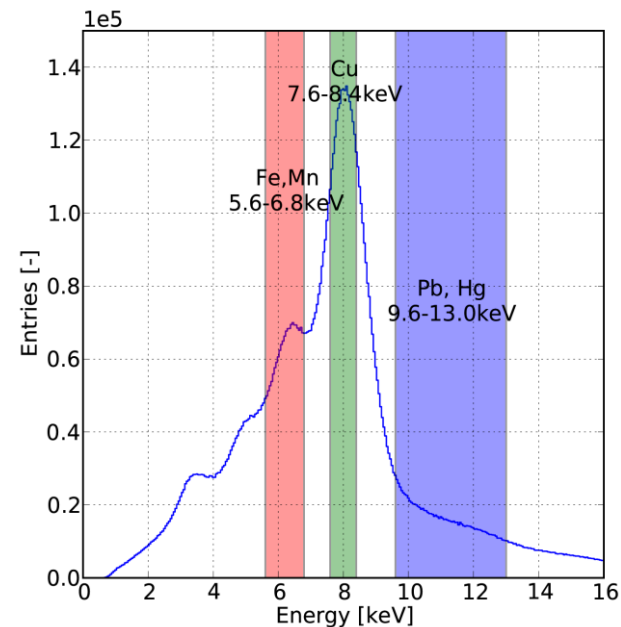
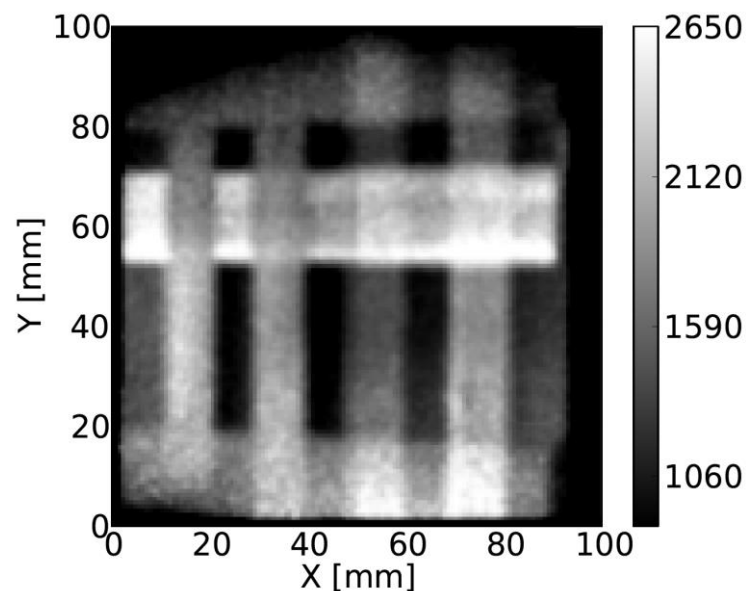
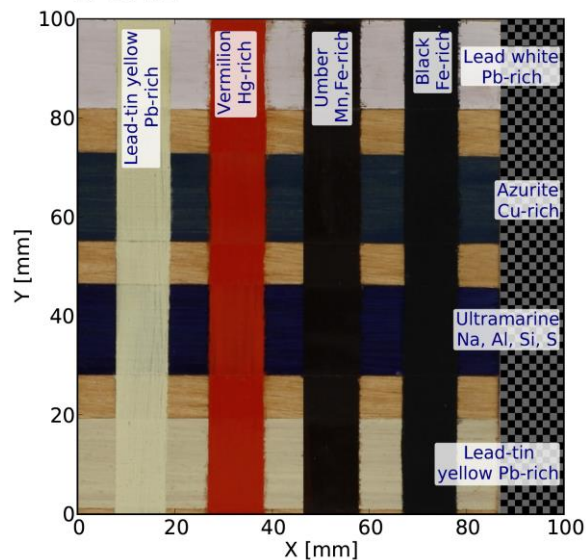
Energetyczna zdolność rozdzielcza:
Fe-55 (FWHM) ~21% dla Ar/CO₂ (70/20)

System pilotażowy

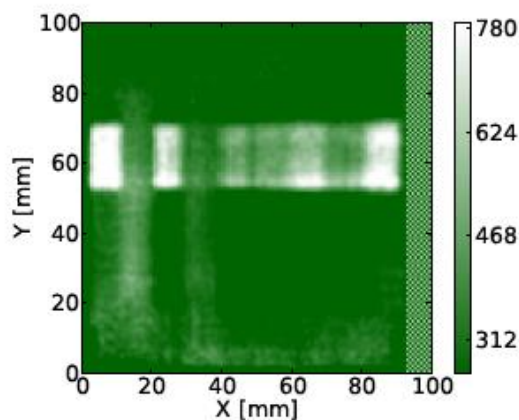




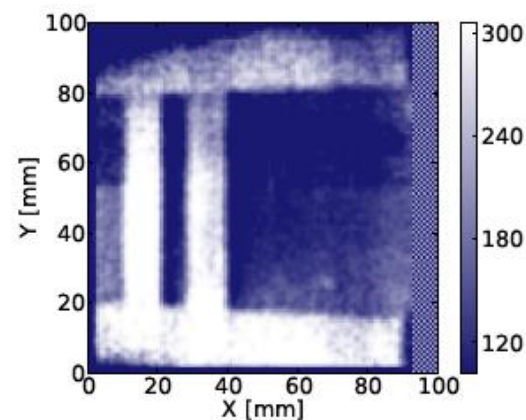
System pilotażowy



(a) Fe and Mn map (5.5-6.8 keV).



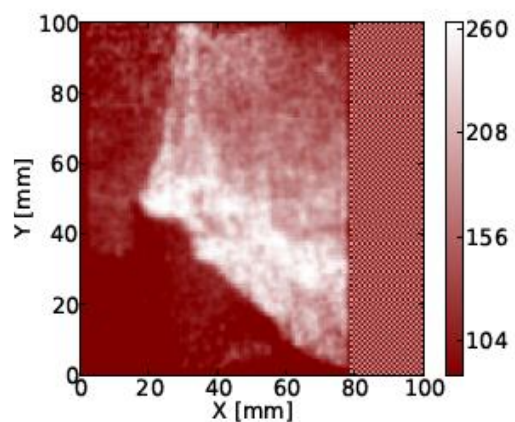
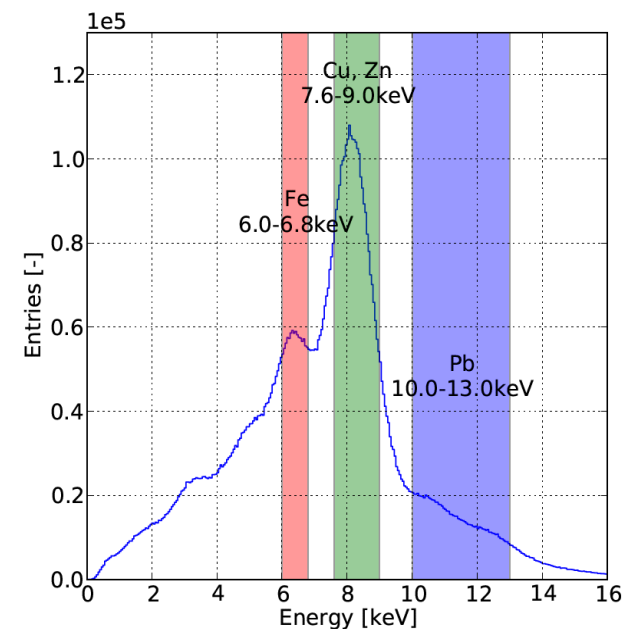
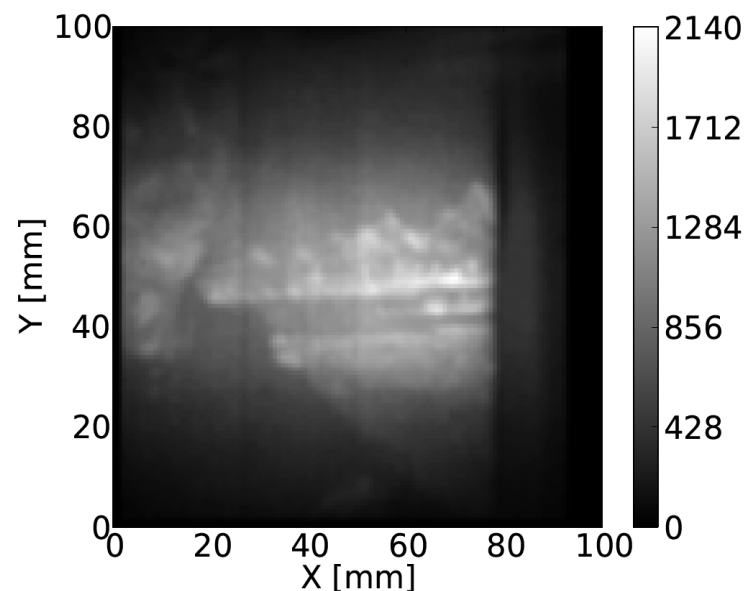
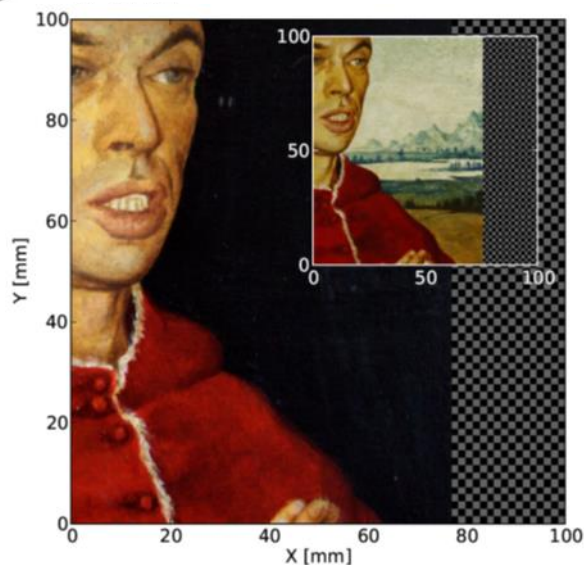
(b) Cu map (7.6-8.4 keV).



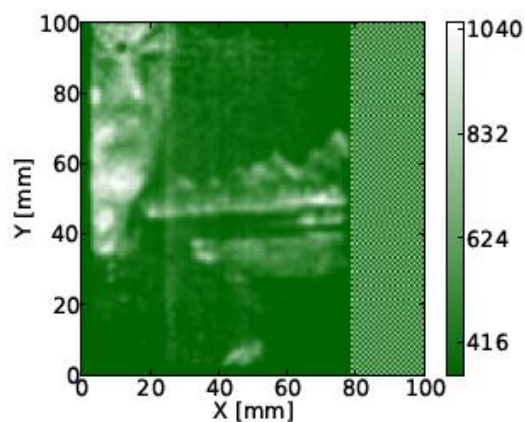
(c) Pb and Hg map (9.6-13 keV).



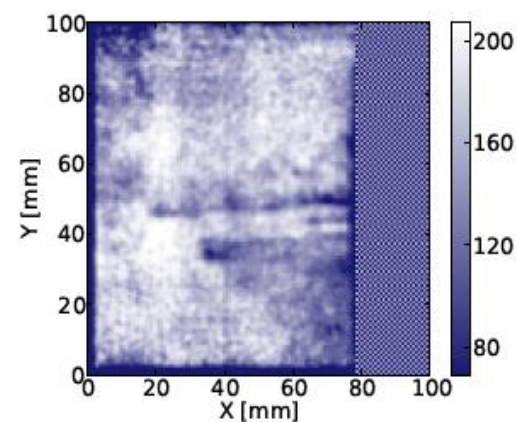
System pilotażowy



(a) Fe map (6.0-6.8 keV).



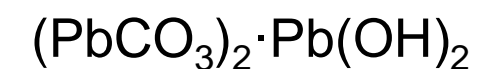
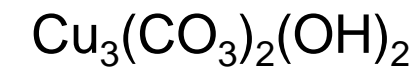
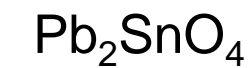
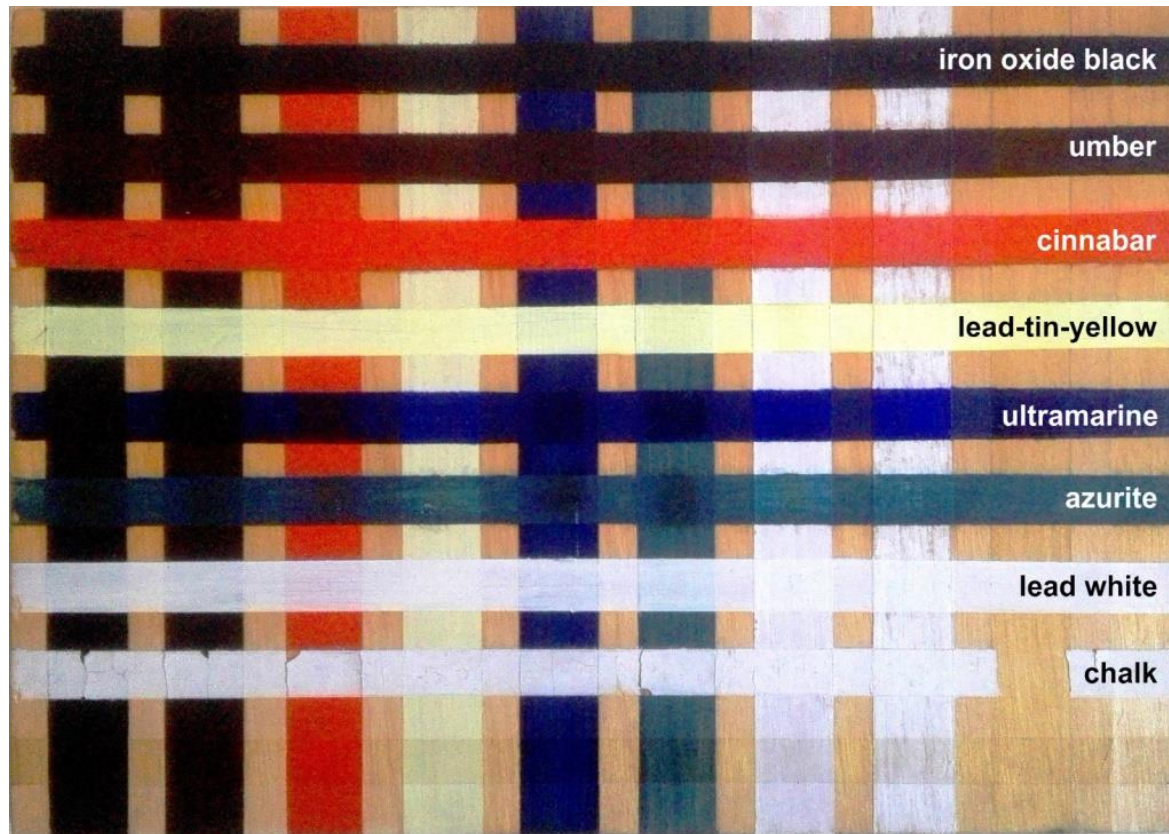
(b) Cu and Zn map (7.6-9.0 keV).



(c) Pb map (10.0-13.0 keV).

A. Zielińska et al., *X-ray fluorescence imaging system for fast mapping of pigment distributions in cultural heritage paintings*, JINST 8 P10011 (2013)

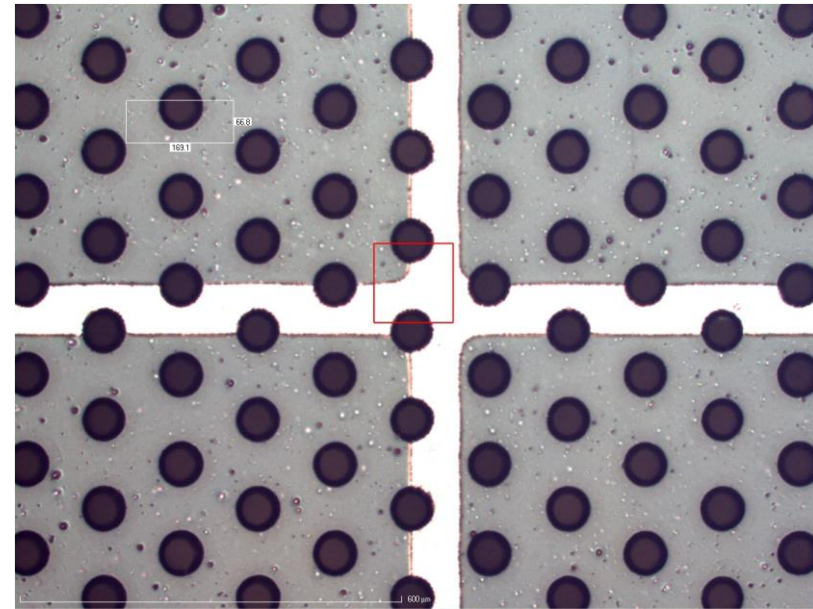
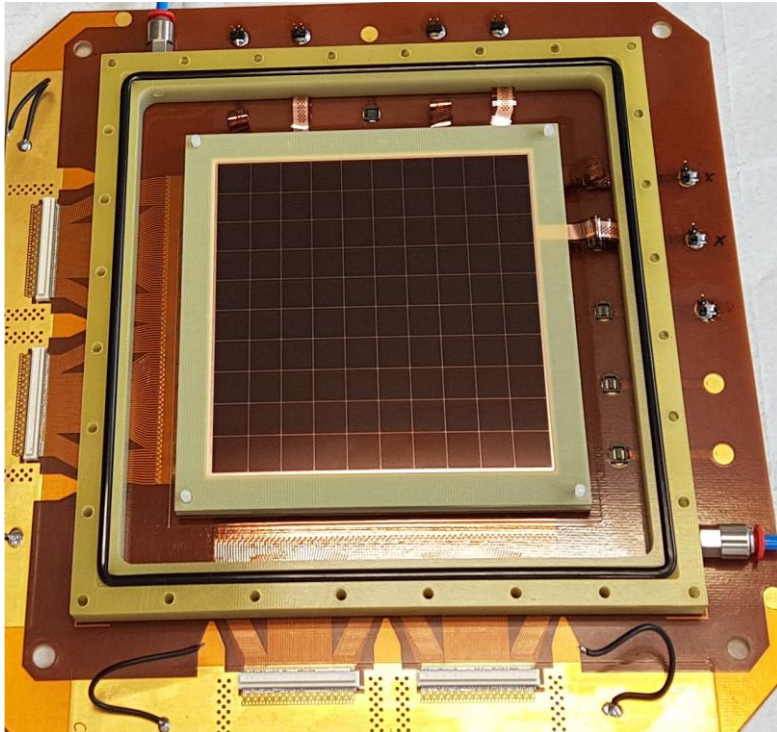
Typowe historyczne pigmenty



Typowe historyczne pigmenty

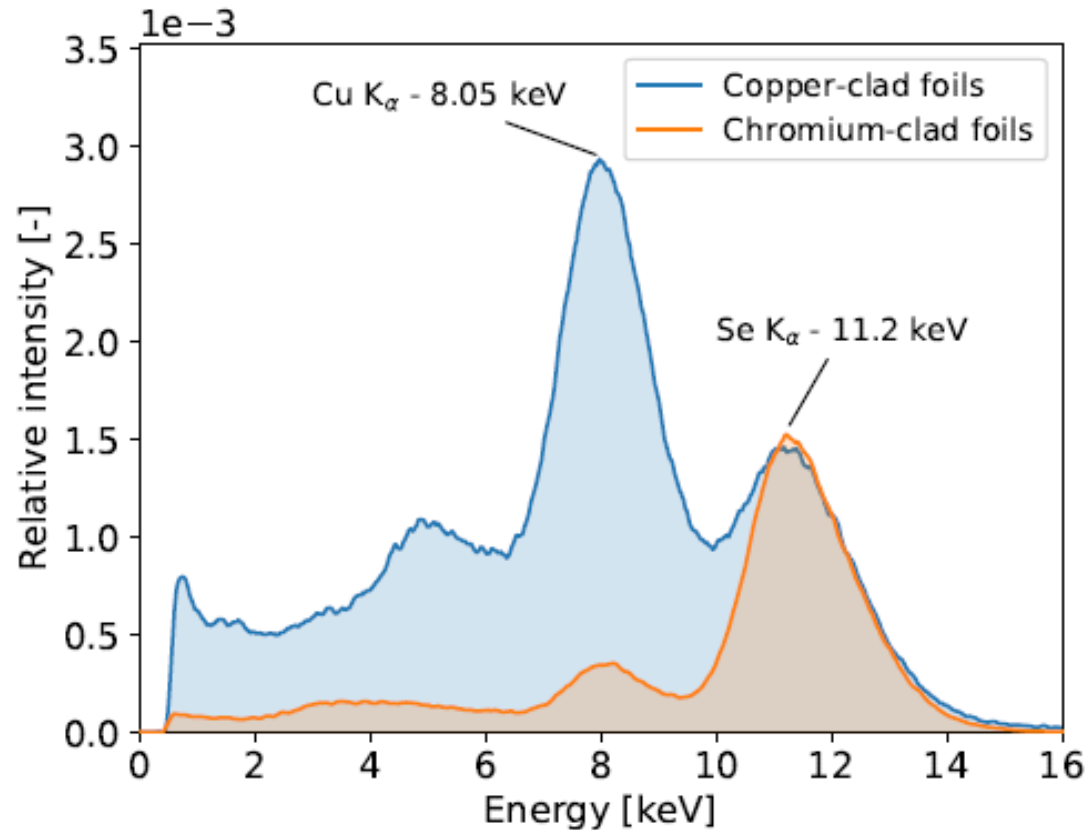
Pigment	Linie promieniowania charakterystycznego
Umber	Mn-K α – 5.90 keV, Fe-K α – 6.40 keV
Carbon black	Fe-K α – 6.40 keV
Cobalt blue	Co-K α – 6.93 keV, Co-K β – 7.65 keV
Azurite	Cu-K α – 8.05 keV, Cu-K β – 8.90 keV
Zinc white	Zn-K α – 8.64 keV, Zn-K β – 9.57keV
Vermilion (Cinnabar)	Hg-L α – 9.99 keV, Hg-L β – 11.92 keV
Lead-tin yellow	Pb-L α – 10.55 keV, Pb-L β – 12.62 keV
Lead white	Pb-L α – 10.55 keV, Pb-L β – 12.62 keV

„Bezmiedziowy” detektor GEM



Warstwa miedzi prawie całkowicie usunięta z folii GEM i elektrody dryfowej.
Pozostawiono paski o szerokości 100μm z rozstawem 1cm.

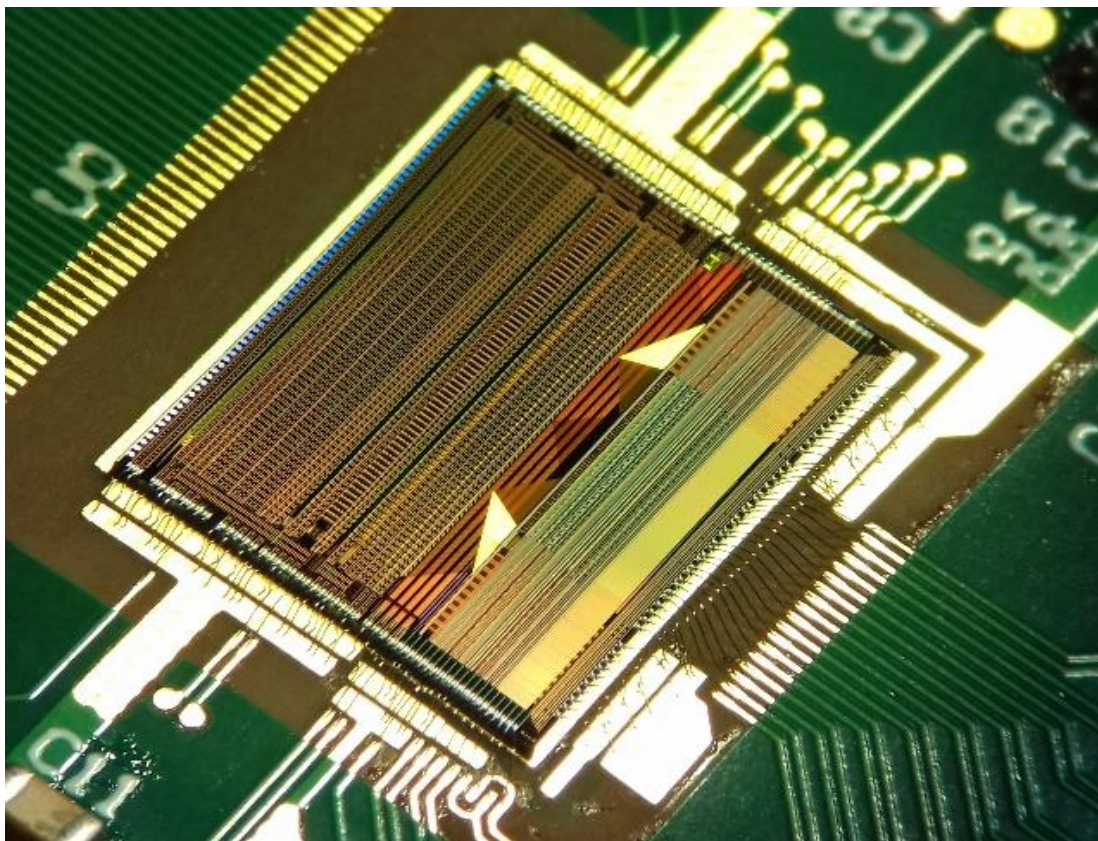
„Bezmiedziowy” detektor GEM



Widmo fluorescencyjne selenu.

Standardowy detektor GEM vs „bezmiedziowy”

Nowy układ odczytowy – ARTROC



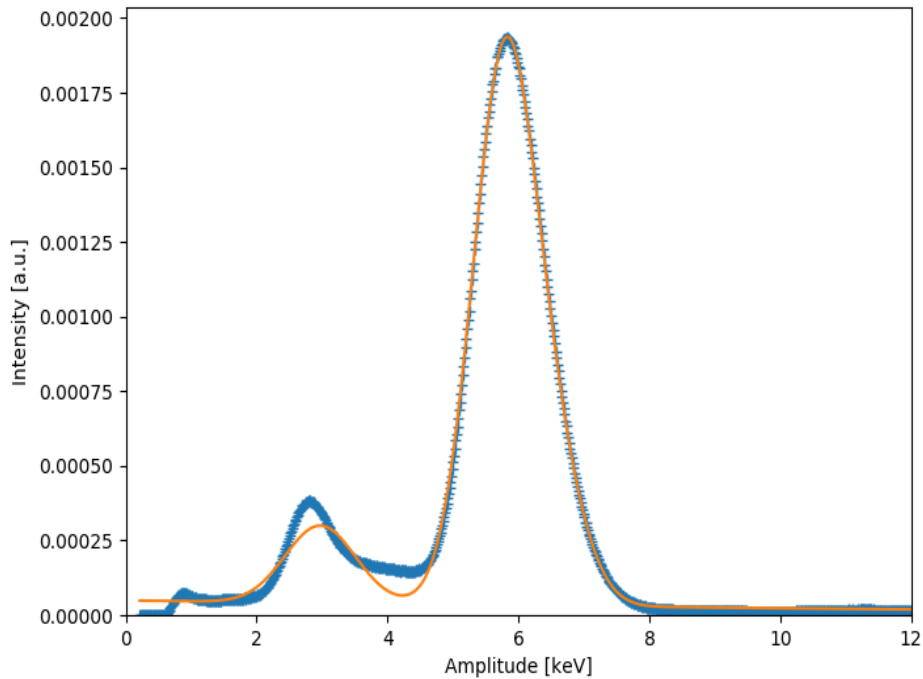
- 64 kanały
- Wbudowane układy protekcyjne
- Poprawione parametry szumowe

T. Fiutowski et al., *Front-end electronics for Micro Pattern Gas Detectors with integrated input protection against discharges*, JINST 11 C01036 (2016)

T. Fiutowski et al., *ARTROC – a readout ASIC for GEM-based full-field XRF imaging system*, JINST 12 C12016 (2017)

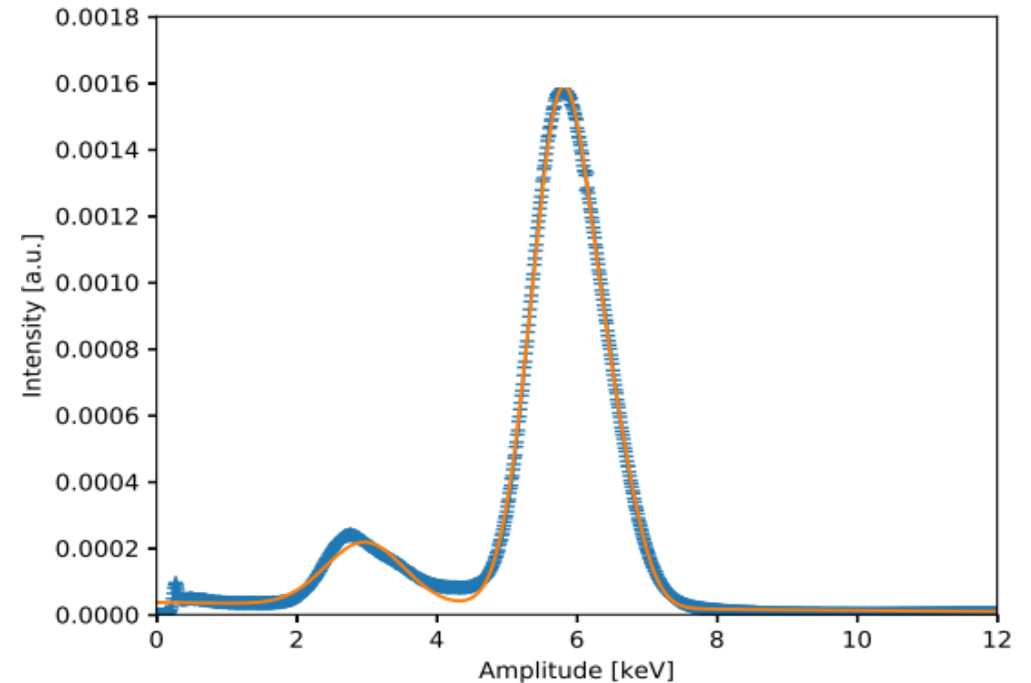
Energetyczna zdolność rozdzielcza

GEMROC



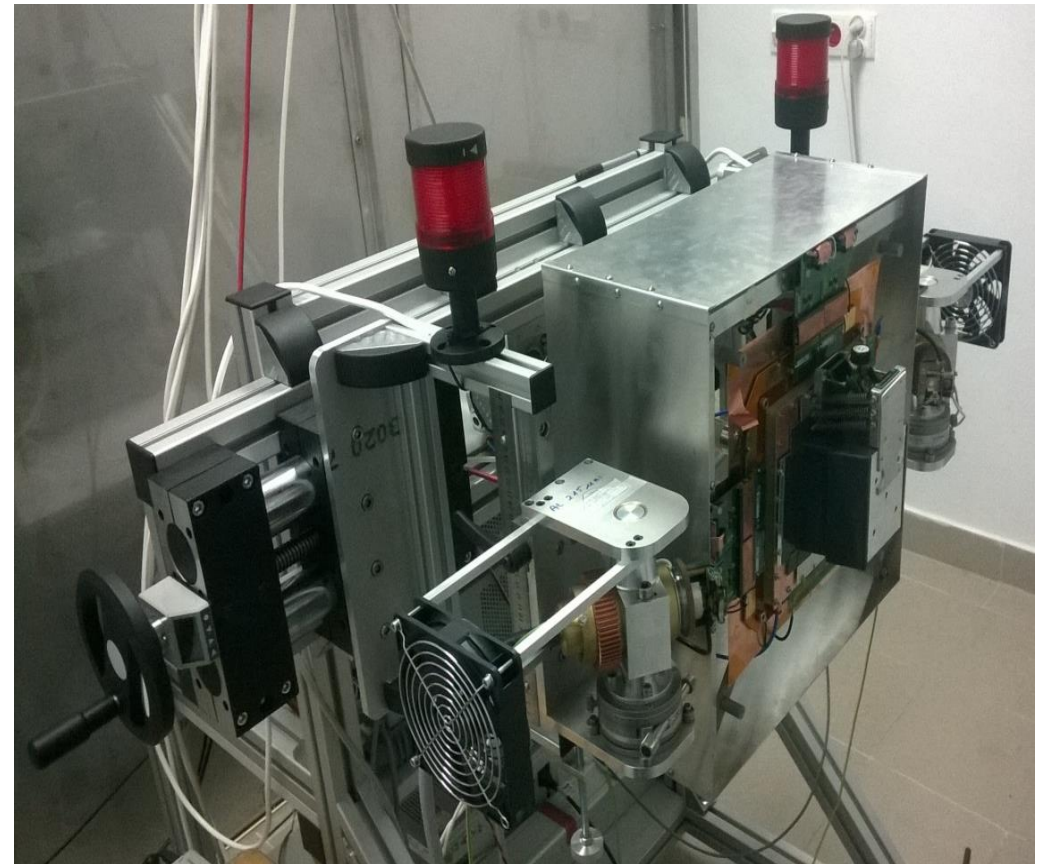
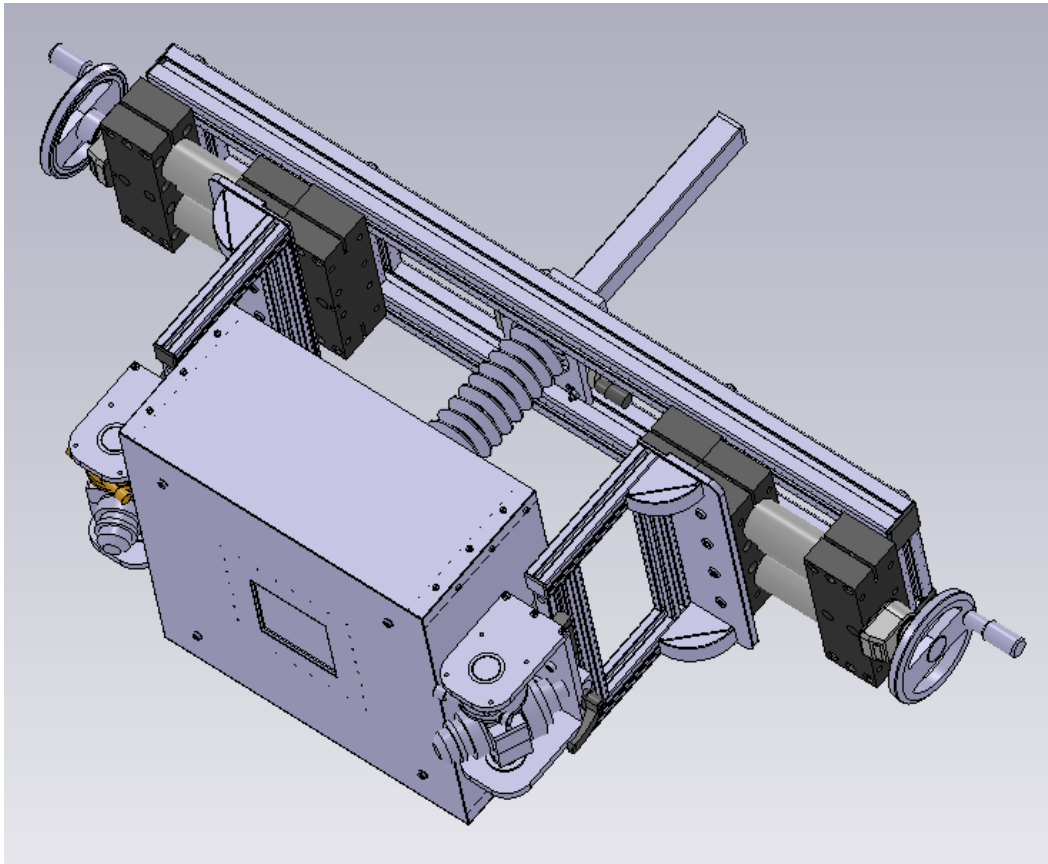
Fe-55 (FWHM) → **20.8%**
Ar/CO₂ (70/20)

ARTROC

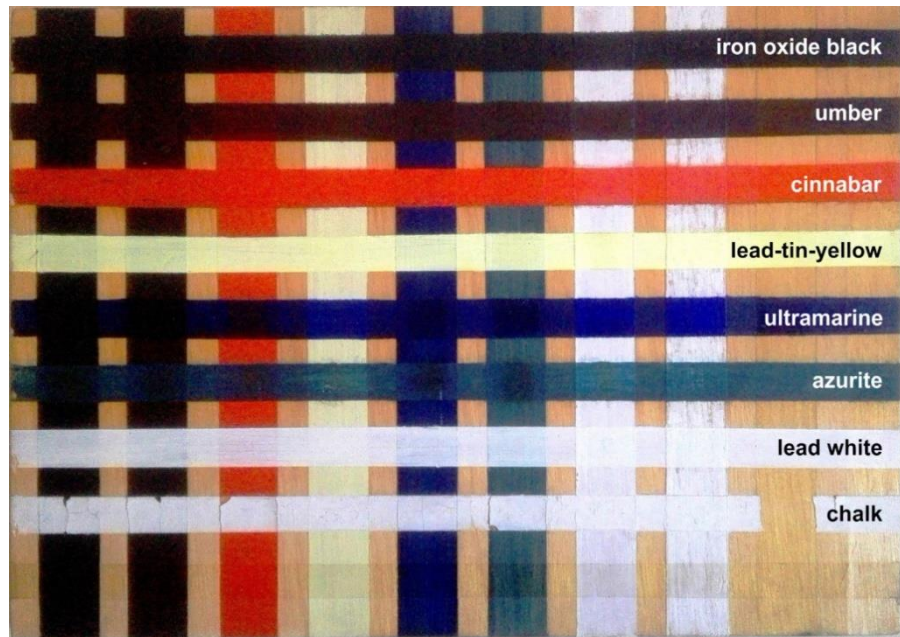


Fe-55 (FWHM) → **17.6%**
Ar/CO₂ (80/20)

Stanowisko testowe (AGH)



Obiekty testowe



Rozróżnianie pigmentów

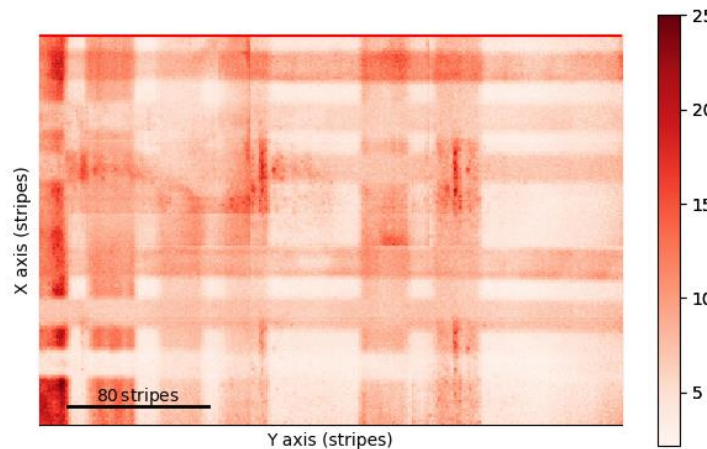
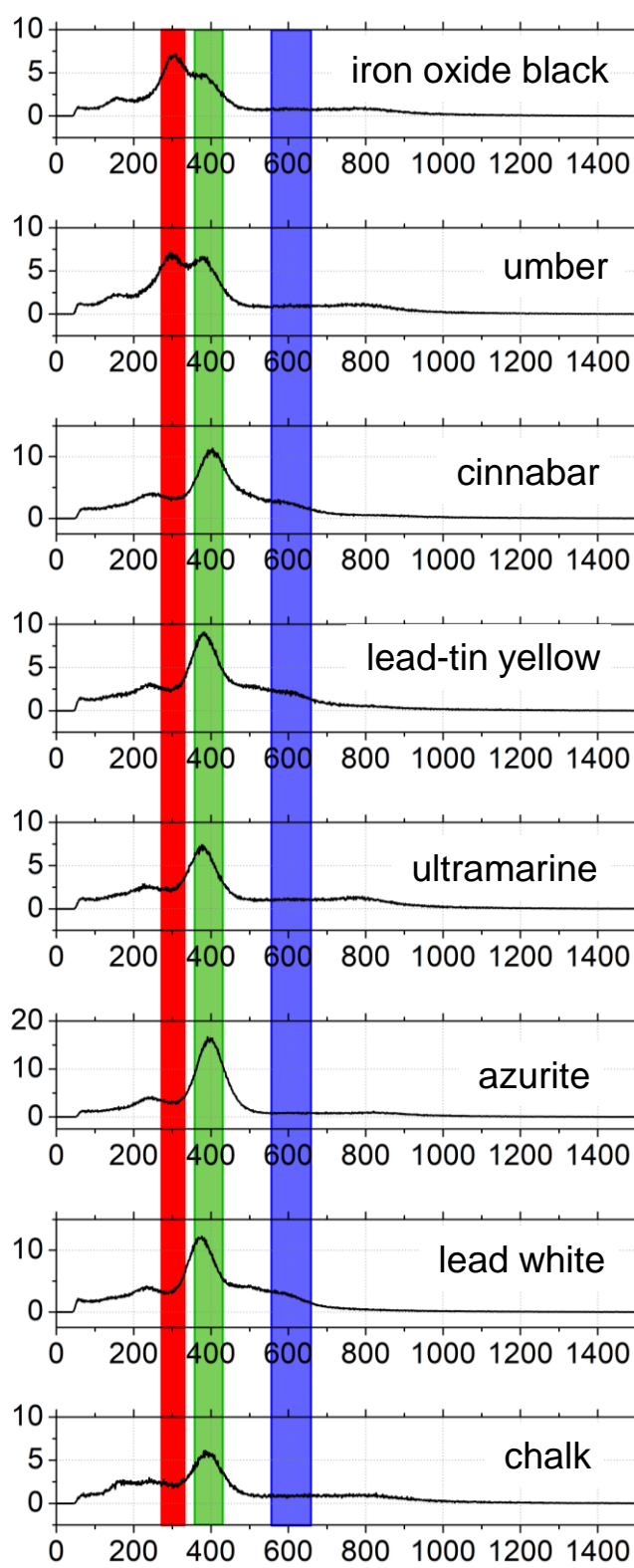


Ukryte warstwy

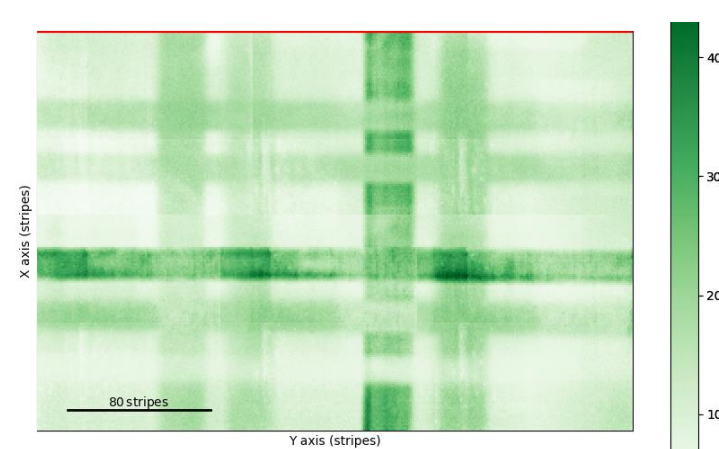


Głębina ostrości

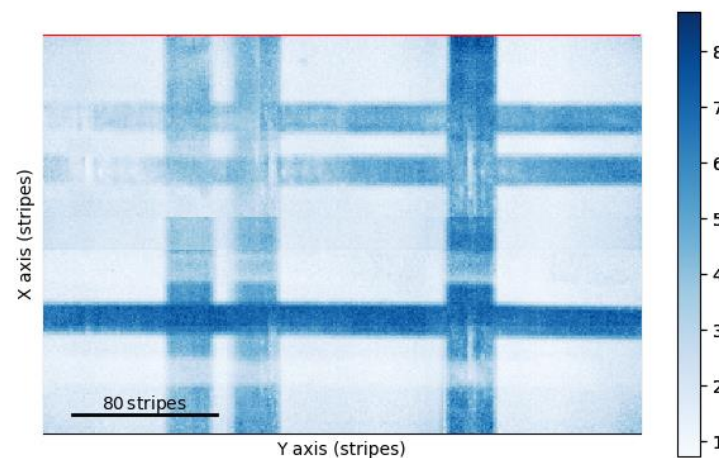
Rozróżnianie pigmentów



Mapa Fe



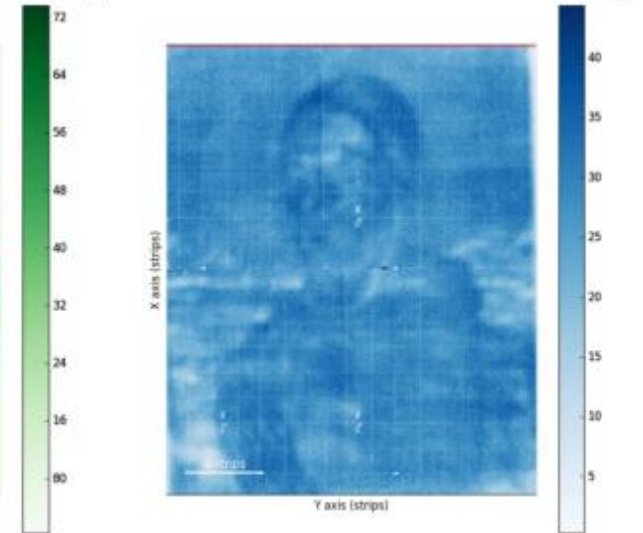
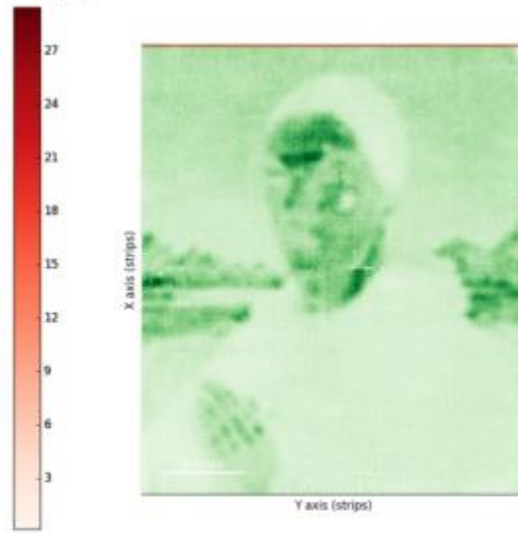
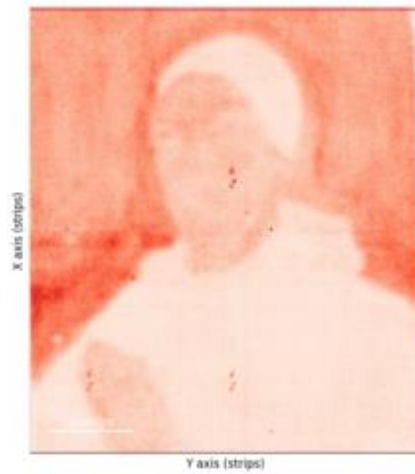
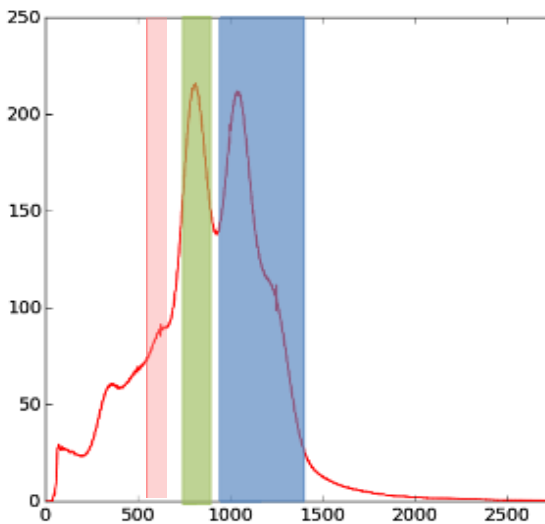
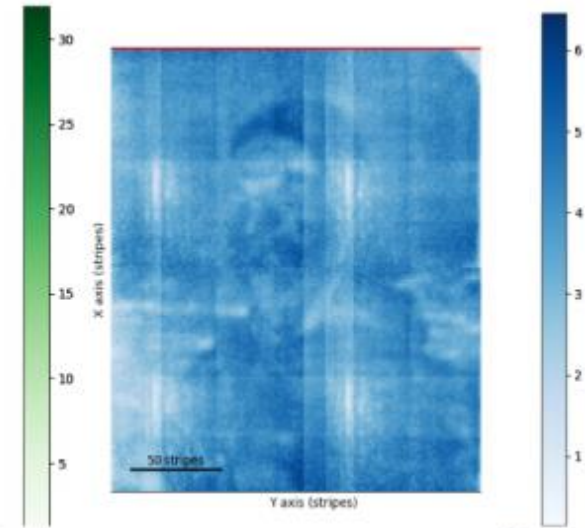
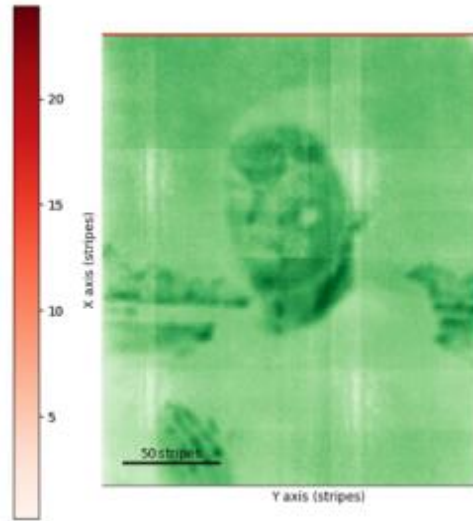
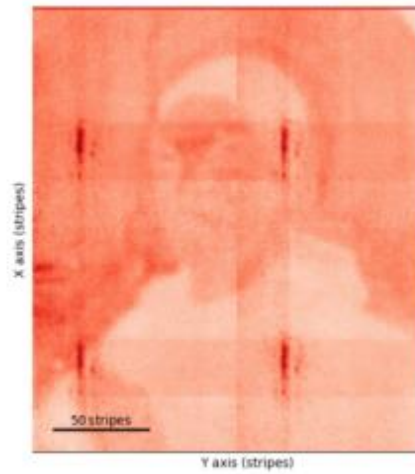
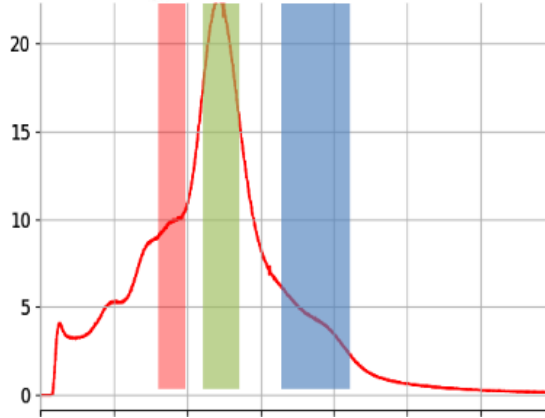
Mapa Cu



Mapa Pb i Hg



Ukryte warstwy (GEM Cu vs Cr)

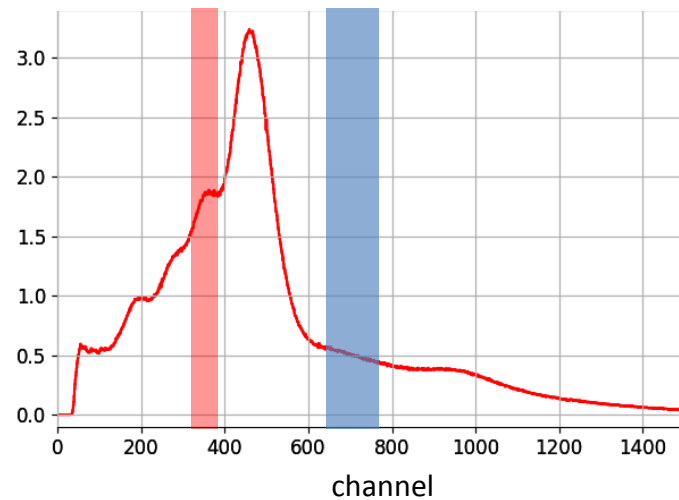
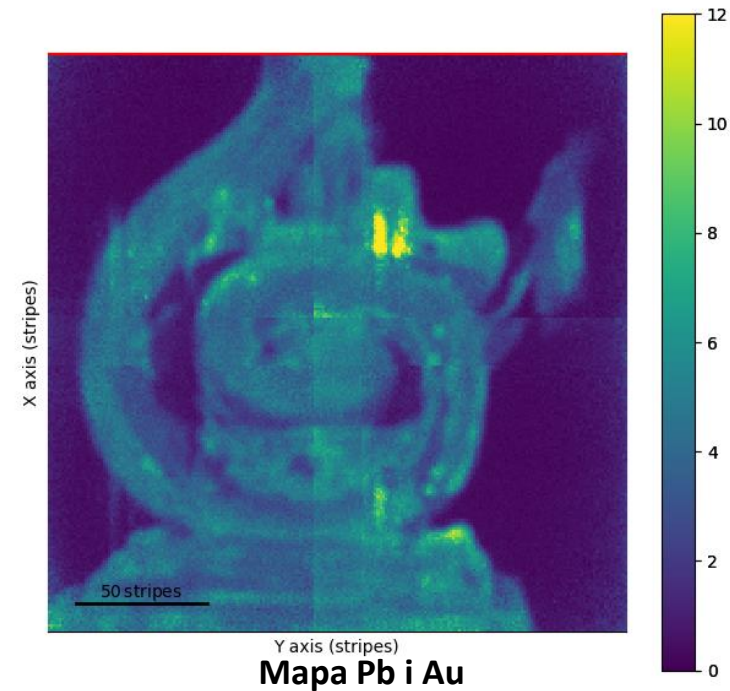
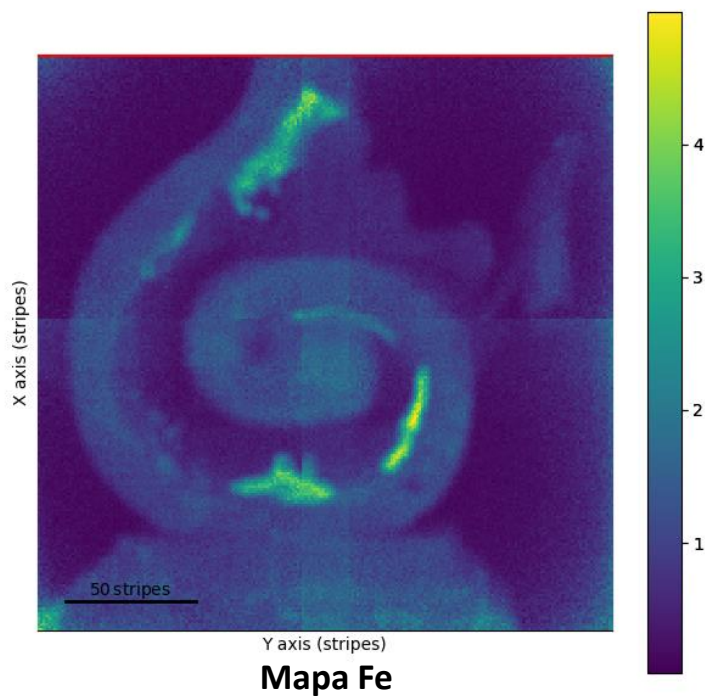


Mapa Fe i Mn (5.8-6.8 keV)

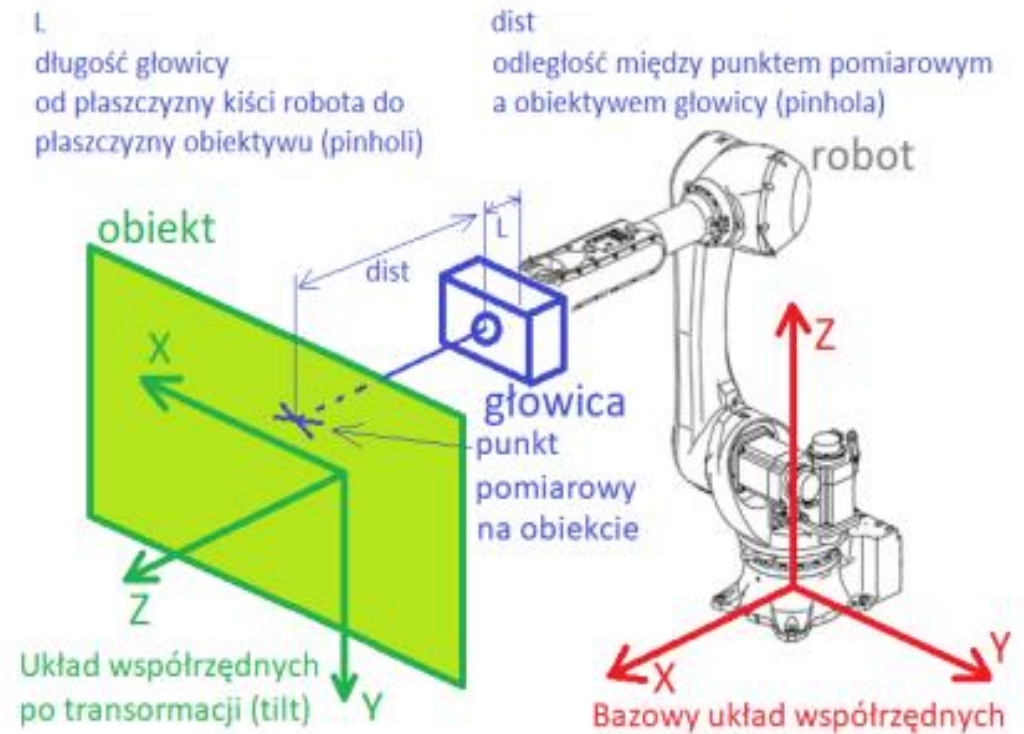
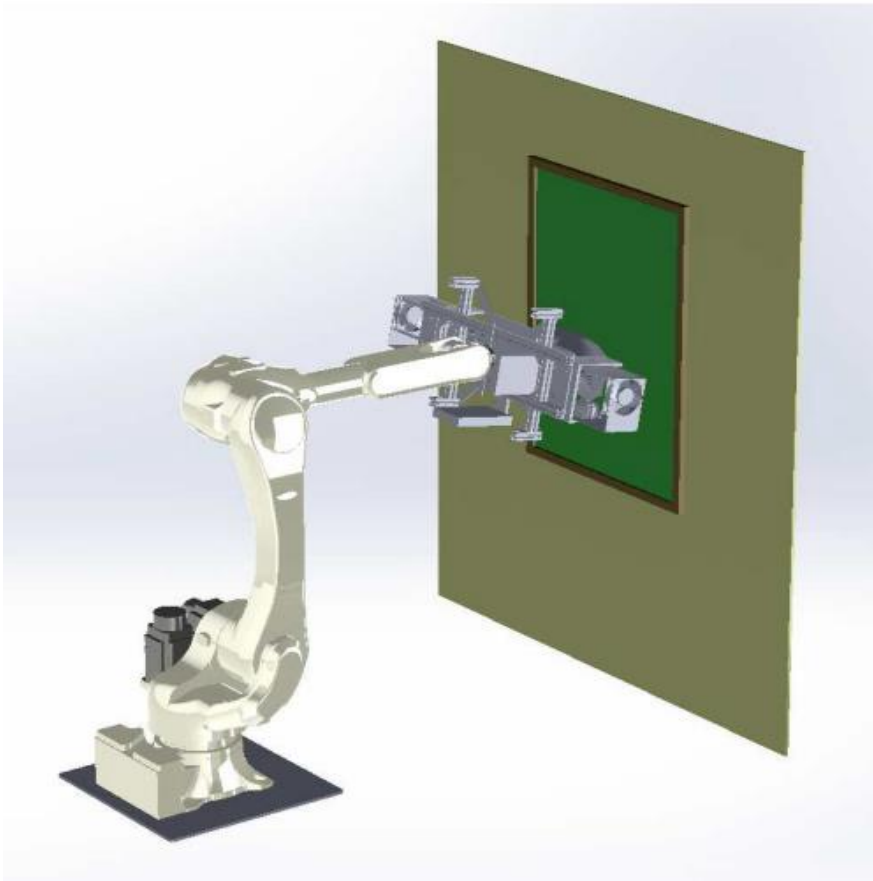
Mapa Cu (7.6-8.4 keV)

Mapa Pb i Hg (9.6-13 keV)

Głębia ostrości (obiekty niepłaskie)

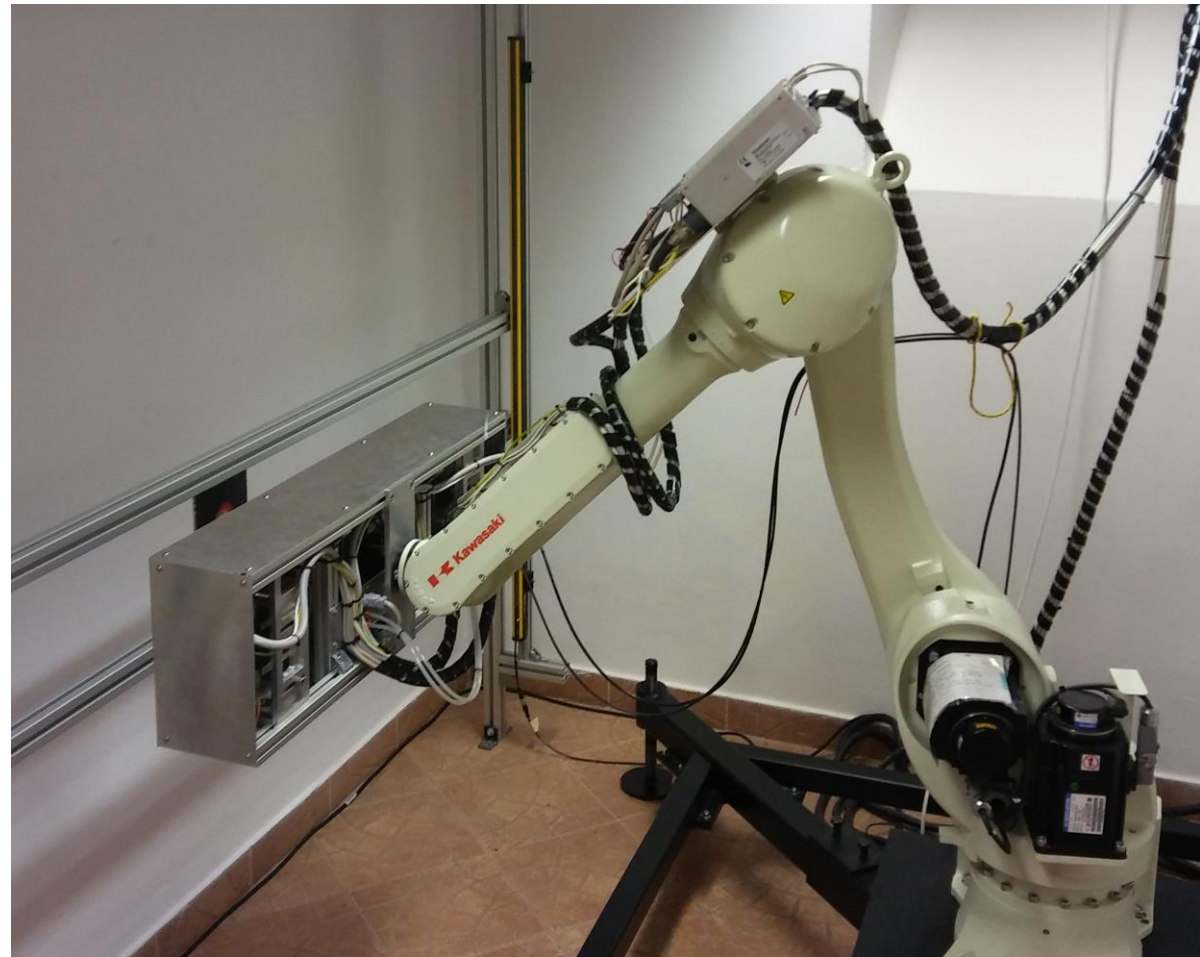


Układ pozycjonowania



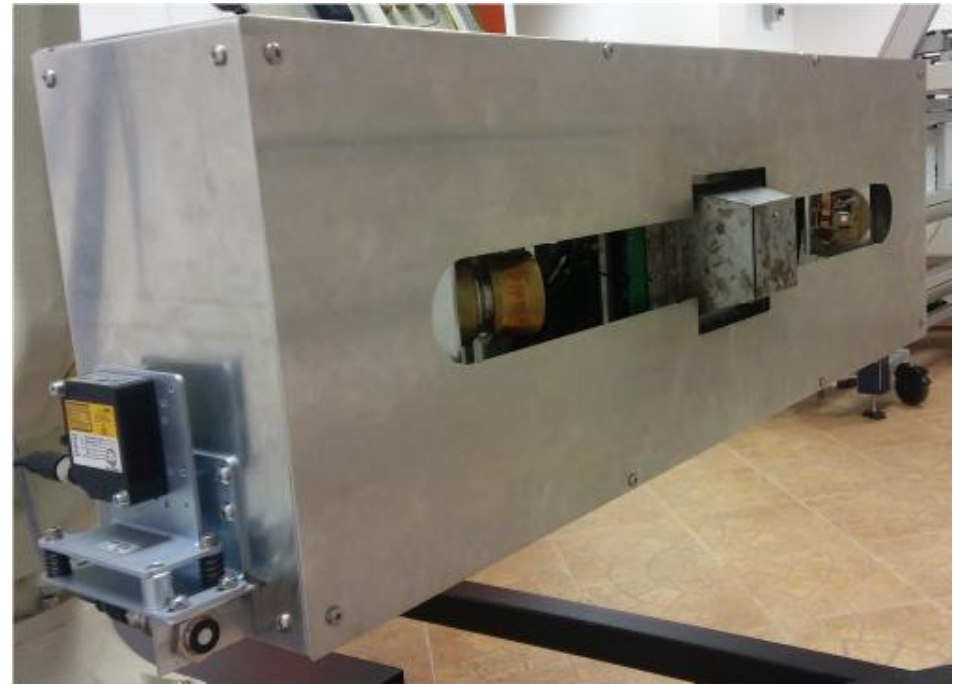
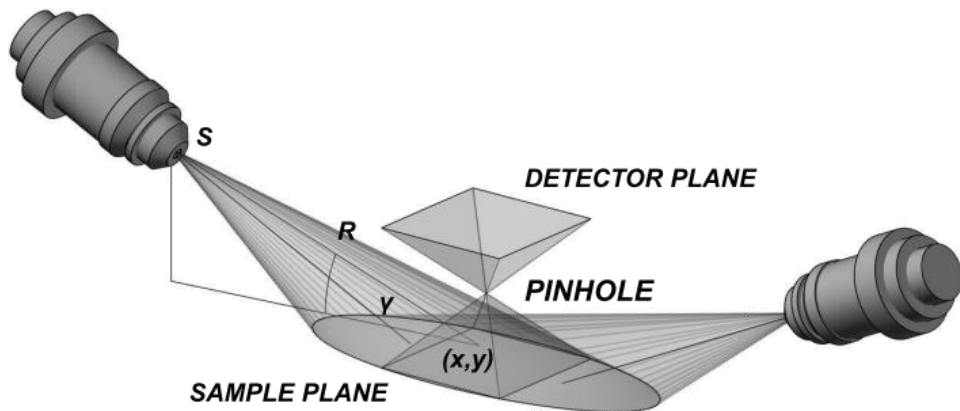
System DETART (MNK)

- Układ pozycjonowania
 - 6 stopni swobody
 - obszar roboczy 1,5×1,5m
 - „przenośny”
- System bezpieczeństwa:
 - kurtyny świetlne
 - kamera i czujniki odległości
 - ograniczony obszar ruchu
- Głowica pomiarowa
- System akwizycji danych

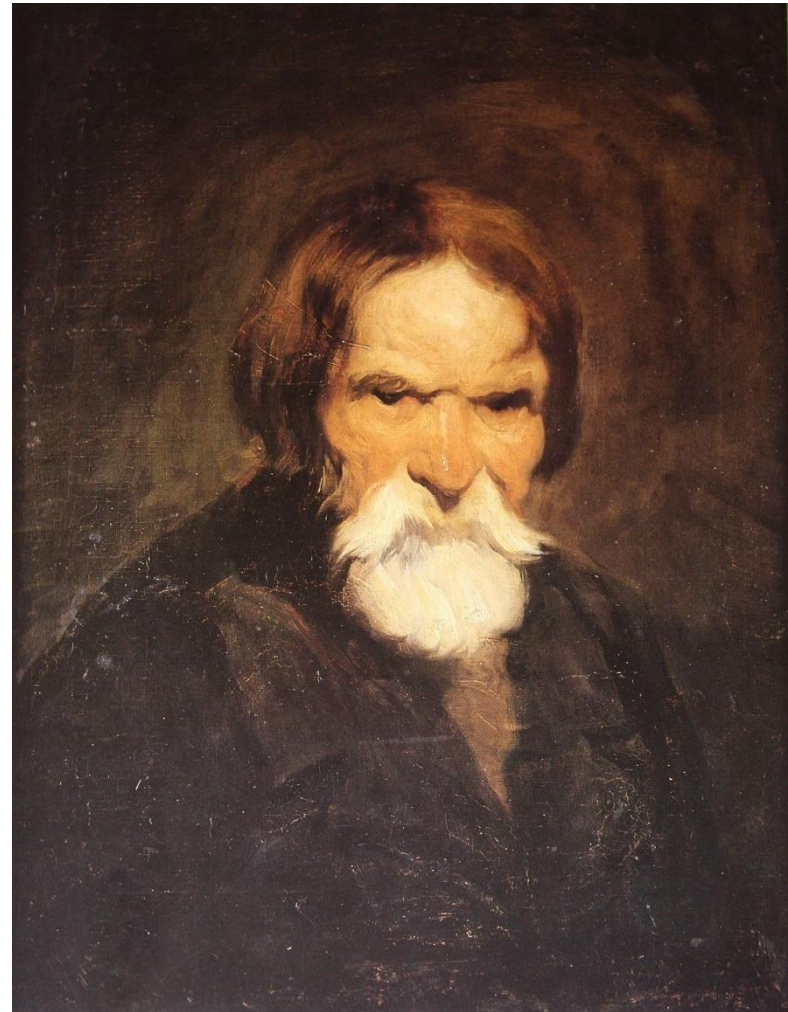


Głowica pomiarowa

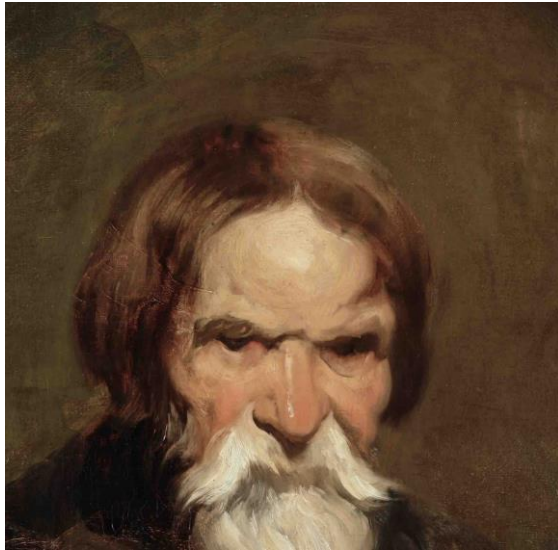
- Dwie lampy RTG małej mocy
- Jednorodne oświetlenie obszaru 10×10 cm
- System projekcyjny – kamera otworkowa
- Detektor gazowy typu GEM o 10×10 cm
- Dedykowany system odczytowy detektora
- Dedykowany układ zbierania danych



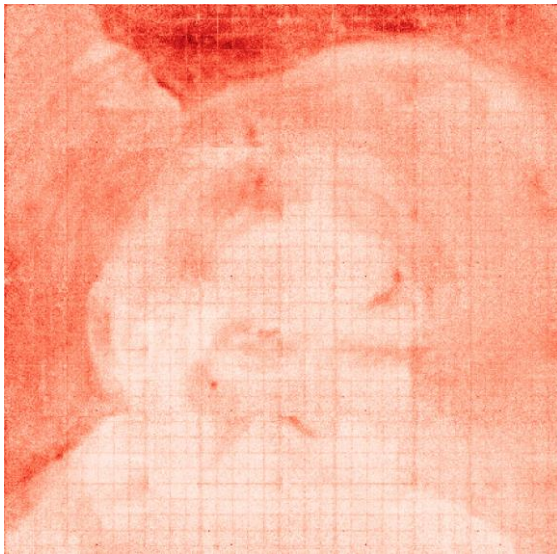
Czy coś tam jest pod spodem?



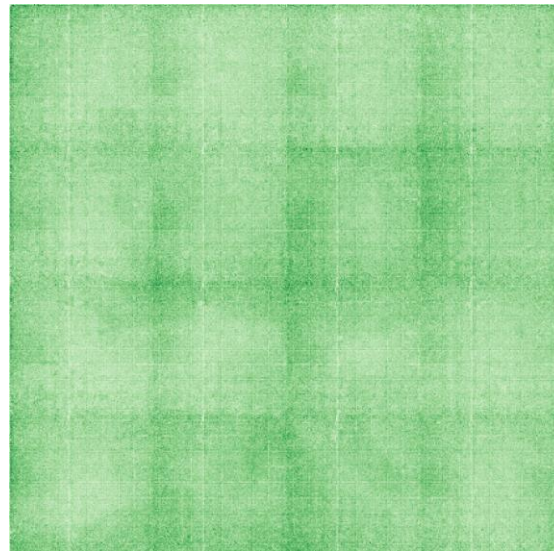
Czy coś tam jest pod spodem?



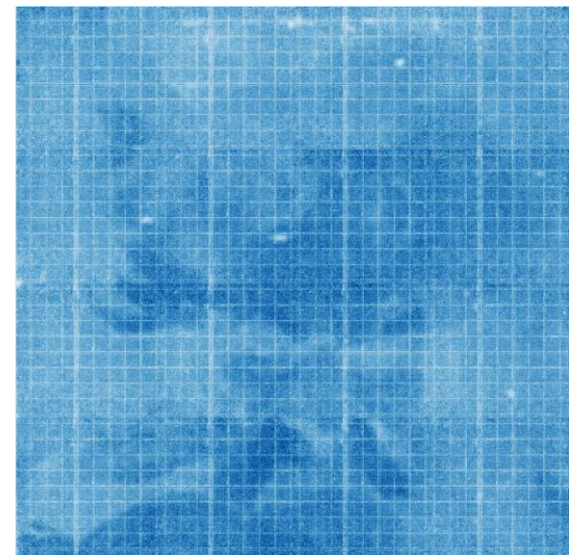
- Piotr Michałowski „Studium brodatego chłopca” (1846 – 1848)
- Mierzony obszar: 36×36 cm
- Ilość ramek: 16
- Czas pomiaru: 16×20 min → 5:20 h



Mapa Fe i Mn (5.9-6.9 keV)

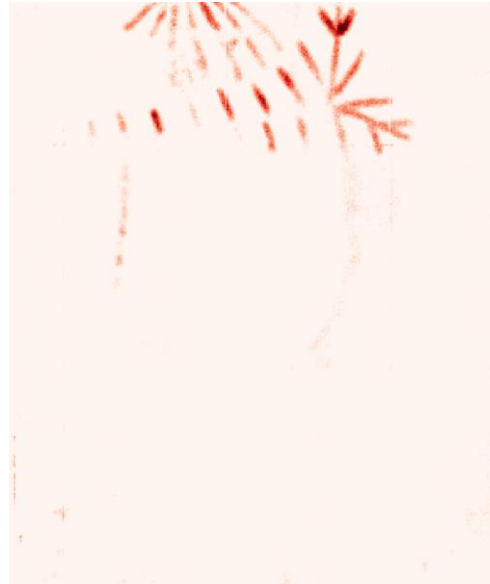


Mapa Cu (7.5-8.5 keV)

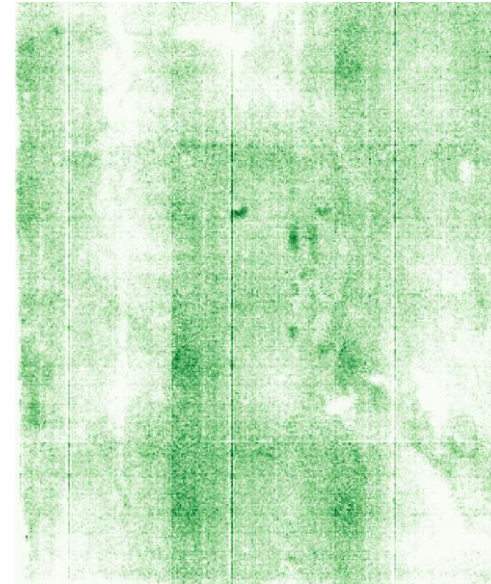


Mapa Pb (9.5-11.5 keV)

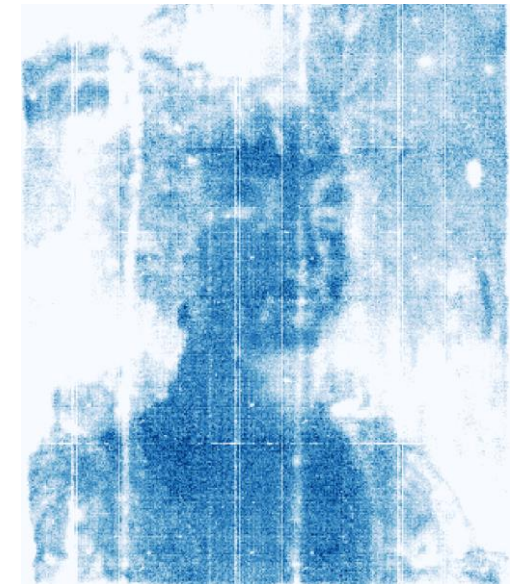
Czy coś tam jest pod spodem?



Mapa Fe i Mn (5.9-6.9 keV)



Mapa Cu (7.5-8.5 keV)



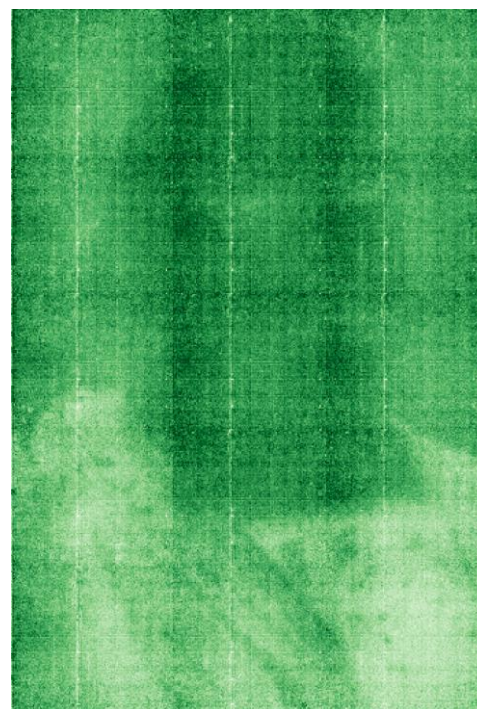
Mapa Pb (9.5-11.5 keV)

- Claude Deruet „Kobieta w kapeluszu” (1630 – 1640)
- Mierzony obszar: 30×25 cm
- Ilość ramek: 12
- Czas pomiaru: 12×20 min → 4 h

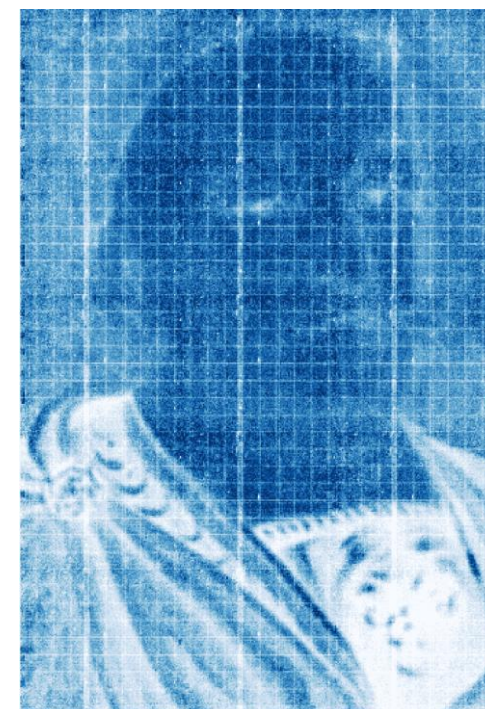
Czy coś tam jest pod spodem?



Mapa Fe i Mn (5.9-6.9 keV)



Mapa Cu (7.5-8.5 keV)



Mapa Pb (9.5-11.5 keV)

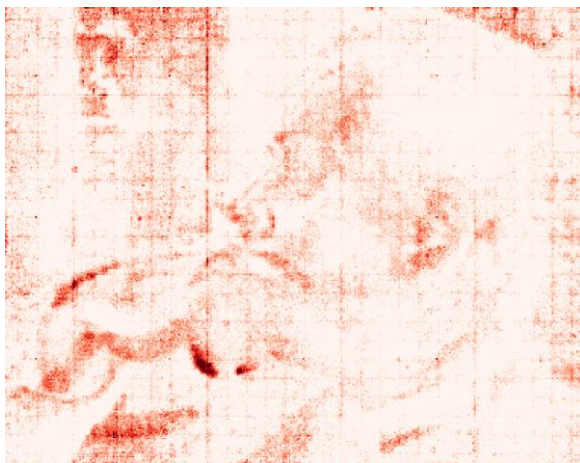
- Autor nieznany „Jan III Sobieski w karacenie” (druga połowa XVII w.)
- Mierzony obszar: 43×26 cm
- Ilość ramek: 15
- Czas pomiaru: 15×20 min → 5 h



Czy coś tam jest pod spodem?



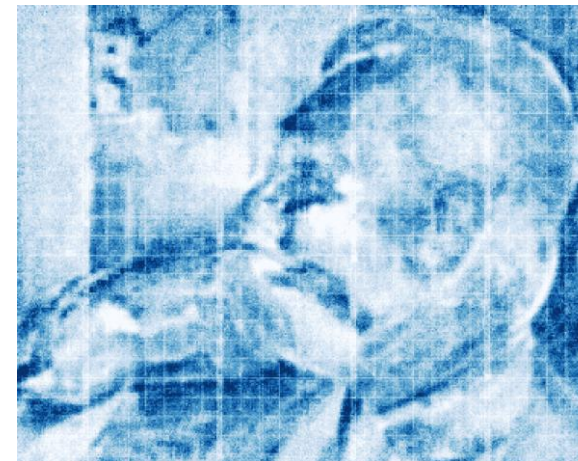
- Jacek Malczewski „Portret Mieczysława Gąseckiego” (1923)
- Mierzony obszar: 23×29 cm
- Ilość ramek: 12
- Czas pomiaru: 12×20 min → 4 h



Mapa Fe i Mn (5.9-6.9 keV)



Mapa Cu (7.5-8.5 keV)



Mapa Pb (9.5-11.5 keV)

Nowe metody analizy danych

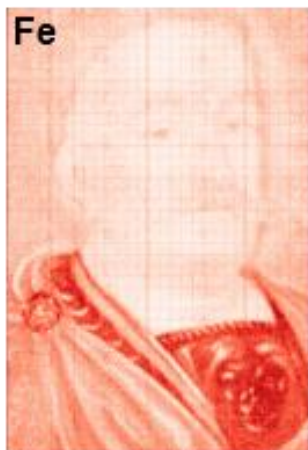


AGH

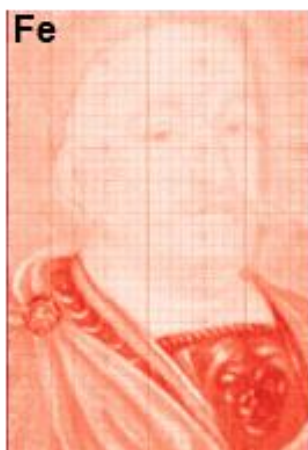
ROI



NMF



PCA



Wnioski i możliwe kierunki rozwoju

- Obrazowanie metodą full-field XRF z wykorzystaniem detektora gazowego typu GEM jest możliwe. Znamy ograniczenia systemu.
- Zaproponowana metoda jest bardzo atrakcyjna:
 - dla szybkiego (wstępnego) obrazowania rozkład pierwiastków
 - przy obrazowaniu powierzchni niepłaskich (infinite depth of view)
- Zmiana systemu projekcji obrazu na detektor
- Udoskonalenie oprogramowania i metod obróbki danych pomiarowych