

GRAFIKA KOMPUTEROWA

Wykład 7: grafika komputerowa w medycynie

Tymon Rubel

Zakład Elektroniki Jądrowej i Medycznej
Instytut Radioelektroniki i Technik Multimedialnych PW

Materiały opracowane w ramach zadania 15 „Modyfikacja międzywydziałowych studiów I stopnia na kierunku Inżynieria Biomedyczna” projektu „NERW PW. Nauka - Edukacja - Rozwój - Współpraca”, współfinansowanego jest ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego



Fundusze Europejskie
Wiedza Edukacja Rozwój

**Politechnika
Warszawska**

Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny



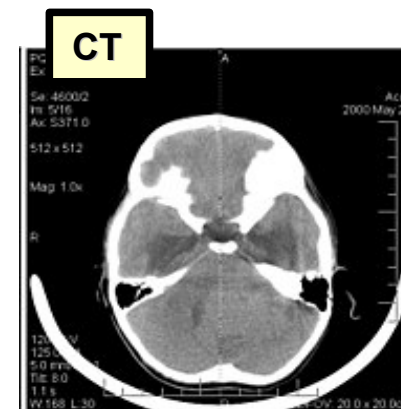
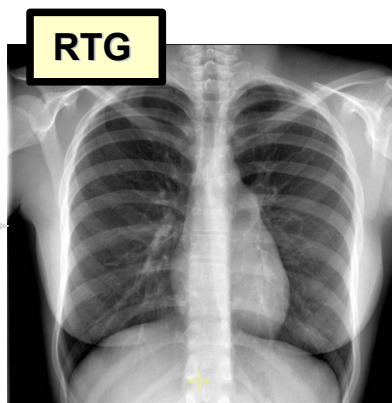
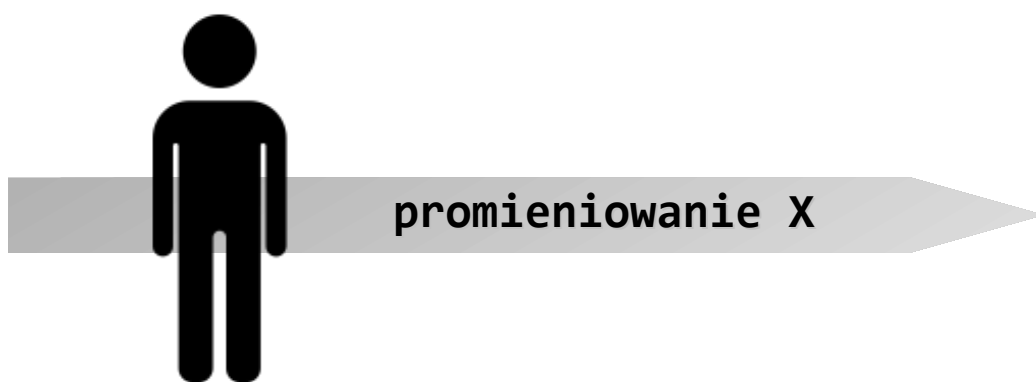
Grafika komputerowa jest obecnie często wykorzystywana w wielu obszarach nauk medycznych. Wśród najważniejszych zastosowań można wymienić m. in.:

- **wizualizację i przetwarzanie danych z diagnostycznych technik obrazowania;**
- **planowanie zabiegów operacyjnych i procedur terapeutycznych (np. radioterapii);**
- **wspomaganie projektowania implantów i protez;**
- **graficzną prezentację modeli anatomicznych i biomechanicznych;**
- **tworzenie interfejsów użytkownika na potrzeby aplikacji i sprzętu;**
- ...

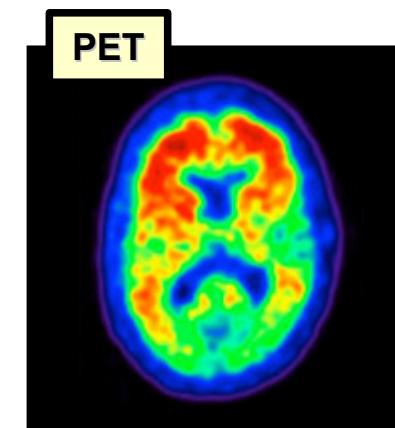
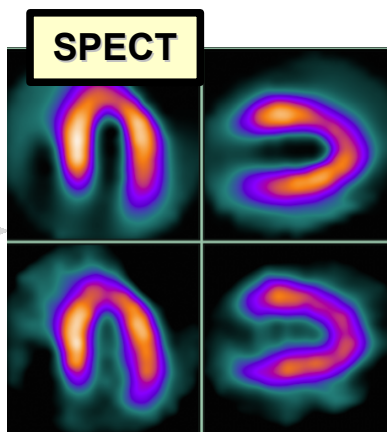
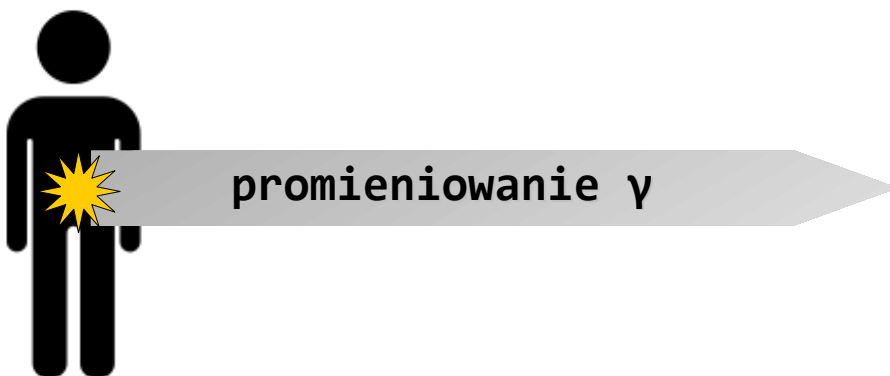
Obrazowanie medyczne: techniki

Współczesna diagnostyka medyczna dysponuje wieloma technikami obrazowania, wykorzystującymi różnorodne zjawiska fizyczne, w tym:

- oddziaływanie promieniowania rentgenowskiego (X) z tkankami: **radiografia (RTG)** oraz **rentgenowska tomografia komputerowa (CT)**;



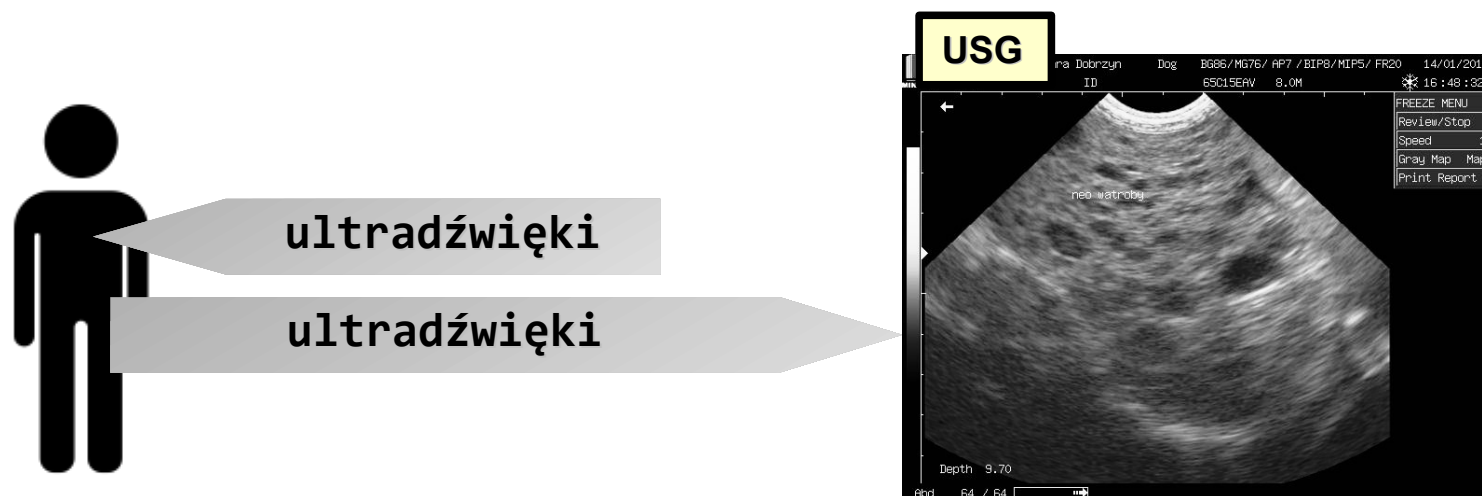
- generację promieniowania jonizującego przez radioizotop wprowadzony do ciała pacjenta: **tomografie emisyjne (PET i SPECT)**;



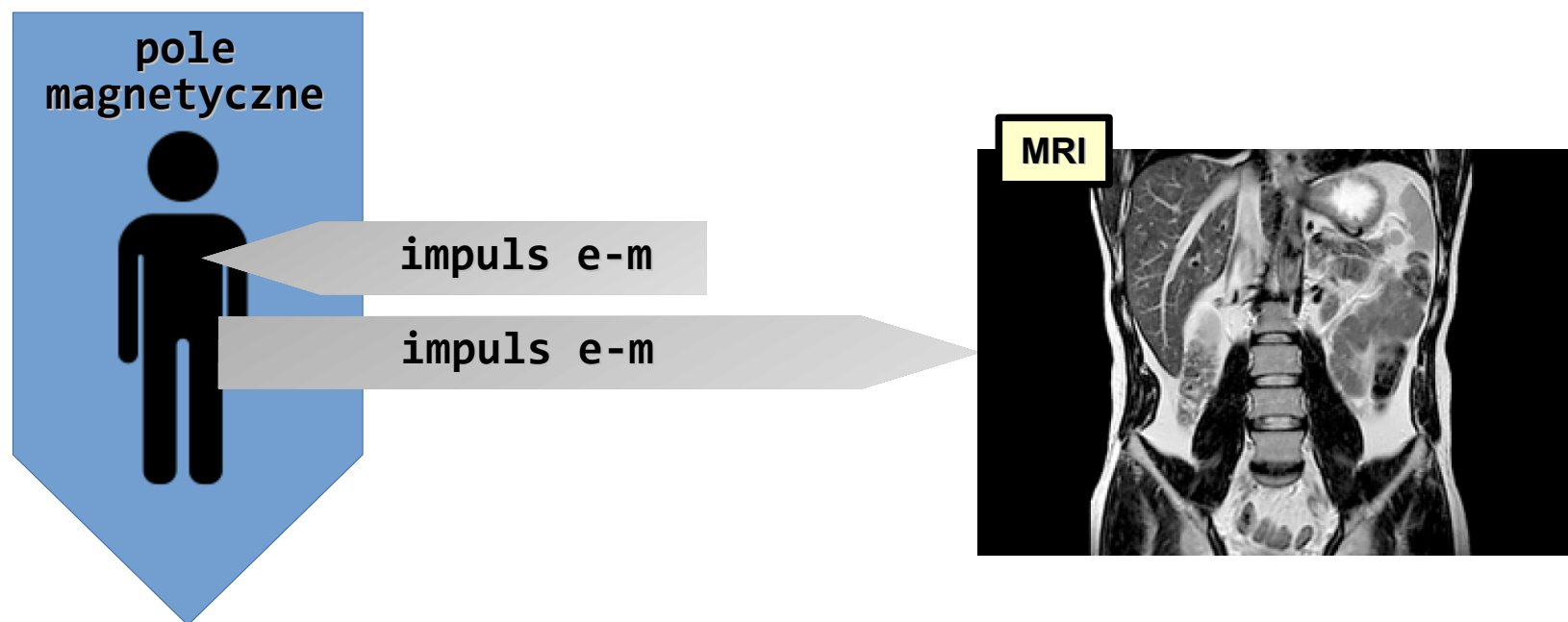
- emisję ciepła (promieniowania e-m w zakresie podczerwieni): **termografia (TG)**;



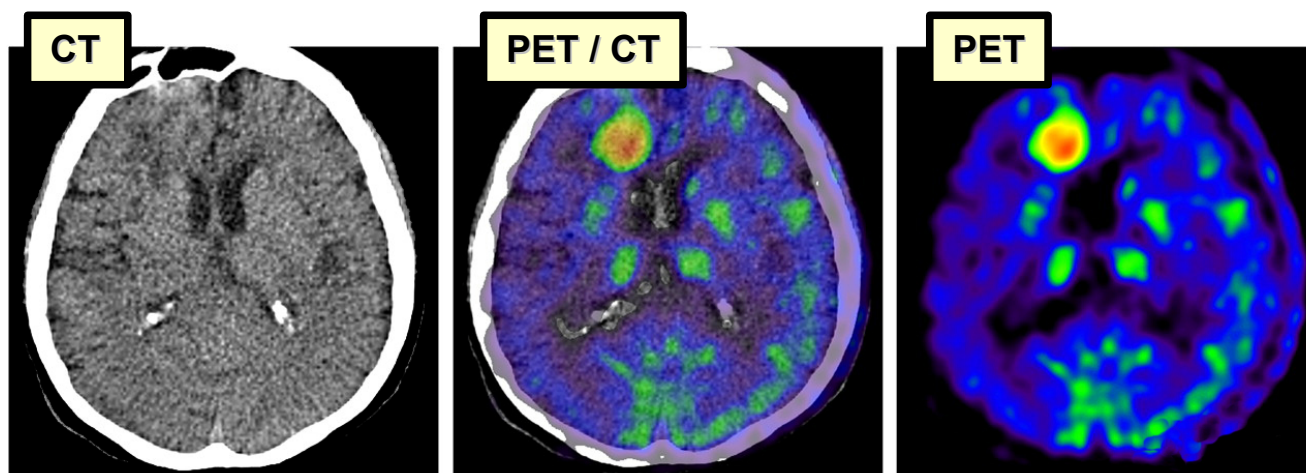
- propagację fal ultradźwiękowych w ciele człowieka: **ultrasonografia (USG)**;



- magnetyczny rezonans jądrowy: **tomografia rezonansu magnetycznego (MRI)**;



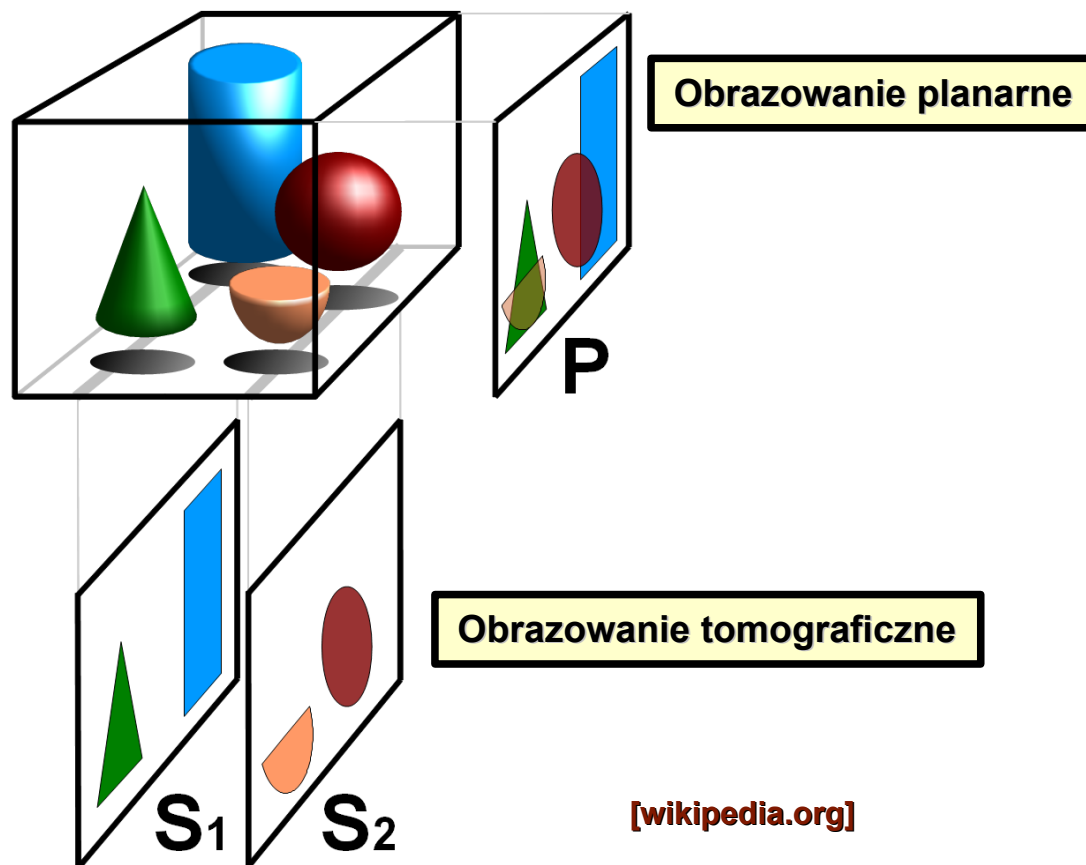
Możliwe jest również łączenie (fuzja) danych z różnych technik obrazowania w celu ich wspólnej interpretacji.



Obrazowanie medyczne: techniki planarne i tomograficzne

Ze względu na charakter uzyskiwanych danych metody obrazowania medycznego można podzielić na dwie ogólne grupy:

- w **technikach planarnych** otrzymuje się obraz zawierający rzuty na płaszczyznę wszystkich obiektów znajdujących się wewnątrz analizowanej objętości;
- **techniki tomograficzne** dostarczają serii obrazów będących kolejnymi przekrojami badanej objętości.

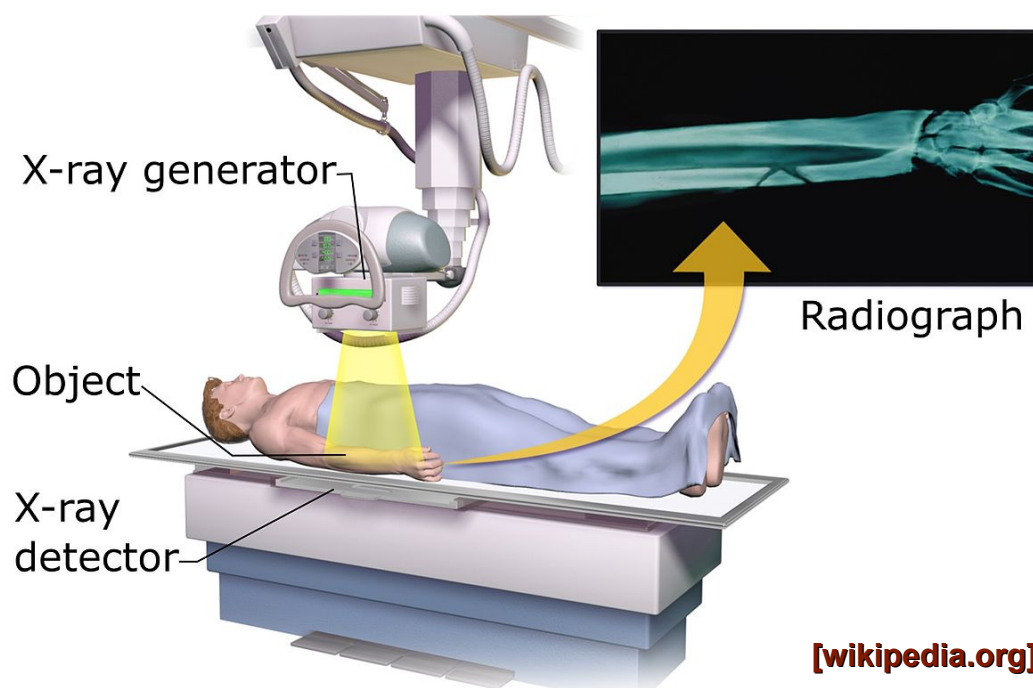


Obrazowanie medyczne: radiografia

Przykładem techniki planarnej jest **radiografia rentgenowska (RTG)**, u podstaw której leży zróżnicowanie pochłaniania promieniowania rentgenowskiego (promieniowania X) przez poszczególne rodzaje tkanek.

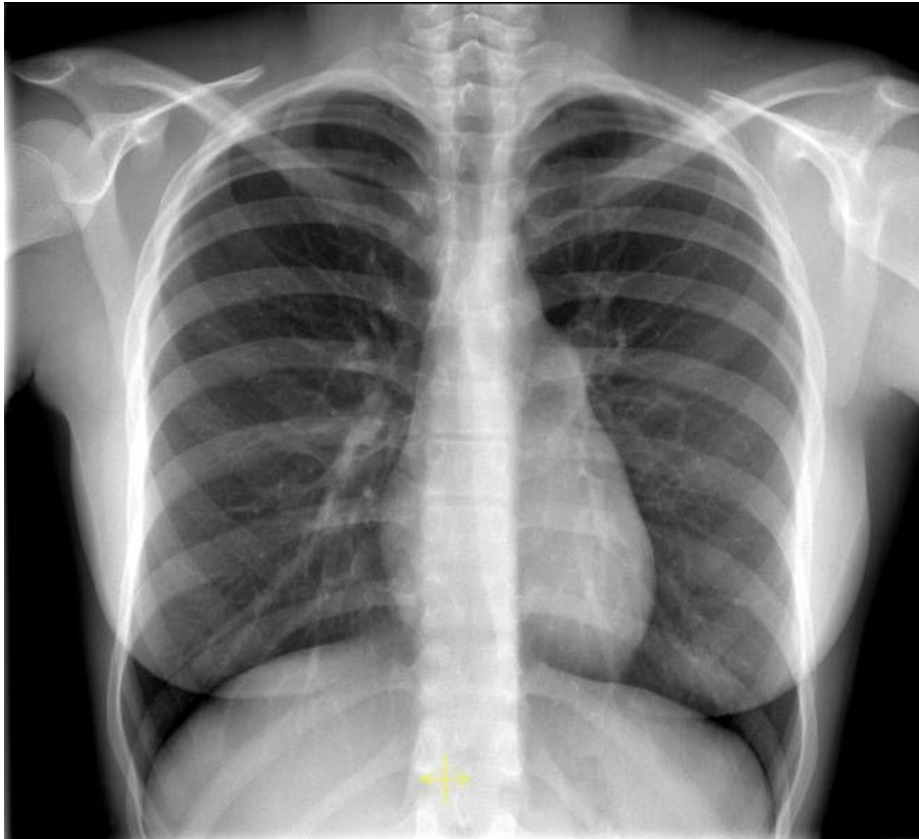
Pacjenta umieszcza się pomiędzy źródłem promieniowania X (lampą rentgenowską), a detektorem rejestrującym promieniowanie, które nie zostało pochłonięte w ciele.

Wynikiem badania jest dwuwymiarowy obraz niosący informacje o całkowitym osłabieniu promieniowania przez tkanki znajdujące się na drodze wiązki.



Obrazowanie medyczne: radiografia

Tradycyjnie obrazy RTG wyświetlane jako negatywy: piksel jest tym jaśniejszy, im tkanki w odpowiadającej mu objętości silniej pochłaniają promieniowanie.

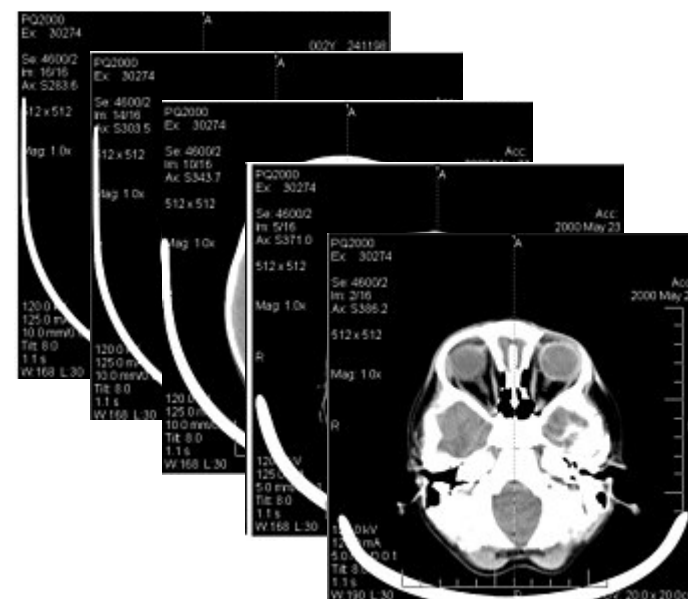
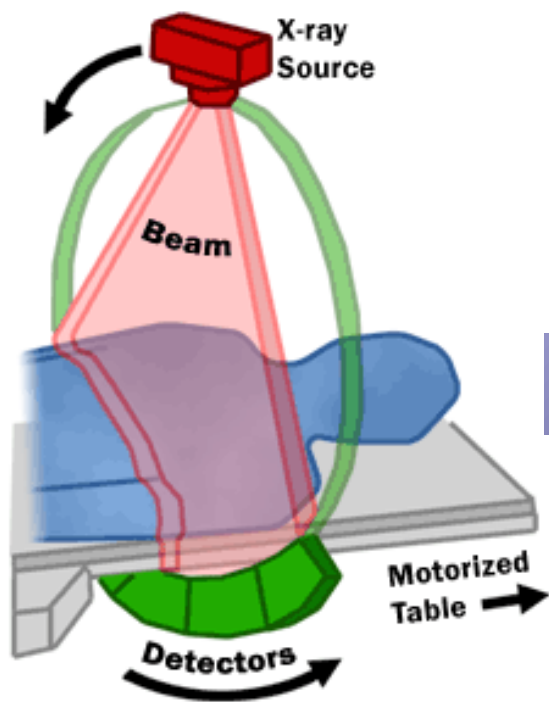


Obrazowanie medyczne: tomografia komputerowa

Przykładem powszechnie wykorzystywanej tomograficznej techniki obrazowania jest **rentgenowska tomografia komputerowa (X-ray Computed Tomography, CT)**.

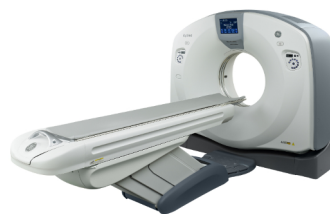
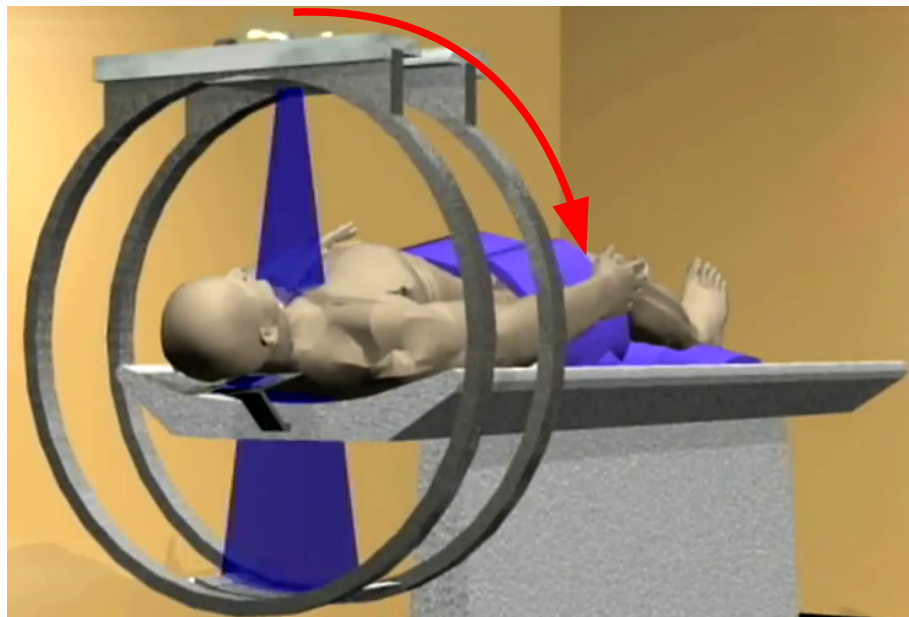
Tak jak w przypadku zwykłej radiografii rentgenowskiej, w tomografii komputerowej również wykorzystuje się zjawisko pochłaniania promieniowania X przez tkanki.

Pomiędzy tymi metodami występują jednak znaczące różnice w sposobie tworzenia oraz interpretowania obrazów: wynikiem badania CT jest **zestaw dwuwymiarowych przekrojów pacjenta (skanów)** wykonywanych przez prześwietlanie cienkich warstw ciała pod różnymi kątami za pomocą wachlarzowatej wiązki promieni.

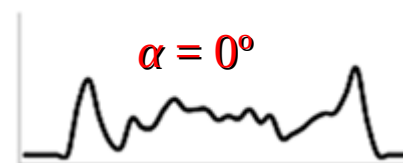


Obrazowanie medyczne: tomografia komputerowa (pomiar)

Skan powstaje na podstawie dużej liczby **projekcji** wykonanych pod różnymi kątami z zakresu $[0^\circ, 360^\circ]$. Każda z nich jest jednowymiarową funkcją opisującą całkowite pochłanianie promieniowania X w prześwietlanej warstwie pod danym kątem.

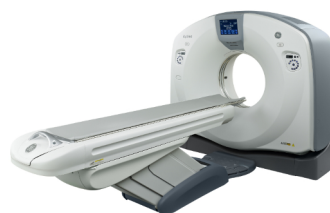
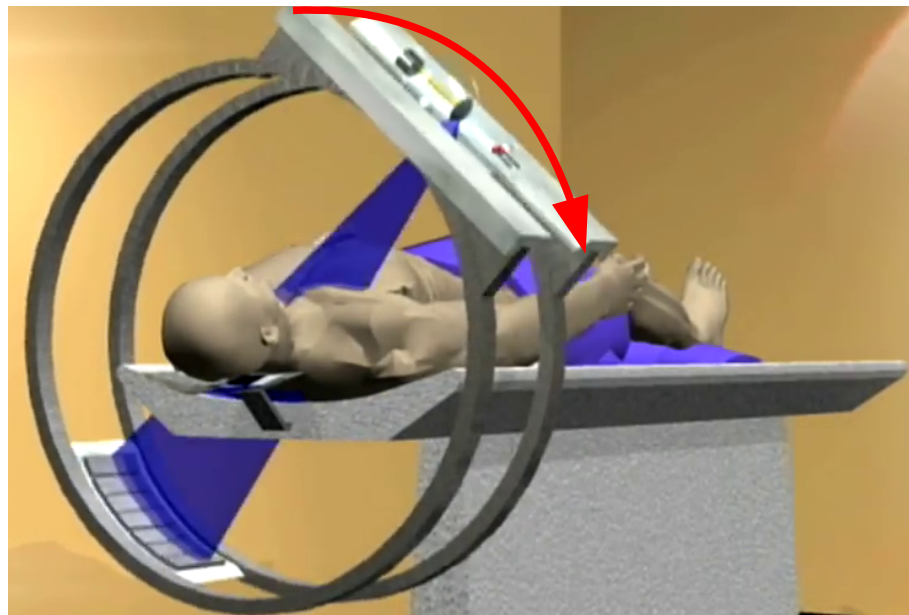


Pomiar

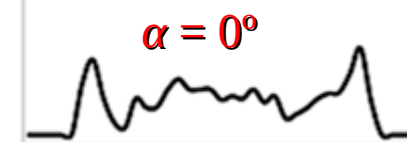


Obrazowanie medyczne: tomografia komputerowa (pomiar)

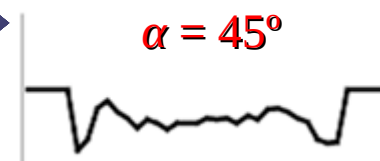
Skan powstaje na podstawie dużej liczby **projekcji** wykonanych pod różnymi kątami z zakresu $[0^\circ, 360^\circ]$. Każda z nich jest jednowymiarową funkcją opisującą całkowite pochłanianie promieniowania X w prześwietlanej warstwie pod danym kątem.



Pomiar

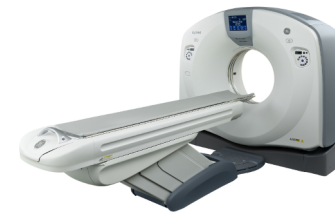
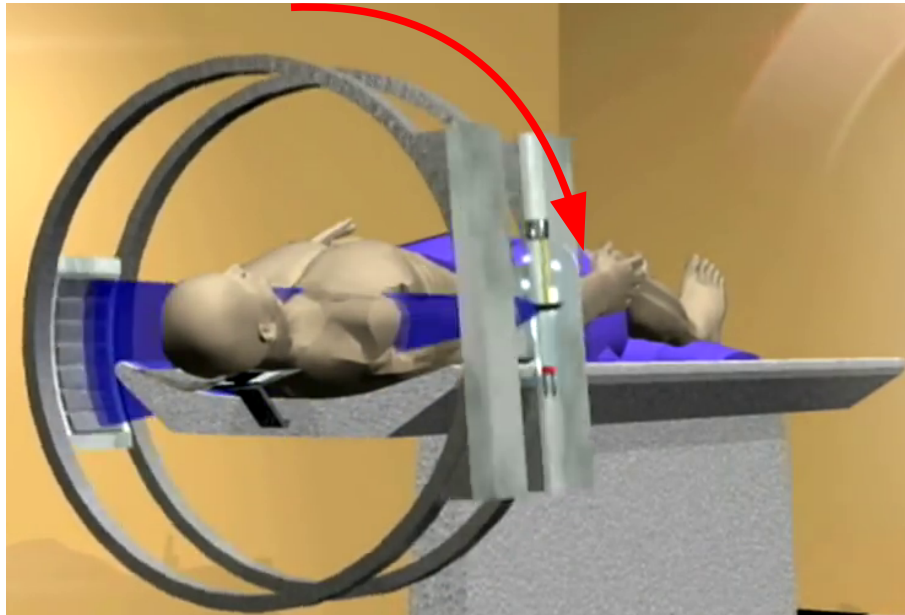


$\vdots$

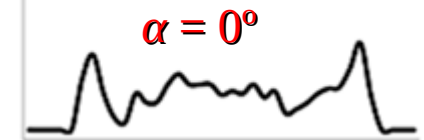


Obrazowanie medyczne: tomografia komputerowa (pomiar)

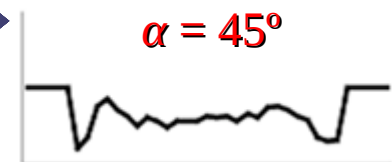
Skan powstaje na podstawie dużej liczby **projekcji** wykonanych pod różnymi kątami z zakresu $[0^\circ, 360^\circ]$. Każda z nich jest jednowymiarową funkcją opisującą całkowite pochłanianie promieniowania X w prześwietlanej warstwie pod danym kątem.



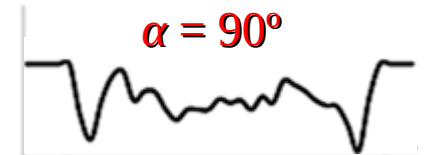
Pomiar



⋮

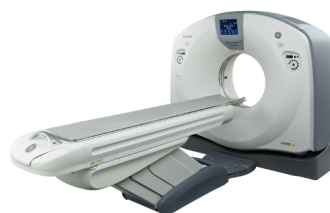
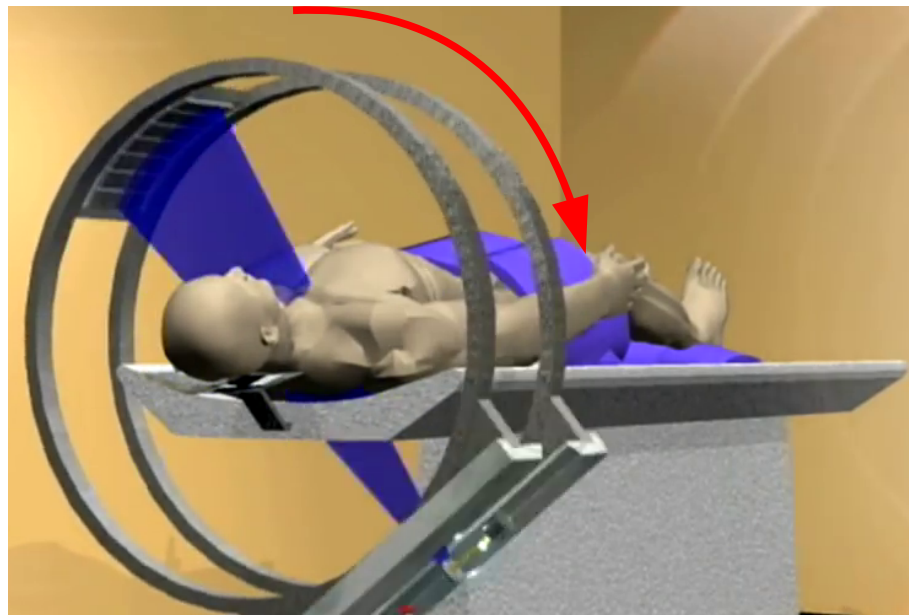


⋮

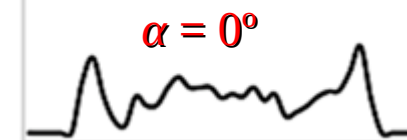


Obrazowanie medyczne: tomografia komputerowa (pomiar)

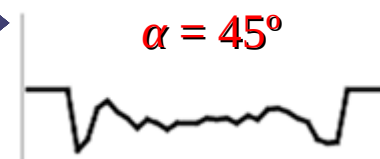
Skan powstaje na podstawie dużej liczby **projekcji** wykonanych pod różnymi kątami z zakresu $[0^\circ, 360^\circ]$. Każda z nich jest jednowymiarową funkcją opisującą całkowite pochłanianie promieniowania X w prześwietlanej warstwie pod danym kątem.



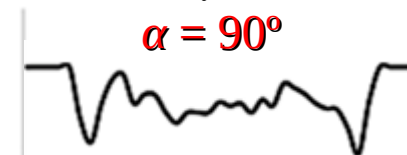
Pomiar



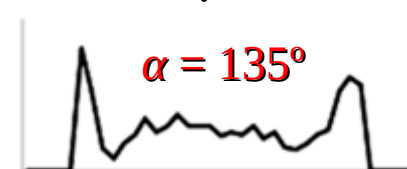
⋮



⋮

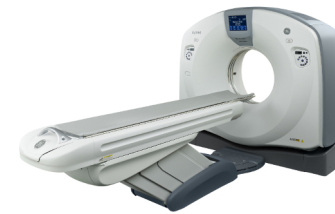
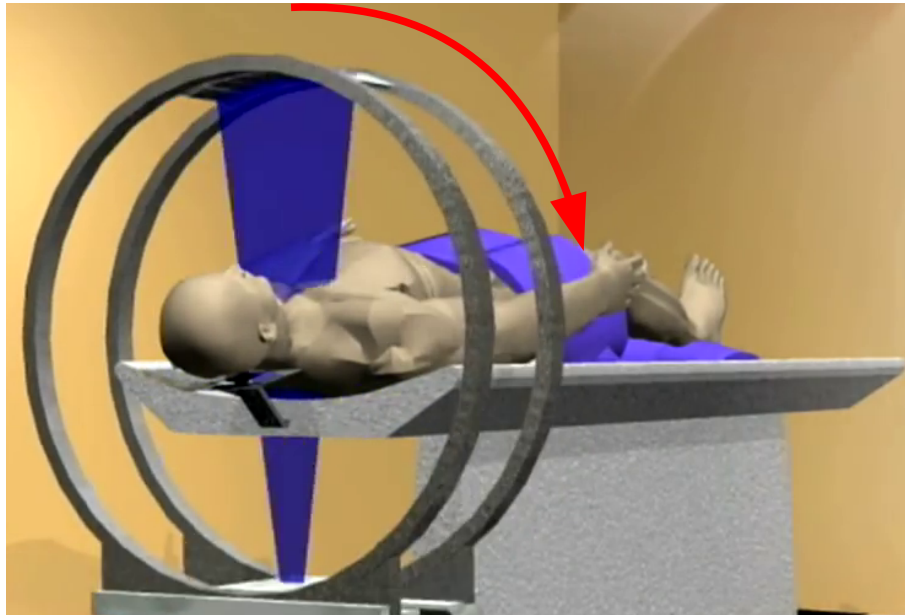


⋮

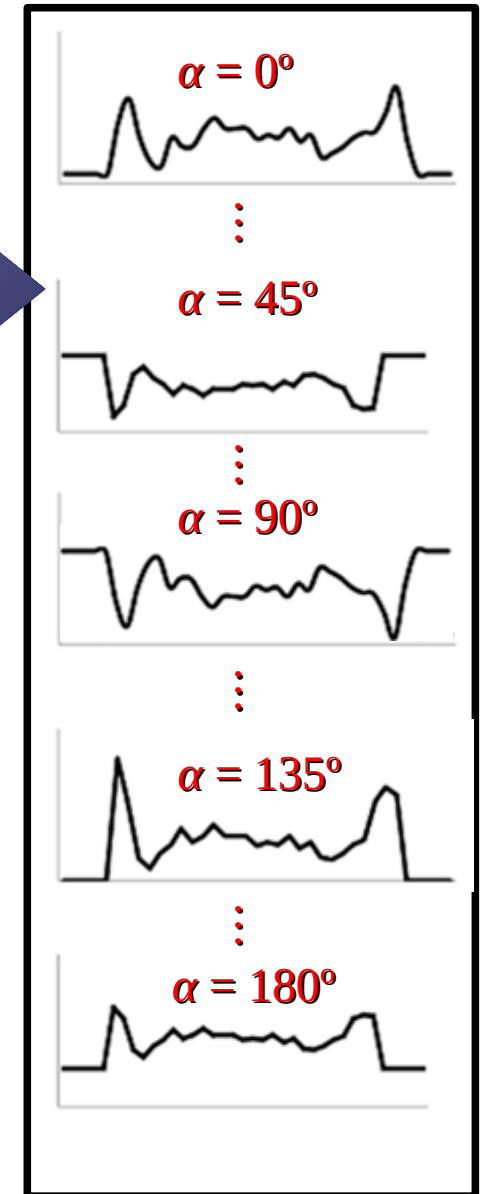


Obrazowanie medyczne: tomografia komputerowa (pomiar)

Skan powstaje na podstawie dużej liczby **projekcji** wykonanych pod różnymi kątami z zakresu $[0^\circ, 360^\circ]$. Każda z nich jest jednowymiarową funkcją opisującą całkowite pochłanianie promieniowania X w prześwietlanej warstwie pod danym kątem.

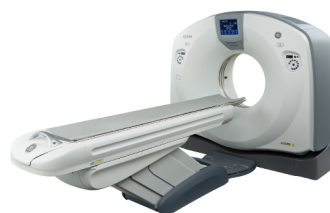
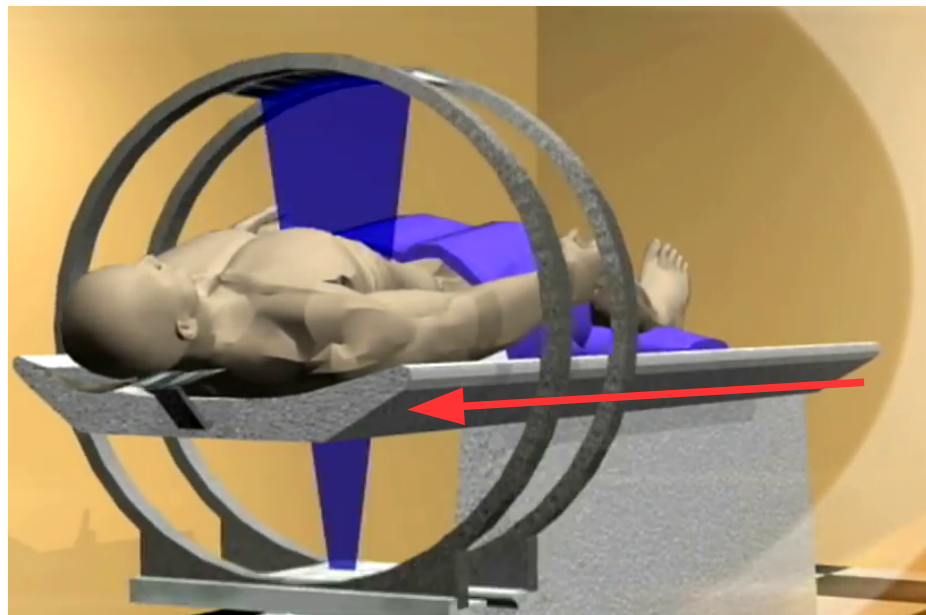


Pomiar

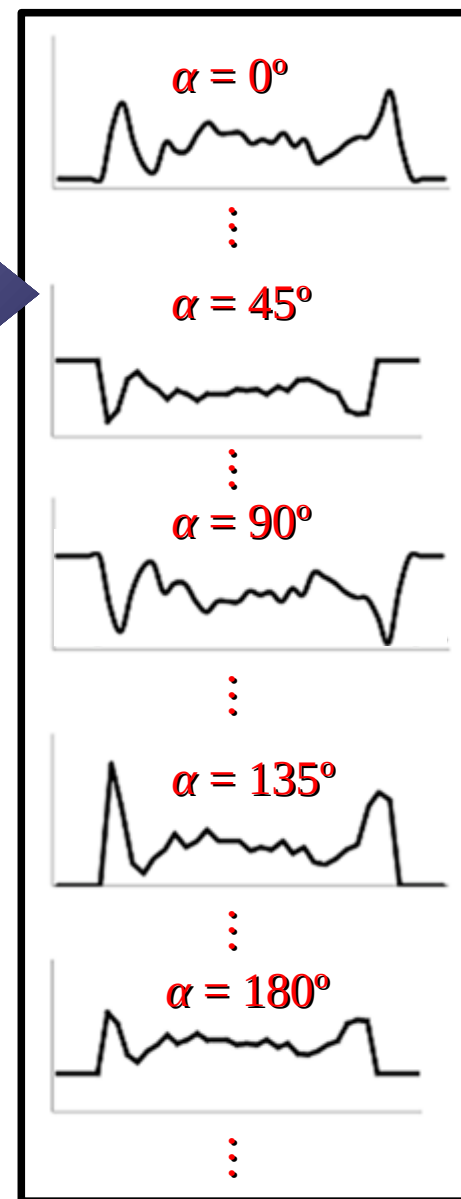


Obrazowanie medyczne: tomografia komputerowa (pomiar)

Po zebraniu projekcji dla pojedynczego skanu łożko z pacjentem jest przesuwane, a cykl akwizycji jest powtarzany w celu rejestracji projekcji następnej warstwy.

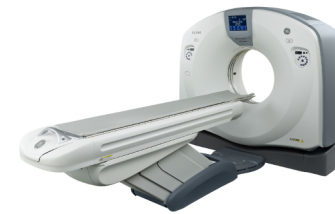
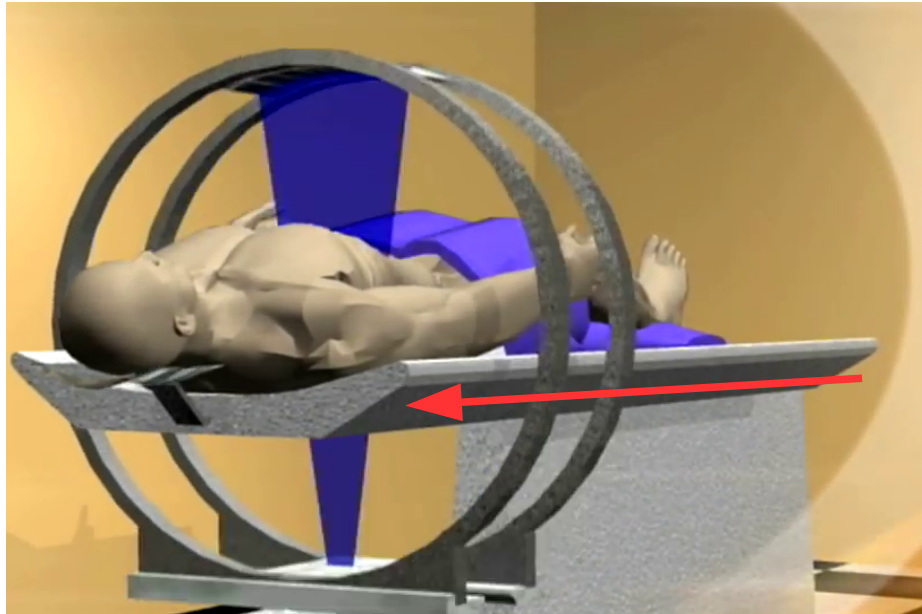


Pomiar

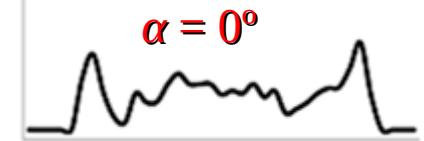


Obrazowanie medyczne: tomografia komputerowa (rekonstrukcja)

Na podstawie zestawu projekcji zarejestrowanych dla danej warstwy możliwa jest **rekonstrukcja obrazu** przedstawiającego odpowiadający tej warstwie przekrój ciała.



Pomiar



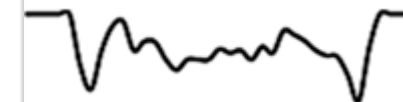
⋮

$\alpha = 45^\circ$



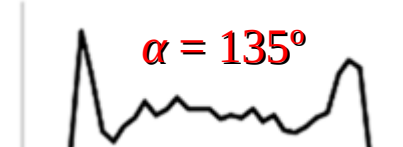
⋮

$\alpha = 90^\circ$



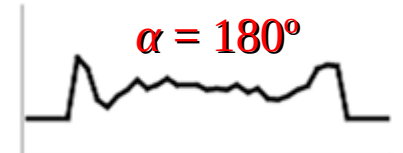
⋮

$\alpha = 135^\circ$

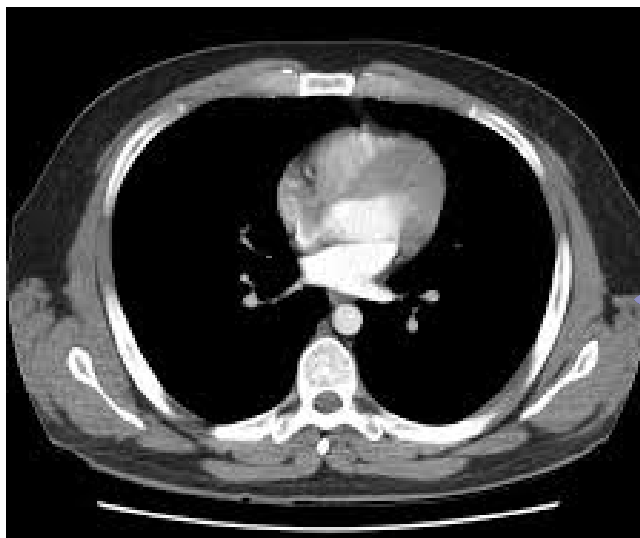


⋮

$\alpha = 180^\circ$



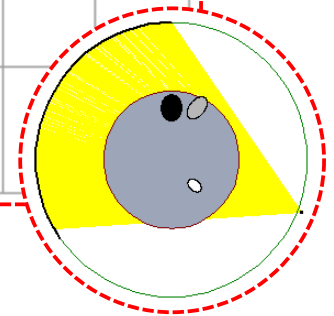
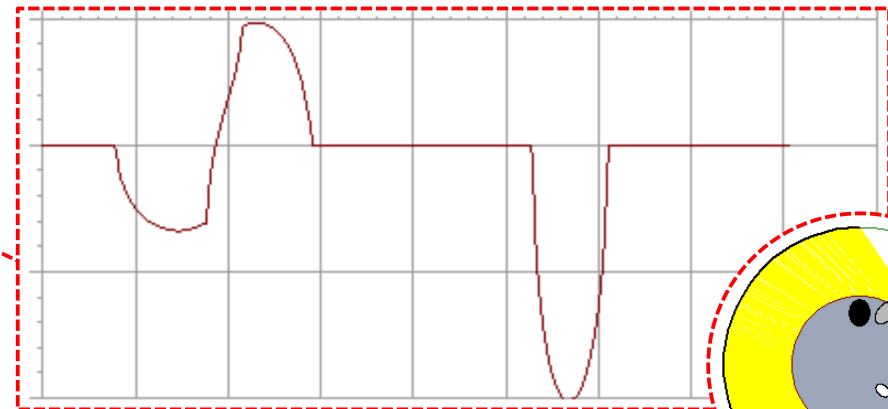
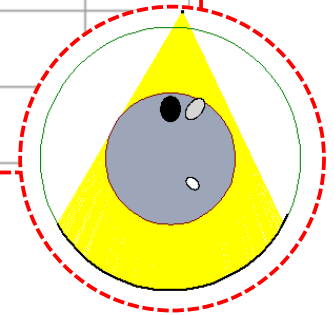
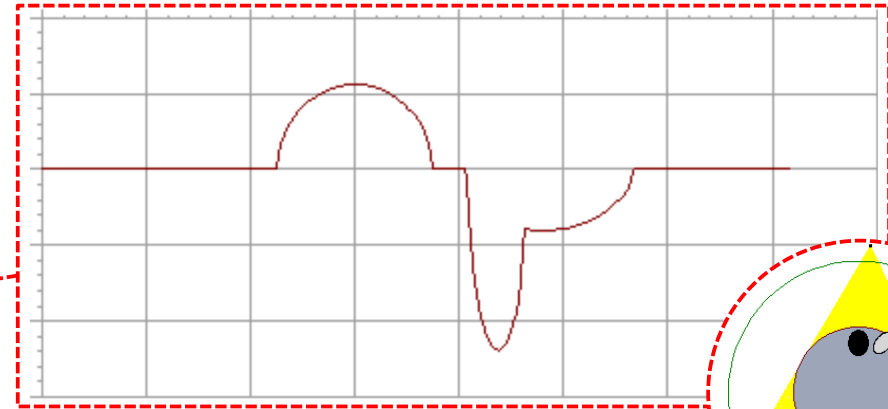
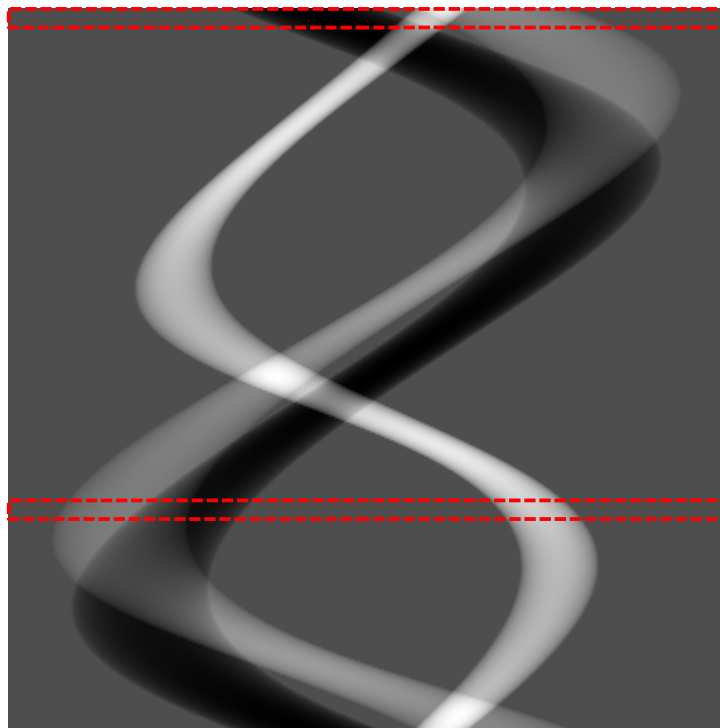
⋮



Rekonstrukcja

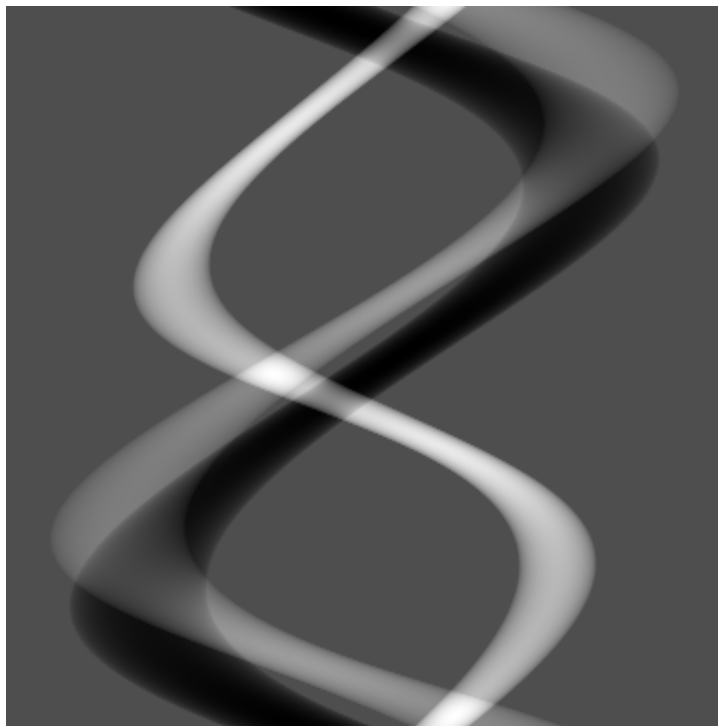
Obrazowanie medyczne: tomografia komputerowa (rekonstrukcja)

Dane wejściowe dla rekonstrukcji mają postać dwuwymiarowego **sinogramu**, którego kolejnymi wierszami są jednowymiarowe projekcje danej warstwy.

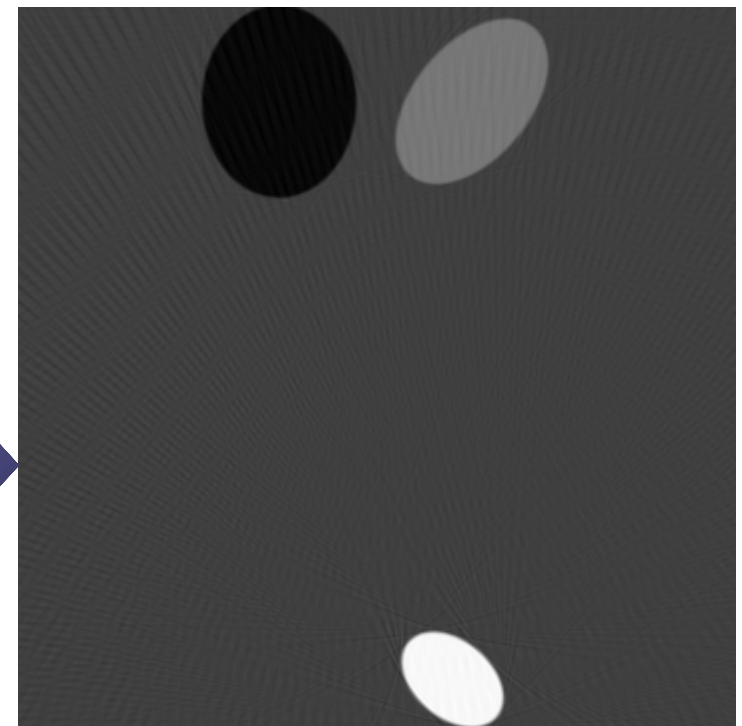


Obrazowanie medyczne: tomografia komputerowa (rekonstrukcja)

Rekonstrukcja obrazu tomograficznego jest przykładem tzw. zagadnienia odwrotnego, gdzie w oparciu o zestaw obserwacji (tu: zbiór projekcji) wnioskuje się o czynniku, którego są one efektem (tu: o rozkładzie współczynnika osłabiania promieniowania X w badanej warstwie ciała). Jednym algorytmów używanych do jego rozwiązania jest **filtrowana projekcja wsteczna (ang. *filtered back projection*)**.

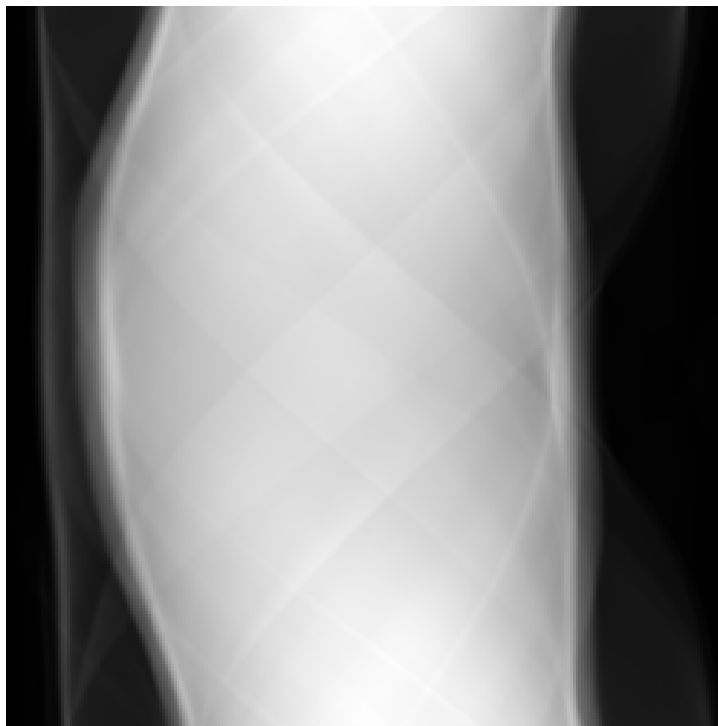


Rekonstrukcja

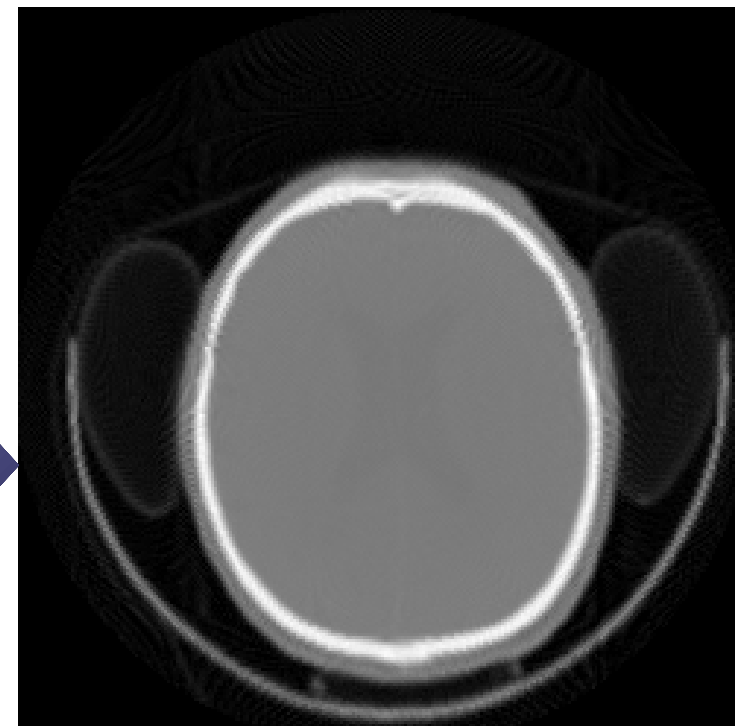


Obrazowanie medyczne: tomografia komputerowa (rekonstrukcja)

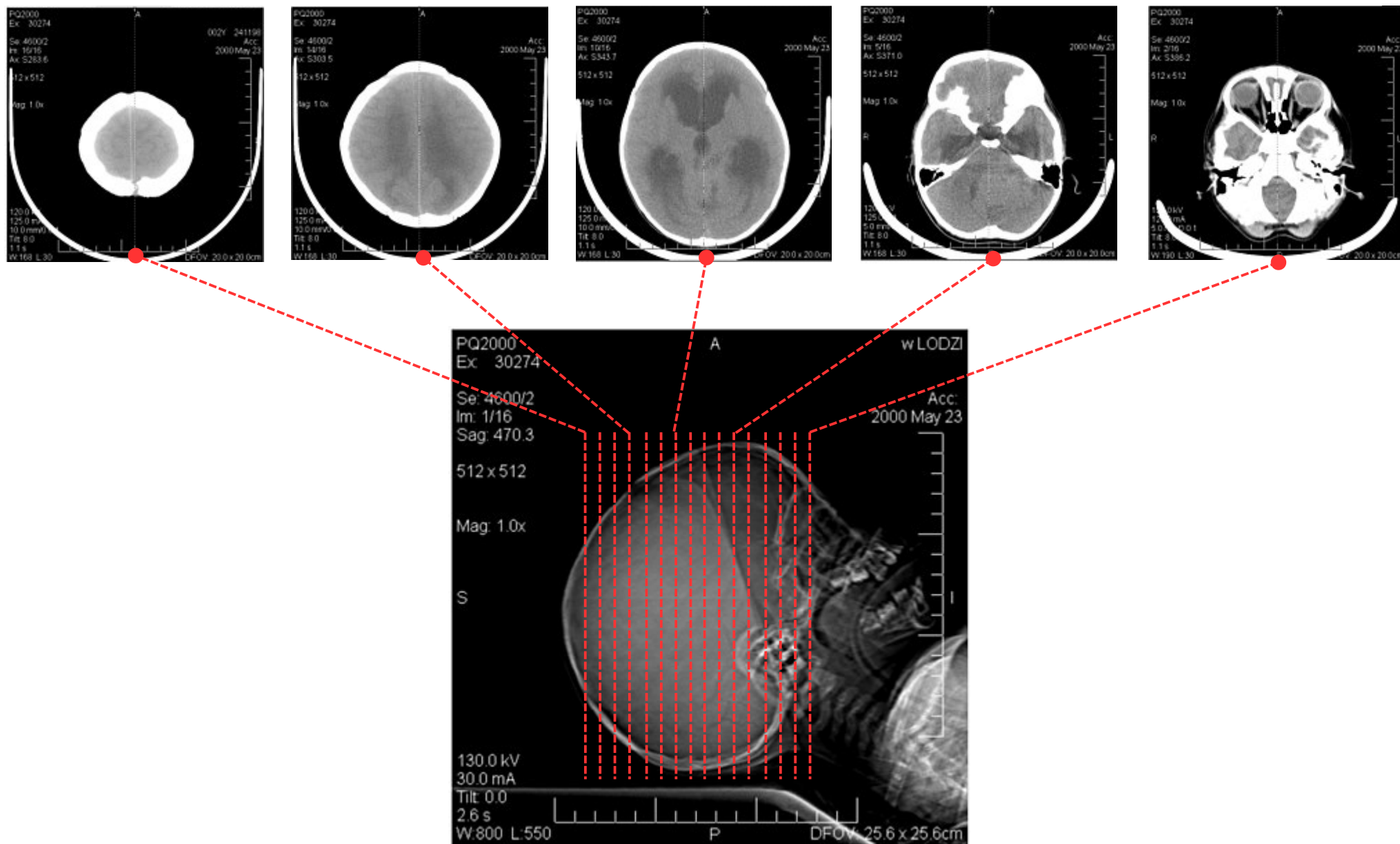
Rekonstrukcja obrazu tomograficznego jest przykładem tzw. zagadnienia odwrotnego, gdzie w oparciu o zestaw obserwacji (tu: zbiór projekcji) wnioskuje się o czynniku, którego są one efektem (tu: o rozkładzie współczynnika osłabiania promieniowania X w badanej warstwie ciała). Jednym algorytmów używanych do rozwiązania tego problemu jest **filtrowana projekcja wsteczna (ang. *filtered back projection*)**.



Rekonstrukcja

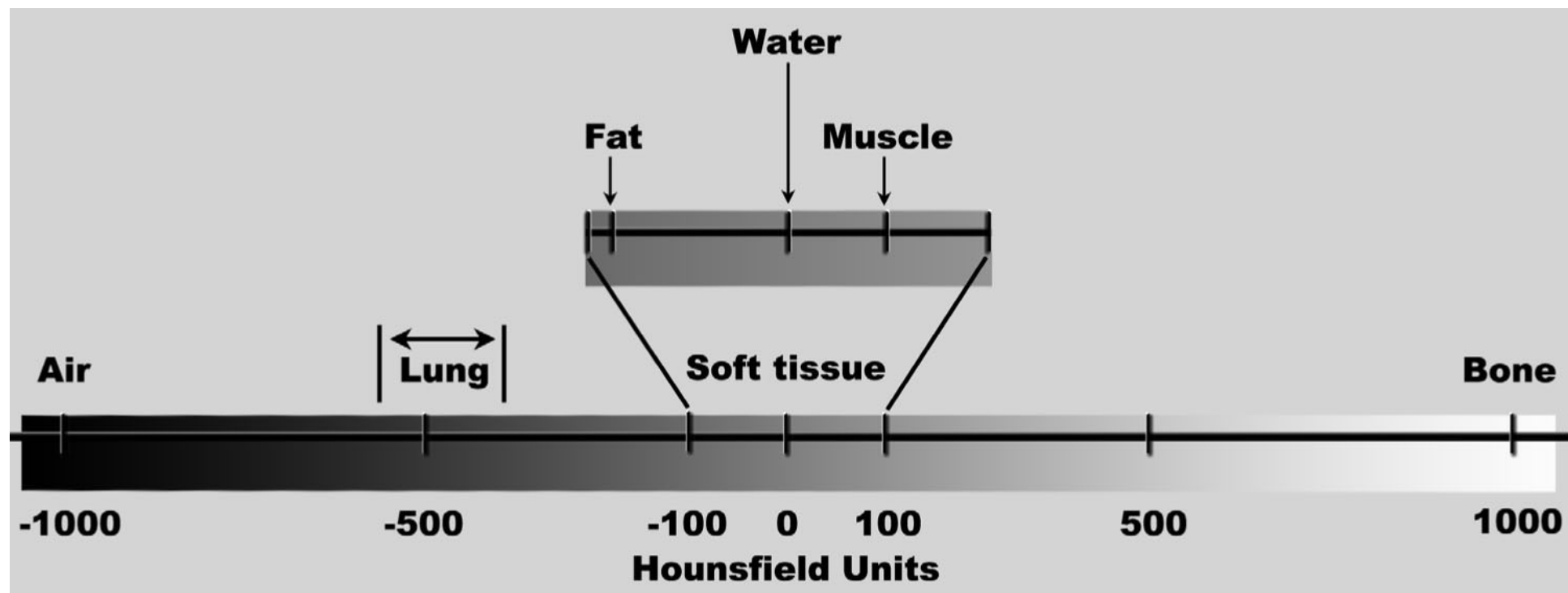


Ostatecznym efektem badania jest **zestaw skanów obrazujących kolejne warstwy**.



Obrazowanie medyczne: tomografia komputerowa (dane)

Współczynniki pochłaniania promieniowania rentgenowskiego związane z pikselami skanów CT wyrażane są w **jednostkach skali Hounsfielda (HU)**, która dla ludzkich tkanek obejmuje zakres od -1000 (powietrze w płucach) do ponad 1000 (kości).



[radiologykey.com]

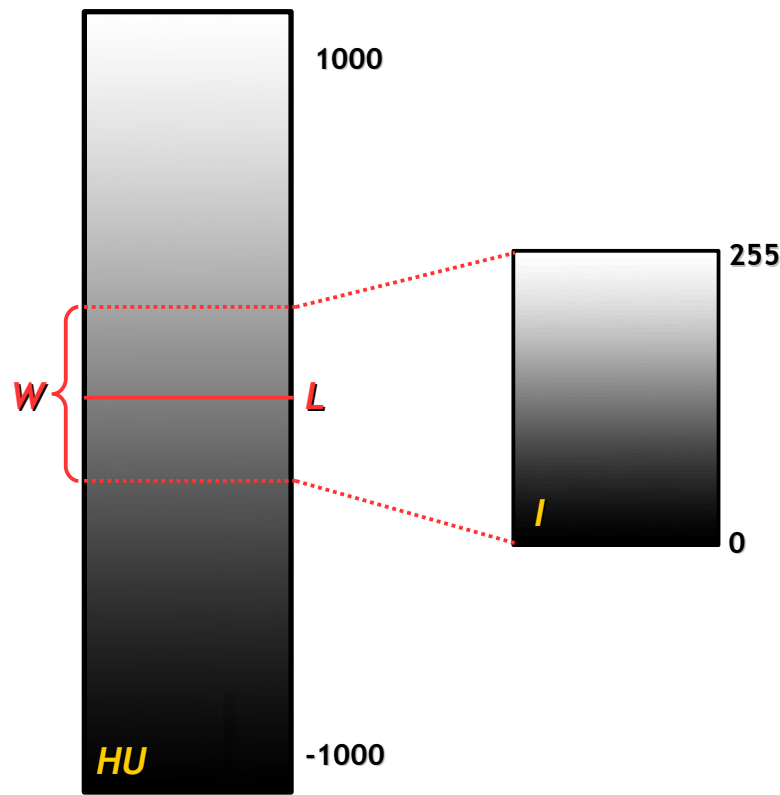
Oznacza to, że dane obrazowe mają co najmniej 11-bitową dynamikę, przez co nie można ich bezpośrednio wyświetlić przy użyciu typowej 8-bitowej skali szarości, ani nawet na specjalnych monitorach do zastosowań medycznych, o dynamice 10 bit.

Obrazowanie medyczne: tomografia komputerowa (dane)

Wyświetlenie danych tomograficznych wymaga uprzedniego przeskalowania ze skali jednostek HU na zakres [0, 255], typowy dla obrazów w skali szarości.

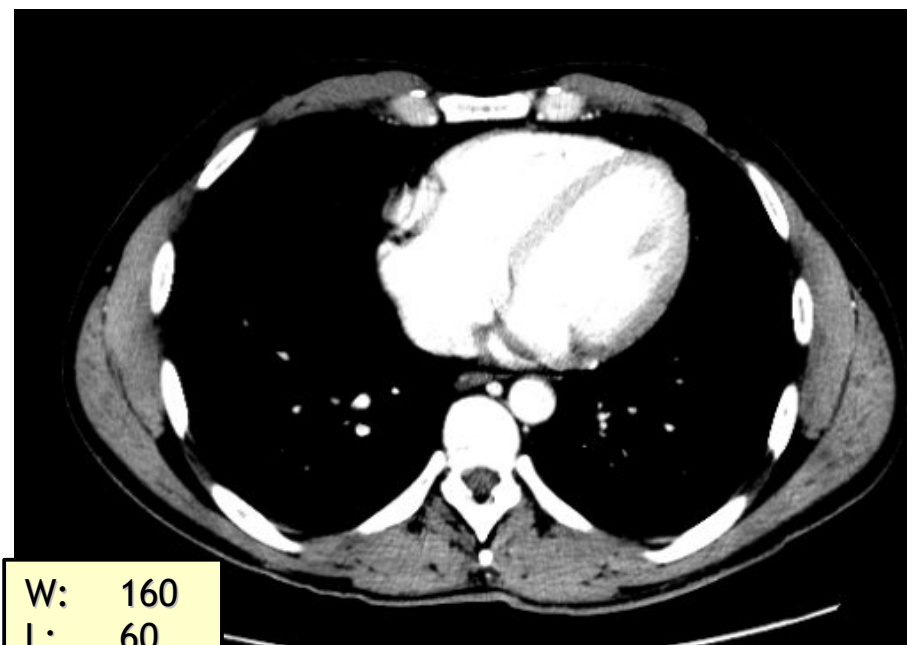
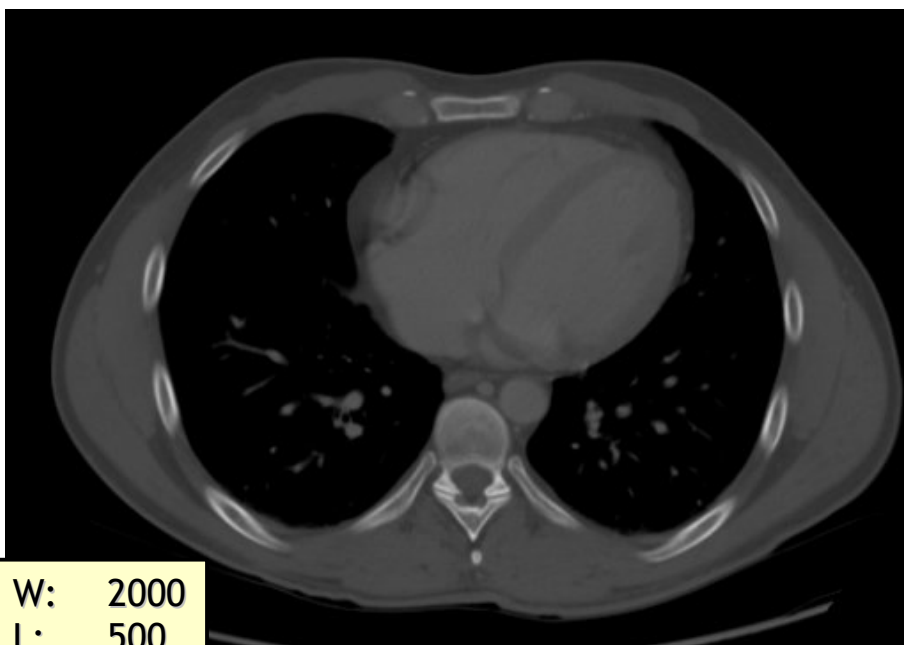
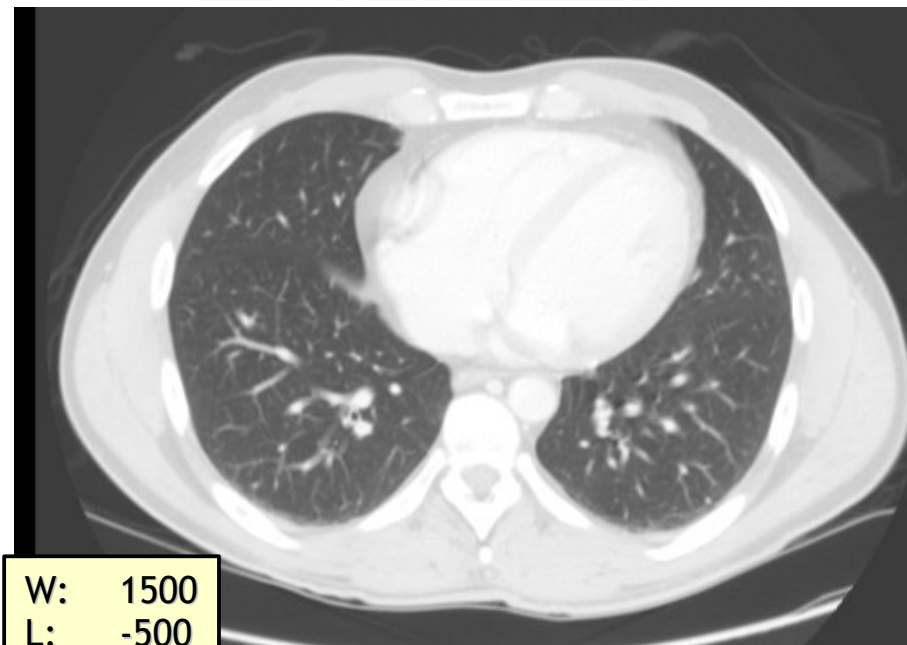
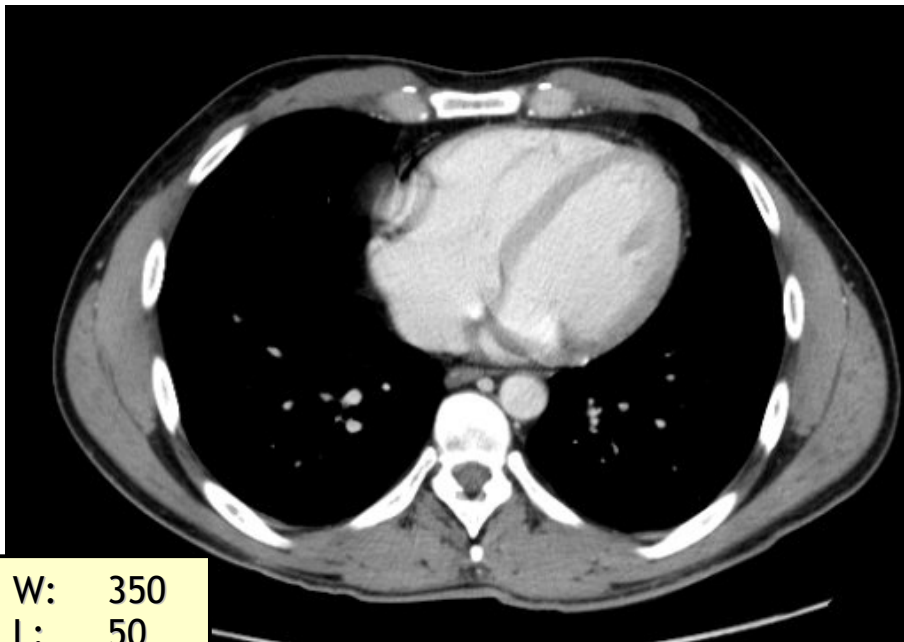
Aby uniknąć utraty rozróżnialności tkanek, skalowaniu poddawane jest jedynie **okno diagnostyczne**, które obejmuje wybrany wycinek skali Hounsfielda.

Okno zwykle definiowane jest przez podanie wartości HU jego **środka (L - level)** oraz **szerokości (W - width)**. Obie wartości dobiera się w taki sposób, aby okno zawierało zakres HU tkanek poddawanych badaniu.



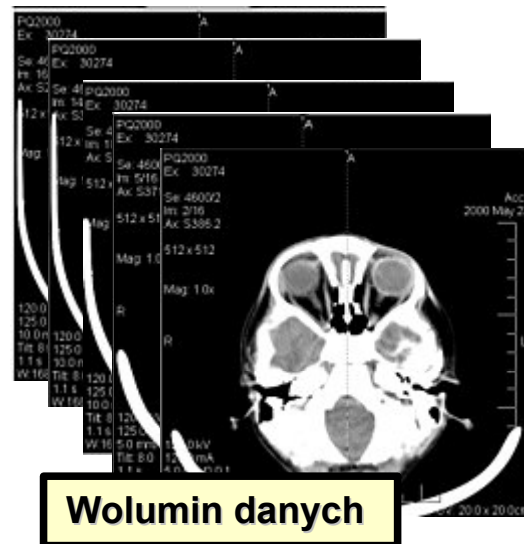
$$\begin{cases} I = 255 \cdot \left(\frac{HU - (L - W/2)}{W} \right) \\ \min(I) = 0 \\ \max(I) = 255 \end{cases}$$

Obrazowanie medyczne: tomografia komputerowa (dane)



Obrazowanie medyczne: wizualizacja danych tomograficznych

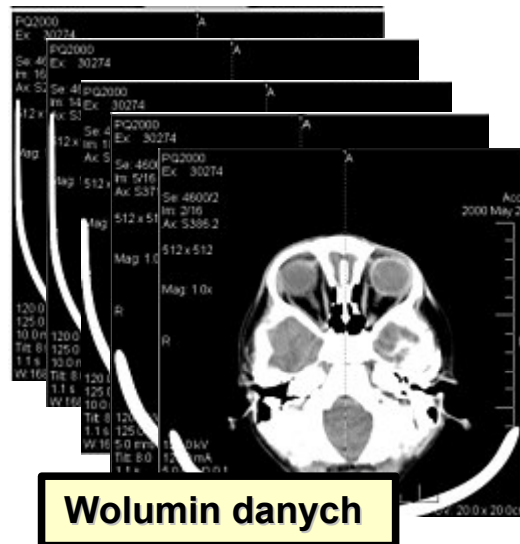
Dane tomograficzne można prezentować w postaci dwu- lub trójwymiarowej, przy czym obie te formy wzajemnie się uzupełniają: przeglądanie przekrojów 2D zwykle pozwala na bardziej szczegółową analizę, podczas gdy wizualizacja 3D ułatwia przestrzenną lokalizację obserwowanych struktur.



Wizualizacja 3D

Obrazowanie medyczne: wizualizacja danych tomograficznych

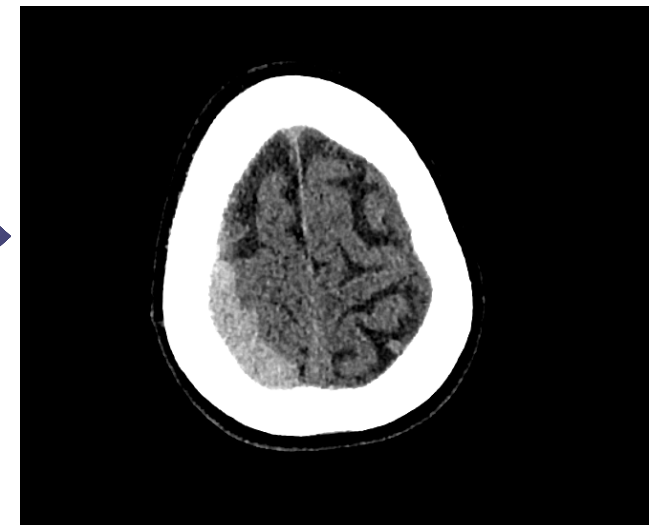
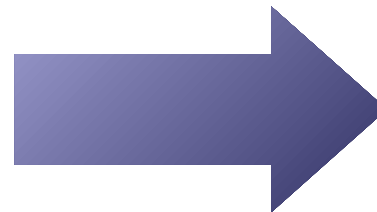
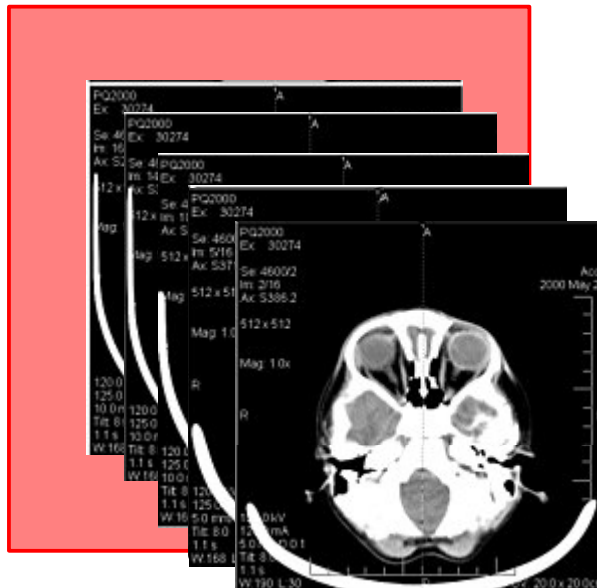
Dane tomograficzne można prezentować w postaci dwu- lub trójwymiarowej, przy czym obie te formy wzajemnie się uzupełniają: przeglądanie przekrojów 2D zwykle pozwala na bardziej szczegółową analizę, podczas gdy wizualizacja 3D ułatwia przestrzenną lokalizację obserwowanych struktur.



UWAGA: w prezentacji użyte zostały dane z rentgenowskiej tomografii komputerowej, ale przedstawione dalej informacje o metodach wizualizacji w znacznym stopniu dotyczą również innych tomograficznych technik obrazowania, np. MRI.

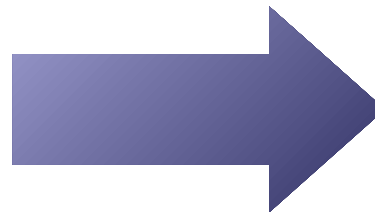
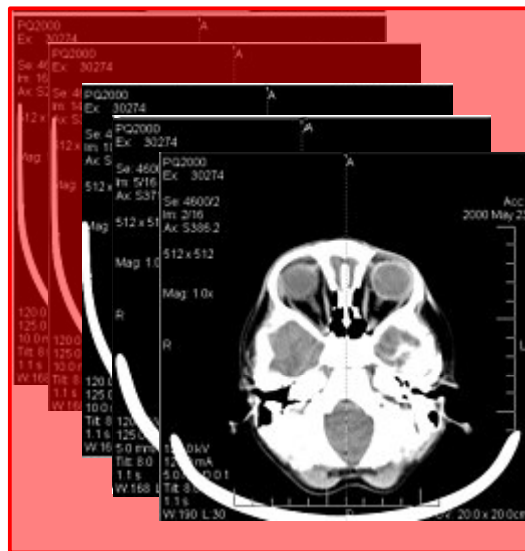
Obrazowanie medyczne: wizualizacja 2D danych tomograficznych

Klasyczny sposób dwuwymiarowej prezentacji wyników badań CT umożliwia jedynie wizualizację wzajemnie równoległych do siebie przekrojów, czyli oglądanie danych „skan po skanie”, zgodnie z tym jak były one mierzone.



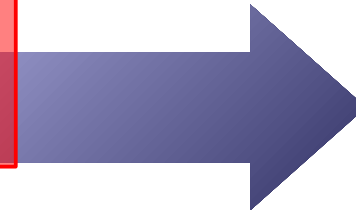
Obrazowanie medyczne: wizualizacja 2D danych tomograficznych

Klasyczny sposób dwuwymiarowej prezentacji wyników badań CT umożliwia jedynie wizualizację wzajemnie równoległych do siebie przekrojów, czyli oglądanie danych „skan po skanie”, zgodnie z tym jak były one mierzone.



Obrazowanie medyczne: wizualizacja 2D danych tomograficznych

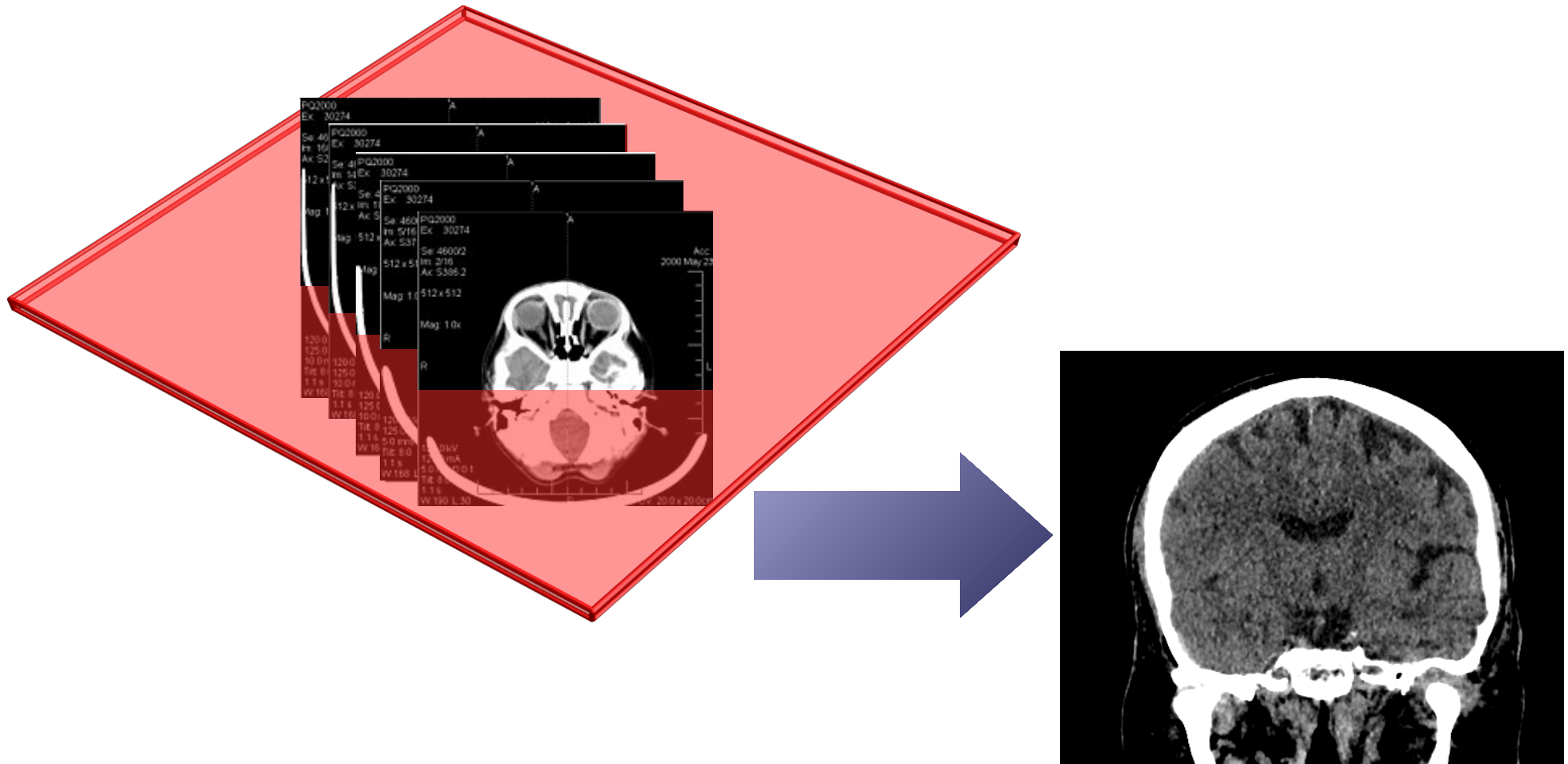
Klasyczny sposób dwuwymiarowej prezentacji wyników badań CT umożliwia jedynie wizualizację wzajemnie równoległych do siebie przekrojów, czyli oglądanie danych „skan po skanie”, zgodnie z tym jak były one mierzone.



Obrazowanie medyczne: wizualizacja 2D danych tomograficznych (MPR)

W rzeczywistości jednak skany są elementami trójwymiarowego woluminu danych, co pozwala na swobodę w wyborze płaszczyzny obrazowania.

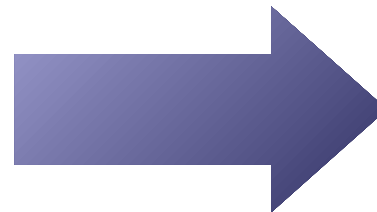
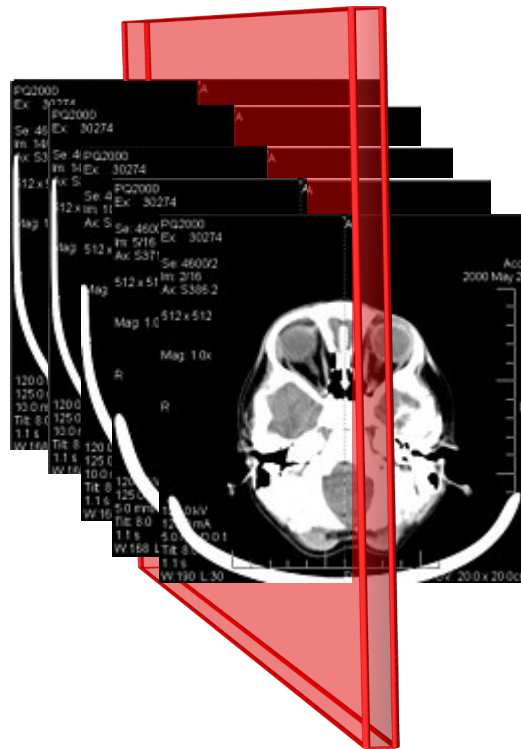
Rekonstrukcja wielopłaszczyznowa (MPR, *MultiPlanar Reconstruction*) to technika pozwalająca na obliczeniowe odtworzenie i wizualizację dowolnej płaszczyzny, która przecina wolumen danych pod zadaniem nachyleniem i w określonym miejscu.



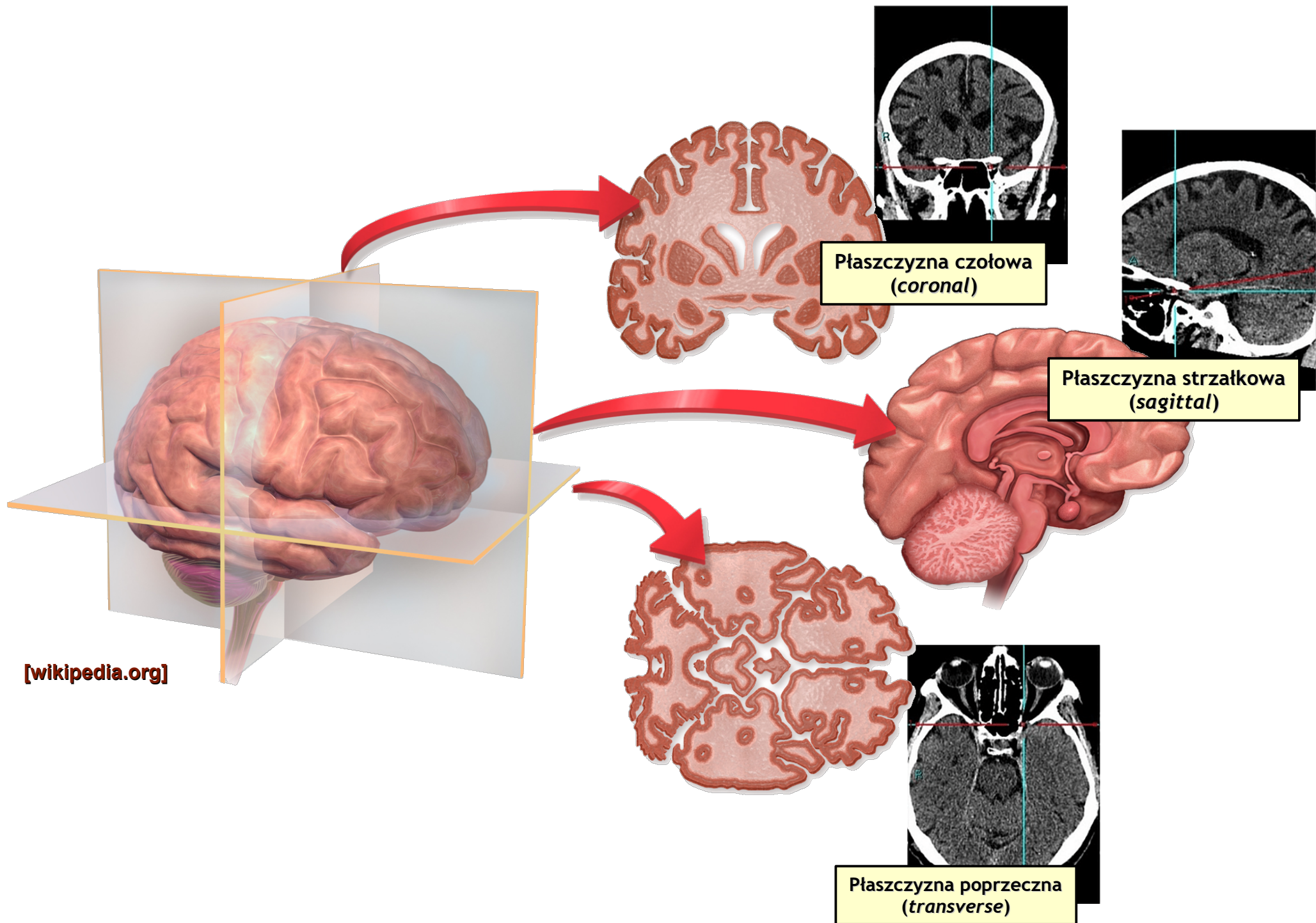
Obrazowanie medyczne: wizualizacja 2D danych tomograficznych (MPR)

W rzeczywistości jednak skany są elementami trójwymiarowego woluminu danych, co pozwala na swobodę w wyborze płaszczyzny obrazowania.

Rekonstrukcja wielopłaszczyznowa (MPR, *MultiPlanar Reconstruction*) to technika pozwalająca na obliczeniowe odtworzenie i wizualizację dowolnej płaszczyzny, która przecina wolumen danych pod zadaniem nachyleniem i w określonym miejscu.



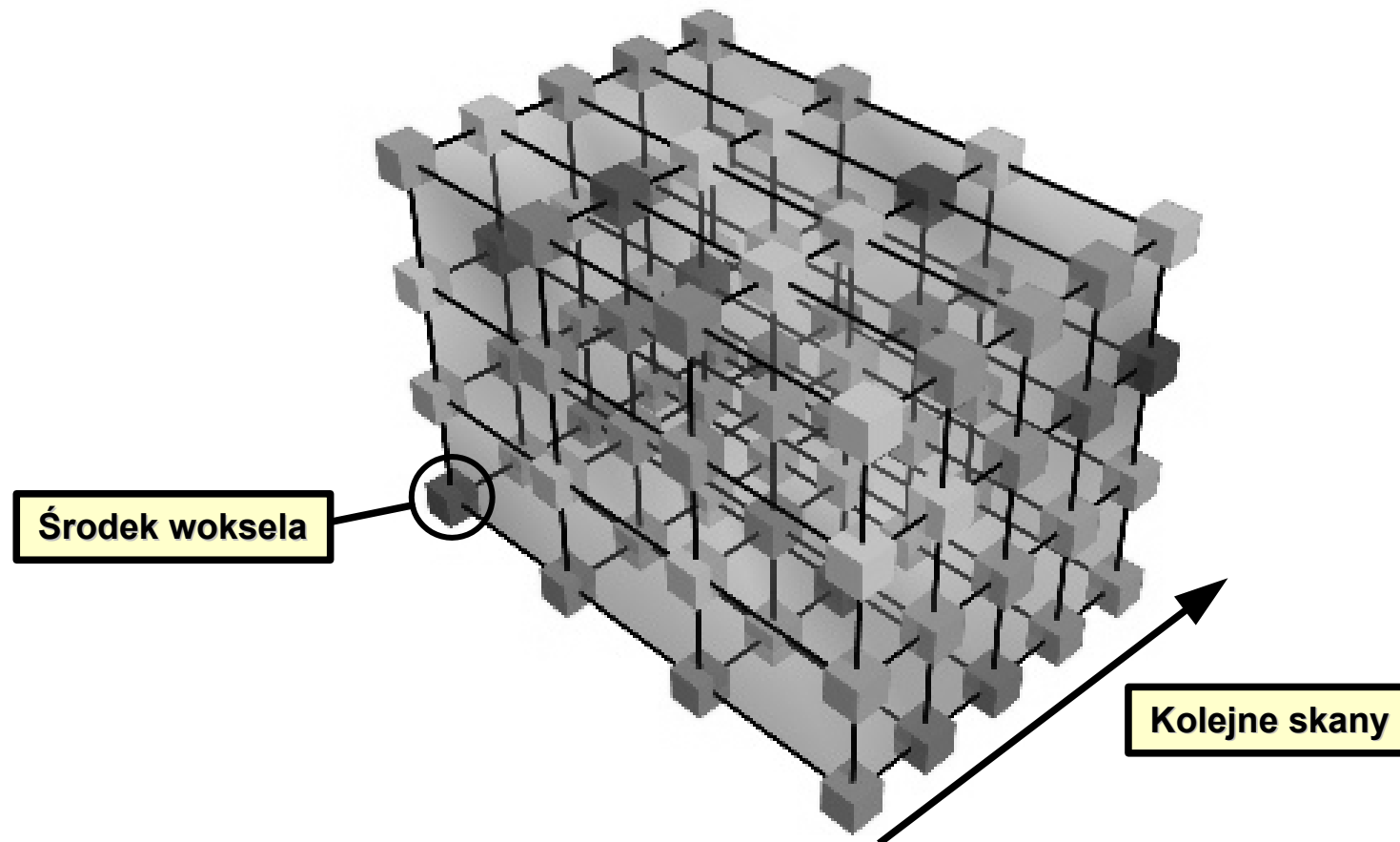
Obrazowanie medyczne: wizualizacja 2D danych tomograficznych (MPR)



Obrazowanie medyczne: wizualizacja 3D danych tomograficznych

W przypadku wizualizacji trójwymiarowej zbiór skanów CT to typowy przykład **danych wolumetrycznych**, mających postać trójwymiarowej tablicy o rozmiarach $M \times N \times K$ (gdzie M i N oznaczają rozmiary pojedynczego skanu, a K to liczba skanów), której elementy mogą być reprezentowane jako woksele.

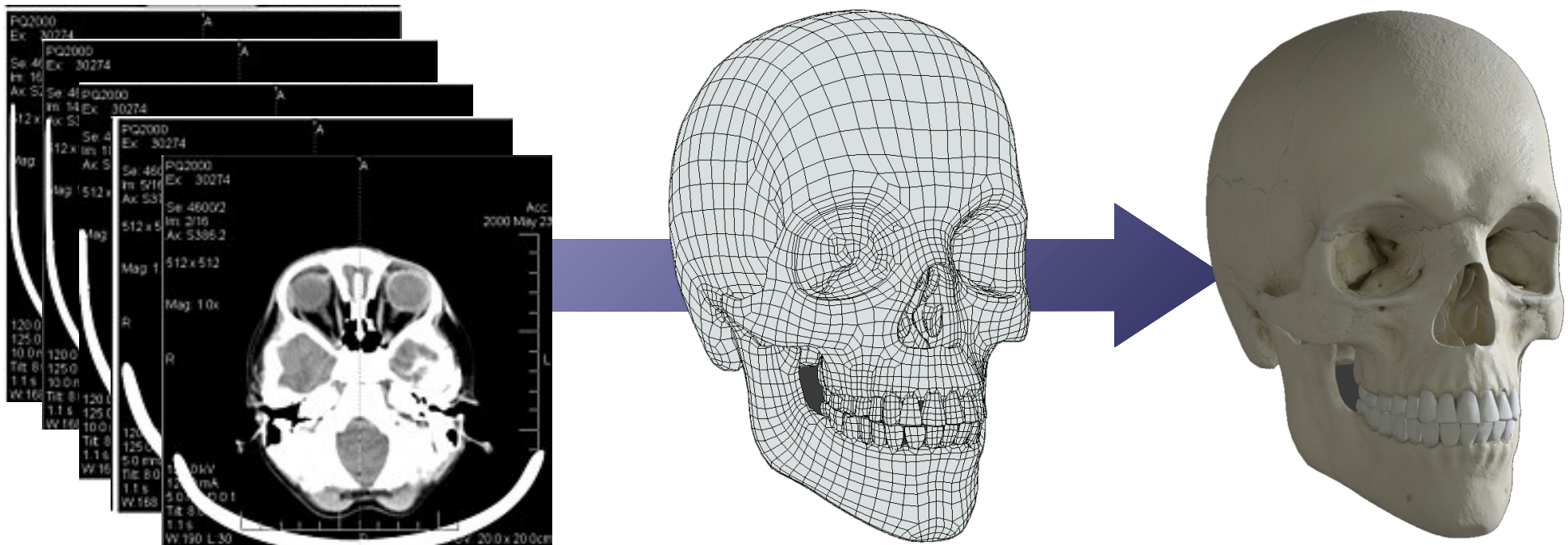
Woksel (*voxel, volumetric picture element*) to bezpośredni odpowiednik piksela z grafiki 2D: jest on najmniejszym elementem objętości w przestrzeni trójwymiarowej, stanowiącym **elementarną komórkę rastra przestrzennego**.



Obrazowanie medyczne: wizualizacja 3D danych tomograficznych

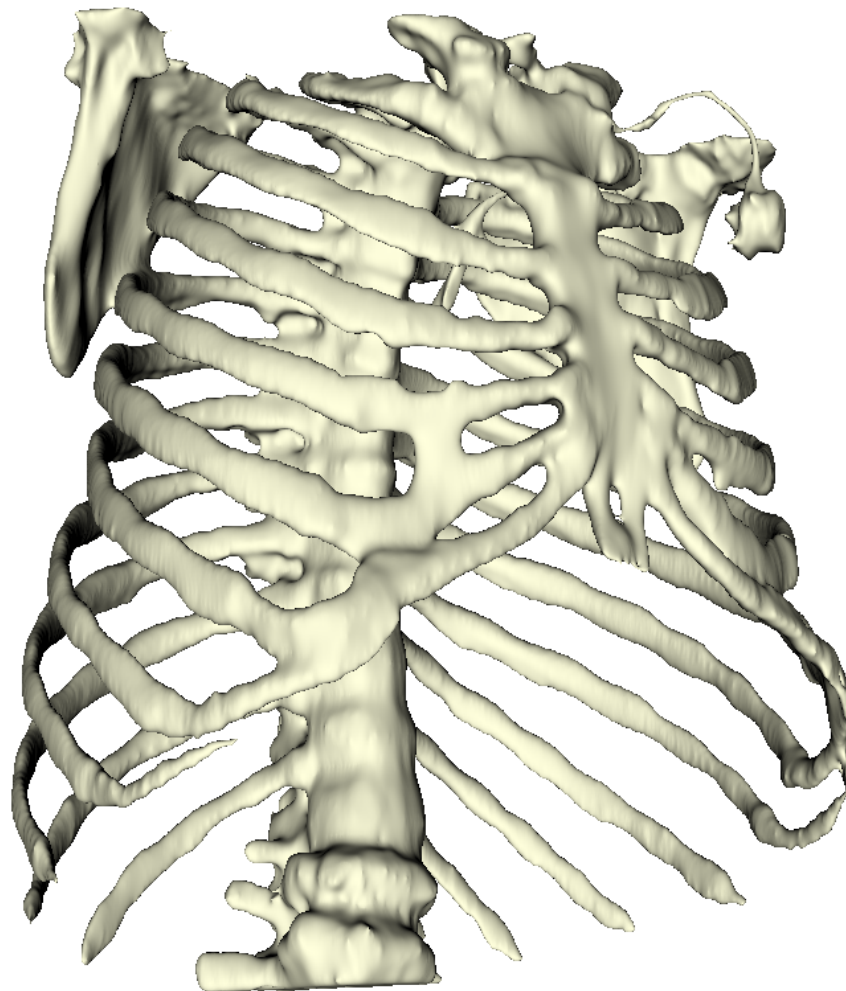
Wyróżnia się dwa podstawowe sposoby renderingu danych wolumetrycznych.

W **renderingu powierzchniowym (surface rendering)** konwertuje się wybrane dane z woluminu (np. woksele o wartościach z pewnego zakresu) na powierzchnie opisywane siatką wielokątów, a następnie dokonuje się ich wizualizacji przy użyciu typowych technik używanych do generacji grafiki trójwymiarowej.



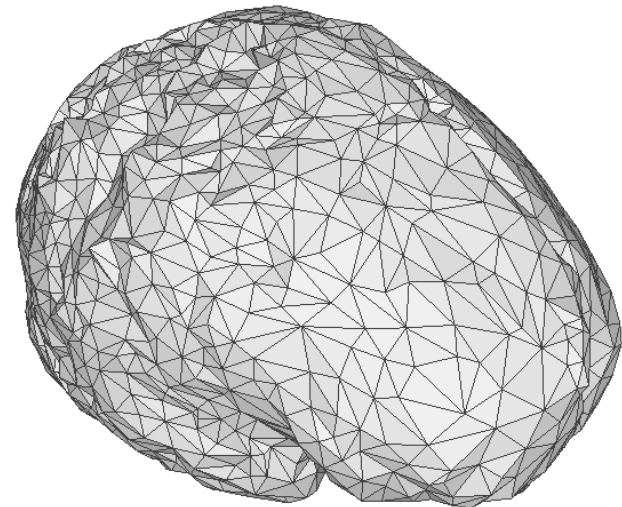
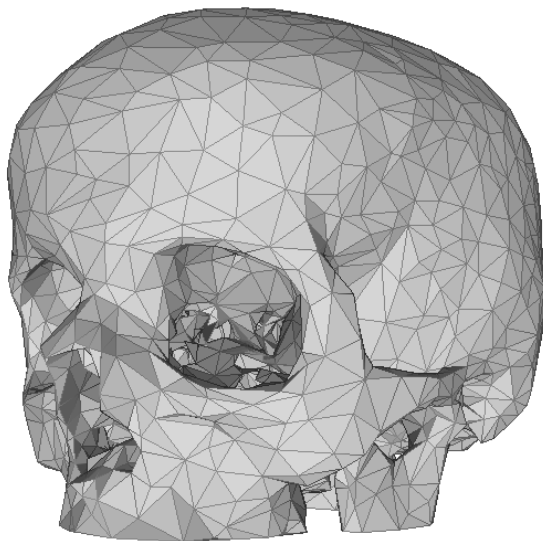
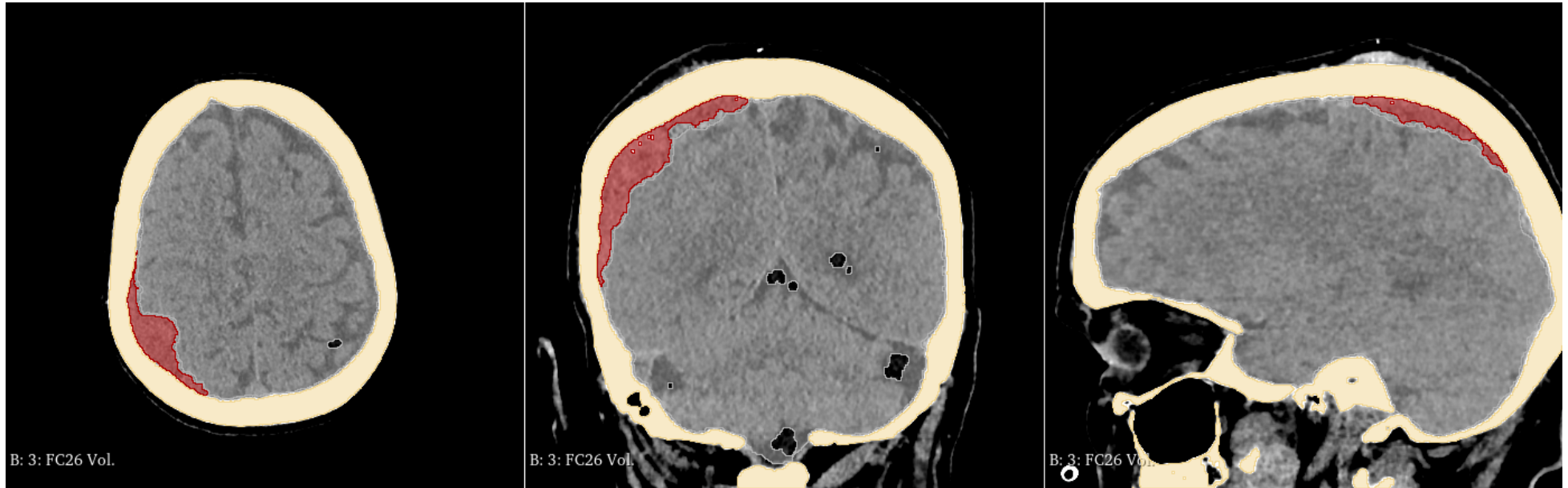
Obrazowanie medyczne: wizualizacja 3D danych tomograficznych

Takie podejście - ograniczając się jedynie do reprezentacji powierzchni - redukuje ilość przetwarzanych danych, dzięki czemu rendering jest szybki. Wadą jest utrata informacji o wnętrzu obiektu oraz konieczność przeliczania całej struktury danych po każdej zmianie parametrów definiujących powierzchnię.



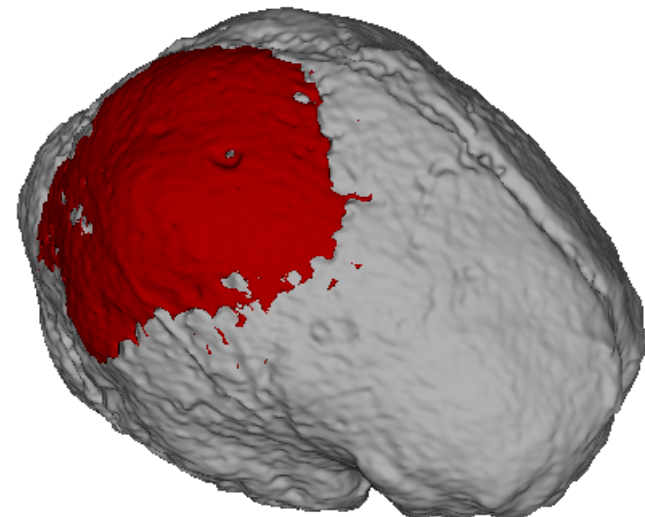
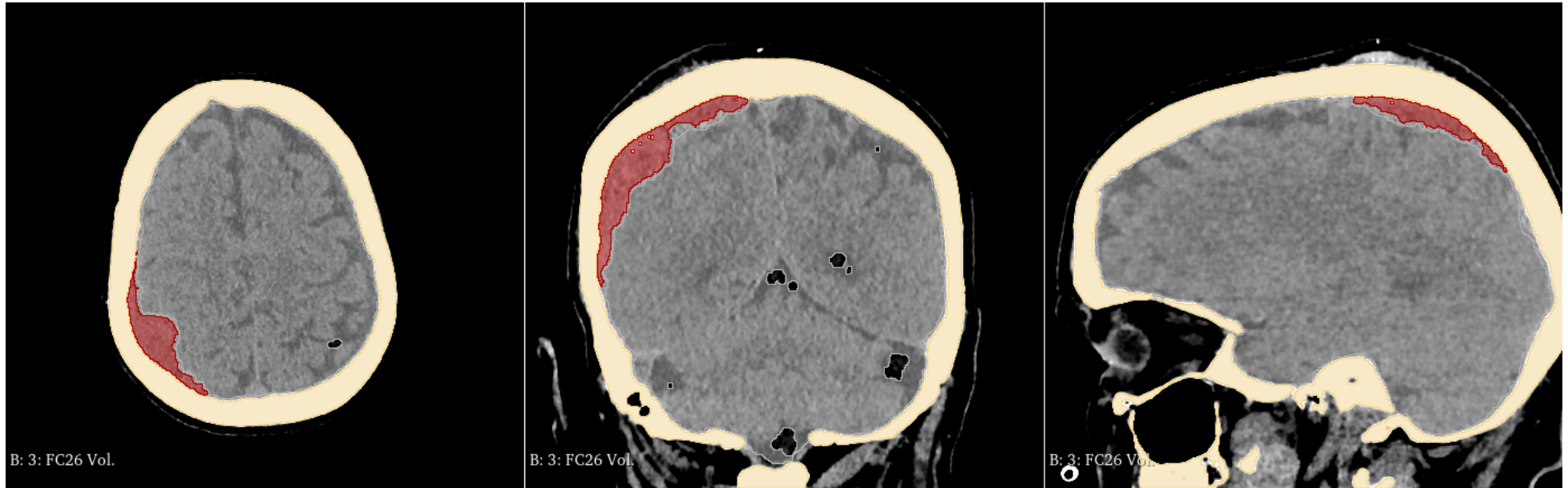
Obrazowanie medyczne: wizualizacja 3D danych tomograficznych

Siatki wielokątów opisujące powierzchnie wizualizowanych obiektów można tworzyć w oparciu o wyniki segmentacji obrazów tomograficznych.



Obrazowanie medyczne: wizualizacja 3D danych tomograficznych

Siatki wielokątów opisujące powierzchnie wizualizowanych obiektów można tworzyć w oparciu o wyniki segmentacji obrazów tomograficznych.



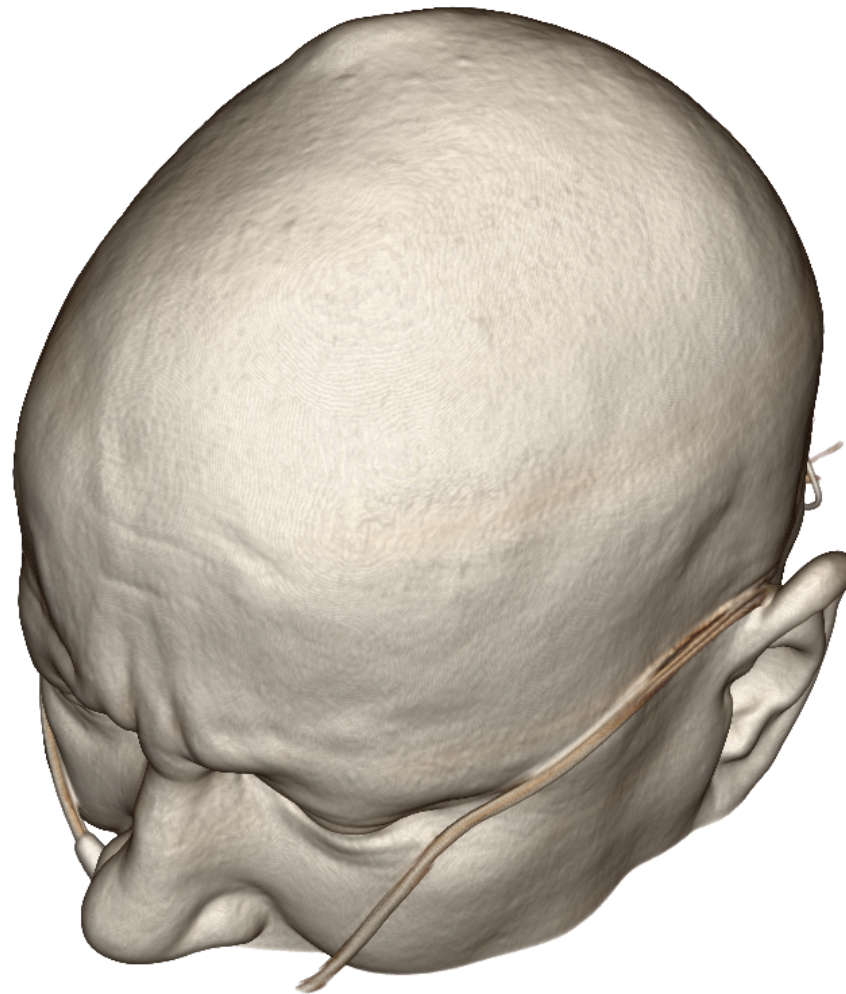
Obrazowanie medyczne: wizualizacja 3D danych tomograficznych

Rendering objętościowy (volume rendering) tworzy obraz 3D na podstawie pełnego wolumenu. Tym samym wykorzystuje on istotną cechę reprezentacji wokselowej, czyli fakt, że umożliwia ona opis całej bryły, a nie tylko powierzchni zewnętrznej. Ceną za tą możliwość jest jednak wzrost zużycia pamięci operacyjnej.



Obrazowanie medyczne: wizualizacja 3D danych tomograficznych

W tym rodzaju renderingu dane nie są redukowane jedynie do opisu powierzchni, dzięki czemu możliwa jest interaktywna eksploracja całej wizualizowanej objętości. Ponadto z każdym wokselem można wiązać atrybuty niosące dodatkowe informacje o właściwościach poszczególnych obszarów przestrzeni, np. typie tkanki.



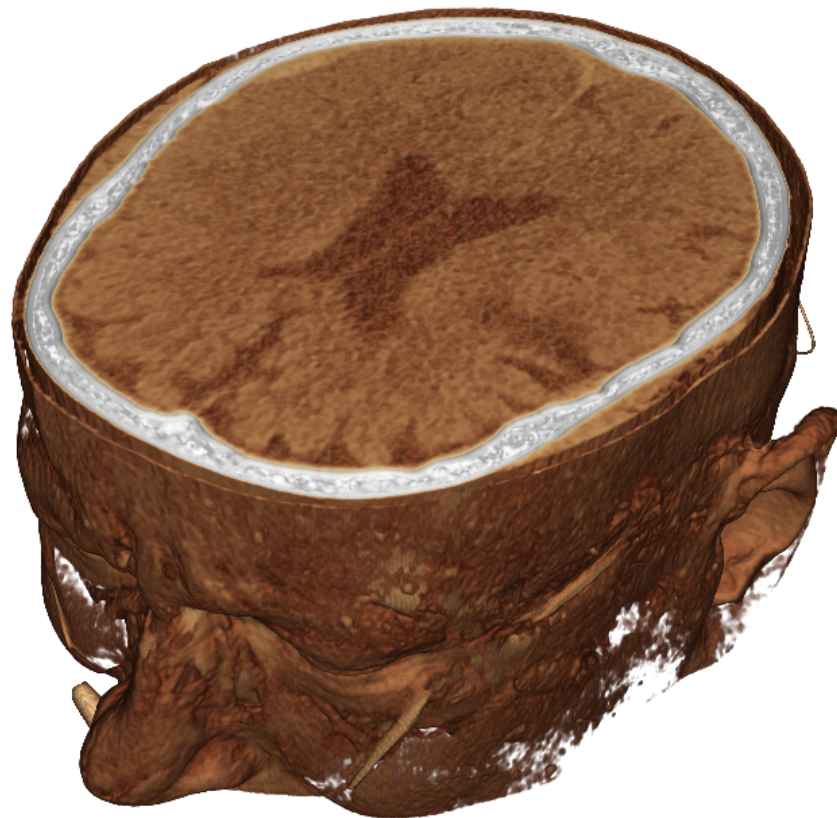
Obrazowanie medyczne: wizualizacja 3D danych tomograficznych

W tym rodzaju renderingu dane nie są redukowane jedynie do opisu powierzchni, dzięki czemu możliwa jest interaktywna eksploracja całej wizualizowanej objętości. Ponadto z każdym wokselem można wiązać atrybuty niosące dodatkowe informacje o właściwościach poszczególnych obszarów przestrzeni, np. typie tkanki.



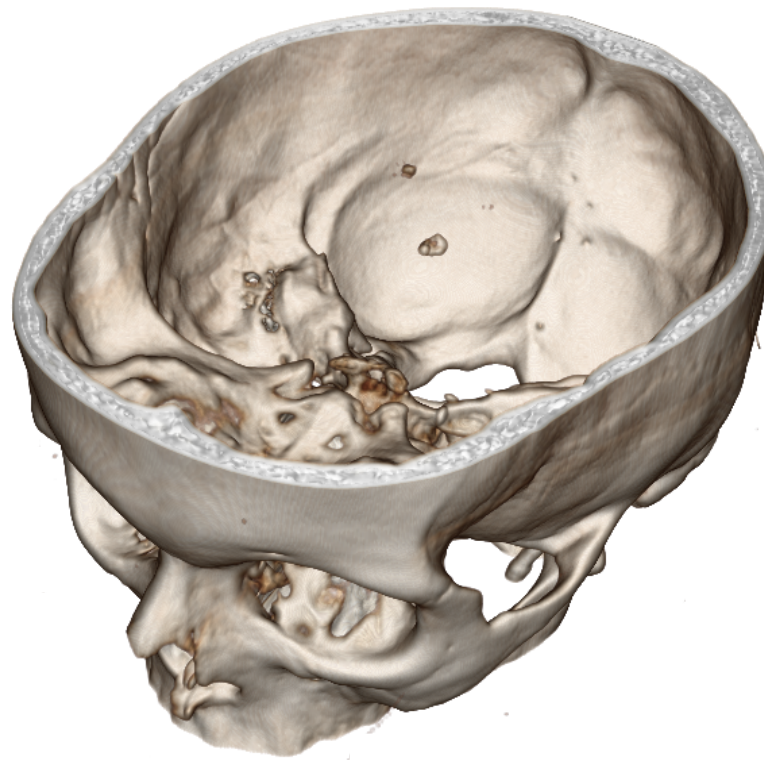
Obrazowanie medyczne: wizualizacja 3D danych tomograficznych

W tym rodzaju renderingu dane nie są redukowane jedynie do opisu powierzchni, dzięki czemu możliwa jest interaktywna eksploracja całej wizualizowanej objętości. Ponadto z każdym wokselem można wiązać atrybuty niosące dodatkowe informacje o właściwościach poszczególnych obszarów przestrzeni, np. typie tkanki.



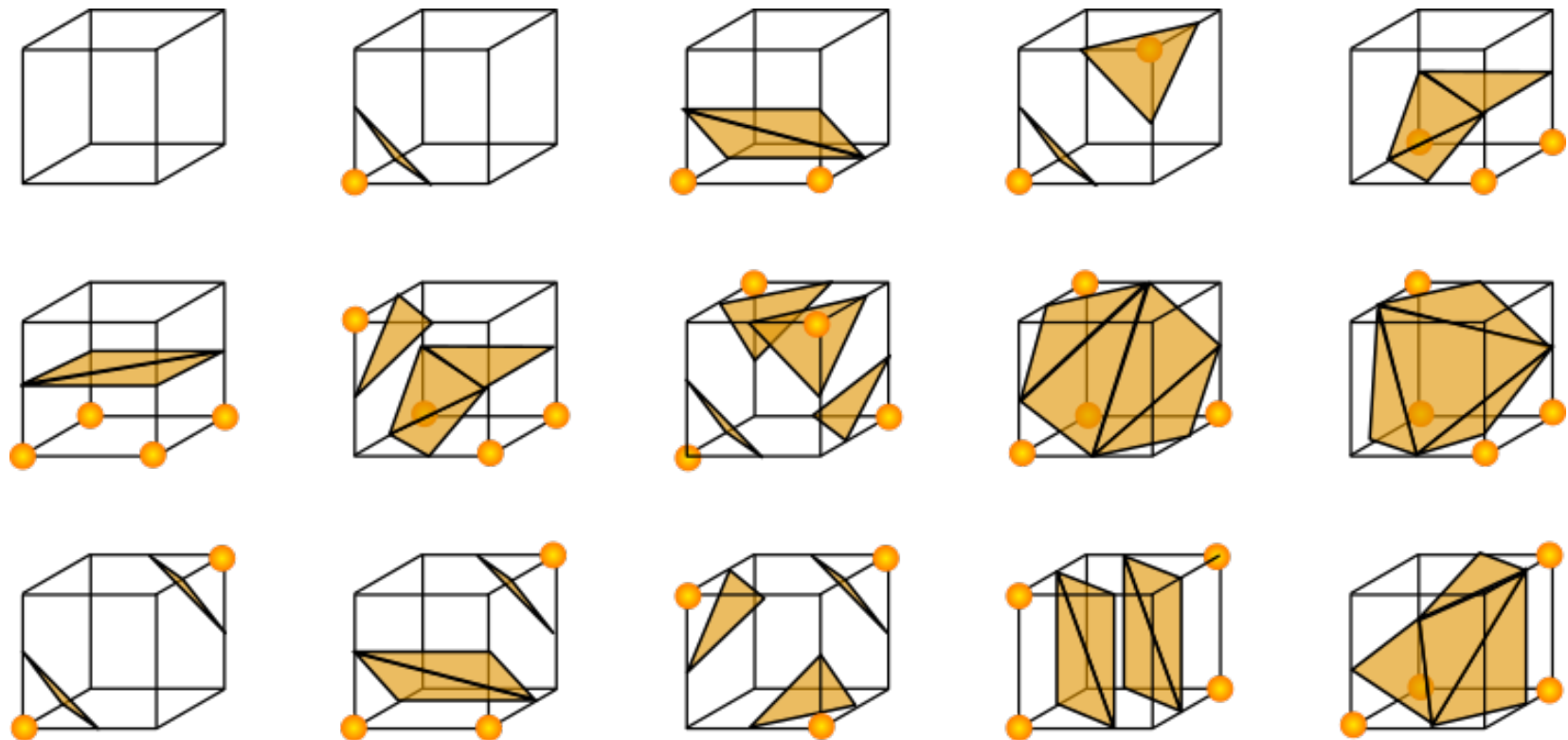
Obrazowanie medyczne: wizualizacja 3D danych tomograficznych

W tym rodzaju renderingu dane nie są redukowane jedynie do opisu powierzchni, dzięki czemu możliwa jest interaktywna eksploracja całej wizualizowanej objętości. Ponadto z każdym wokselem można wiązać atrybuty niosące dodatkowe informacje o właściwościach poszczególnych obszarów przestrzeni, np. typie tkanki.



Obrazowanie medyczne: wizualizacja 3D danych tomograficznych

Do renderingu objętościowego często wykorzystywany jest **algorytm maszerujących sześciątów** (ang. *marching cubes algorithm*). W każdym kroku rozpatruje on jeden sześcienny element przestrzeni wokselowej (o wierzchołkach wyznaczanych przez środki 6 sąsiadujących wokseli) i pozycjonuje w nim trójkątne elementy siatki, która następnie posłuży do opisu wizualizowanej bryły. Liczba i umiejscowienie elementów siatki zależy od tego, czy wartości wokseli związanych z wierzchołkami sześciangu spełniają zadane kryteria (np. mieszczą się w zakresie typowym dla pewnej tkanki).



DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ

Materiały opracowane w ramach zadania 15 „Modyfikacja międzywydziałowych studiów I stopnia na kierunku Inżynieria Biomedyczna” projektu „NERW PW. Nauka - Edukacja - Rozwój - Współpraca”, współfinansowanego jest ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego



Fundusze Europejskie
Wiedza Edukacja Rozwój

**Politechnika
Warszawska**

Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny

