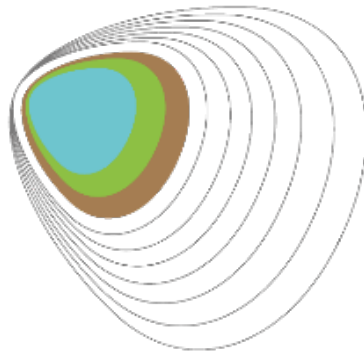




Politechnika Łódzka



IV Międzynarodowa Konferencja

Pole elektromagnetyczne  
i przyszłość telekomunikacji

Badania. Monitoring. Doświadczenia krajowe i zagraniczne.

# Symulacje komputerowe oddziaływania fal elektromagnetycznych na ludzi

Łukasz Januskiewicz

Politechnika Łódzka, Instytut Elektroniki



Instytut  
Elektroniki



# Plan prezentacji

- Wstęp – po co są symulacje komputerowe
- Metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu
- Modele ciała człowieka
- Przykładowe wyniki symulacji
- Kierunki rozwoju narzędzi symulacyjnych
- Podsumowanie





# Wstęp - oddziaływanie fali na ciało człowieka

- Małe częstotliwości: efekt nietermiczny
  - Objawy psychosomatyczne
  - Trudne do badania i mierzenia
  - Występują przy dużych natężeniach pól

[Kumar, A., "Nonthermal effects of electromagnetic fields at microwave frequencies," *Electrical and Computer Engineering, 2003. IEEE CCECE 2003. Canadian Conference on*, vol.1, no., pp.285,288 vol.1, 4-7 May 2003]



- Wielkie częstotliwości: efekt termiczny
  - Mierzalny
  - Możliwy do symulacji komputerowej
  - Częstotliwości mierzone w GHz

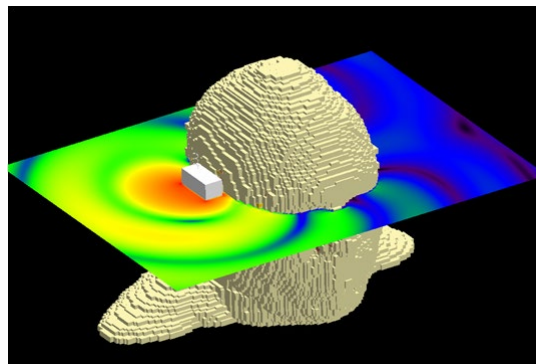
[Paolo Bernardi, Marta Cavagnaro, Stefano Pisa, Member, and Emanuele Piuzzi, "Specific absorption rate and temperature increases in the head of a cellular phone user," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Volume48, Issue7, pp1118 – 1126, Jul 2000.]





## Wstęp - oddziaływanie fali na ciało człowieka, efekt termiczny

- Tkanki zawierają wodę, białka, tłuszcze, cukry, minerały itd.
- W uproszczeniu tkanki oddziałują z falami radiowymi tak jak woda z dodatkiem cukru i soli
- Woda wstawiona do kuchenki mikrofalowej ogrzewa się dzięki energii fali elektromagnetycznej (2,4 GHz)
- Ciało człowieka tłumi (przejmuje energię) fale elektromagnetyczne zamieniając ich energię na ciepło





# Wstęp - oddziaływanie fali na ciało człowieka, efekt termiczny

SAR (Specific Absorption Rate), inaczej swoiste tempo pochłaniania energii

$$SAR = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{dm} \right)$$

Ilość energii  $W$  jaka jest pochłaniana przez jednostkę masy ciała  $m$  w określonej jednostce czasu [W/kg]

- wprost proporcjonalny do **przewodności elektrycznej**  $\sigma$  tkanki i kwadratu **natężenia pola elektrycznego**  $E$
- odwrotnie proporcjonalny do **gęstości masy**  $\rho$

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2$$





# Swoiste tempo pochłaniania energii

Całkowita moc pochłonięta w tkankach zależy np. od:

- ułożenia ciała w stosunku do wektora natężenia pola,
- własności elektrycznych tkanki.

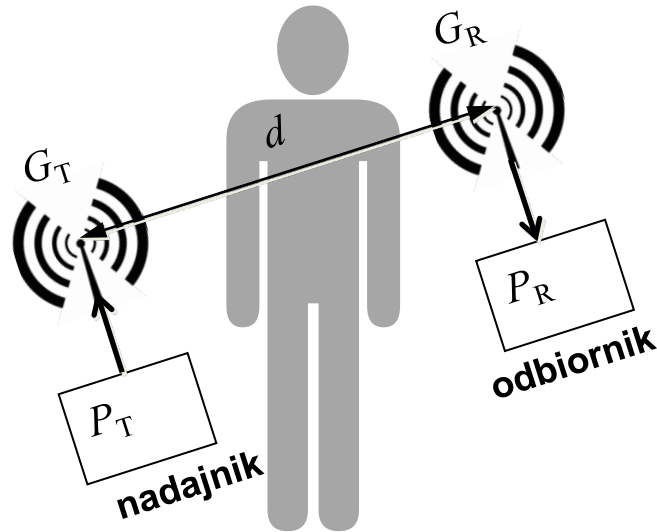
Wzrost temperatury ciała, zależy od:

- pochłoniętej energii,
- procesów termoregulacyjnych.



# Oddziaływanie ciała na falę elektromagnetyczną

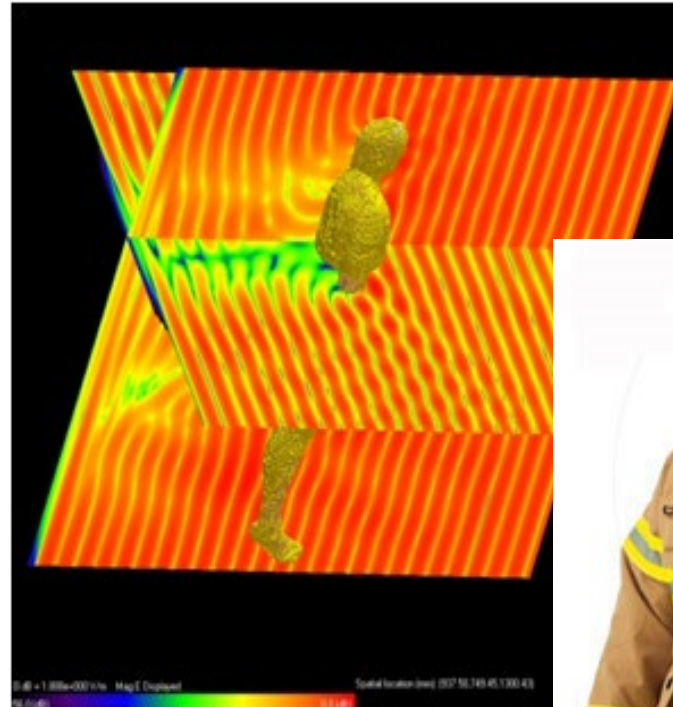
- Z punktu widzenia projektanta systemu radiokomunikacyjnego istotne jest analizowanie oddziaływania ciała na fale elektromagnetyczne
- Zjawiska wpływające na właściwości kanału radiowego to:
  - Tłumienie fali,
  - Odbicie fali,
  - Ugięcie fali



# Oddziaływanie ciała na falę elektromagnetyczną

W przypadku systemów projektowanych do pracy w pobliżu ciała człowieka:

- Trzeba zaprojektować specjalne anteny, które mogą pracować przy ciele
- Należy obliczyć ile energii zostanie wytłumione przez ciało, a ile dotrze do odbiornika







# Prawa Maxwella

Prawo Faradaya

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Prawo Gaussa dla elektryczności

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_{ev}$$

Prawo Ampere'a

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}$$

Prawo Gaussa dla magnetyzmu

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

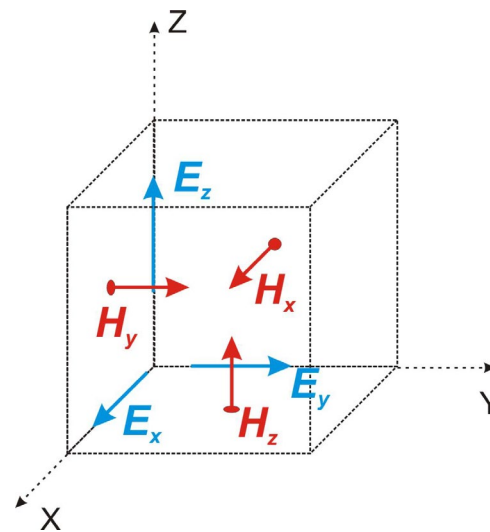
$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$





# Finite Difference Time Domain Metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu

Kane Yee (1966). "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 14 (3): 302–307.





# Finite Difference Time Domain Metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} + \rho H_x \right)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} + \rho H_y \right)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} + \rho H_z \right)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right)$$

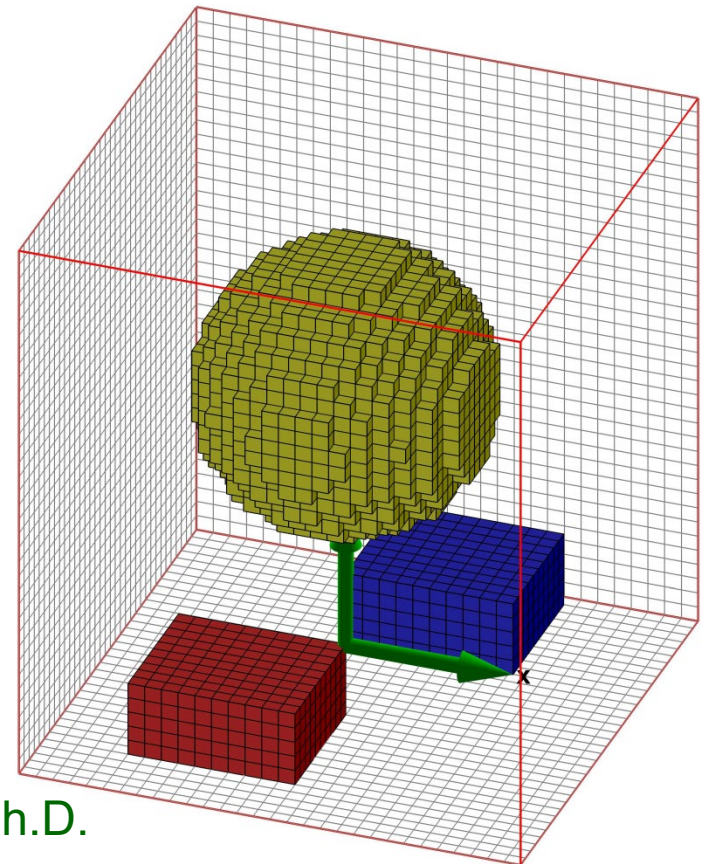
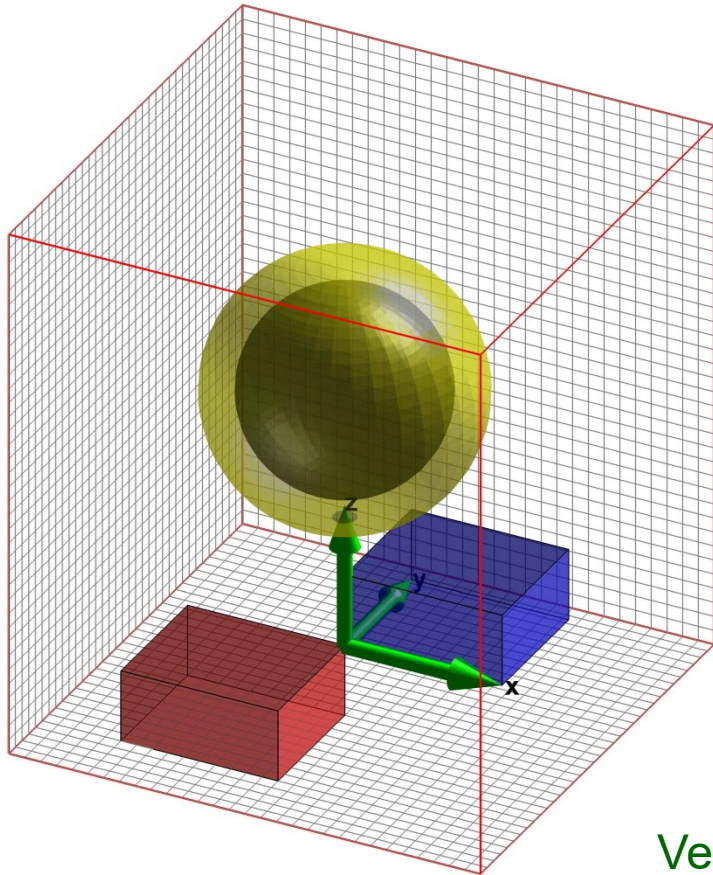
$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right)$$





# FDTD – Dyskretyzacja przestrzeni



Veysel Demir, Ph.D.  
vdemir@niu.edu

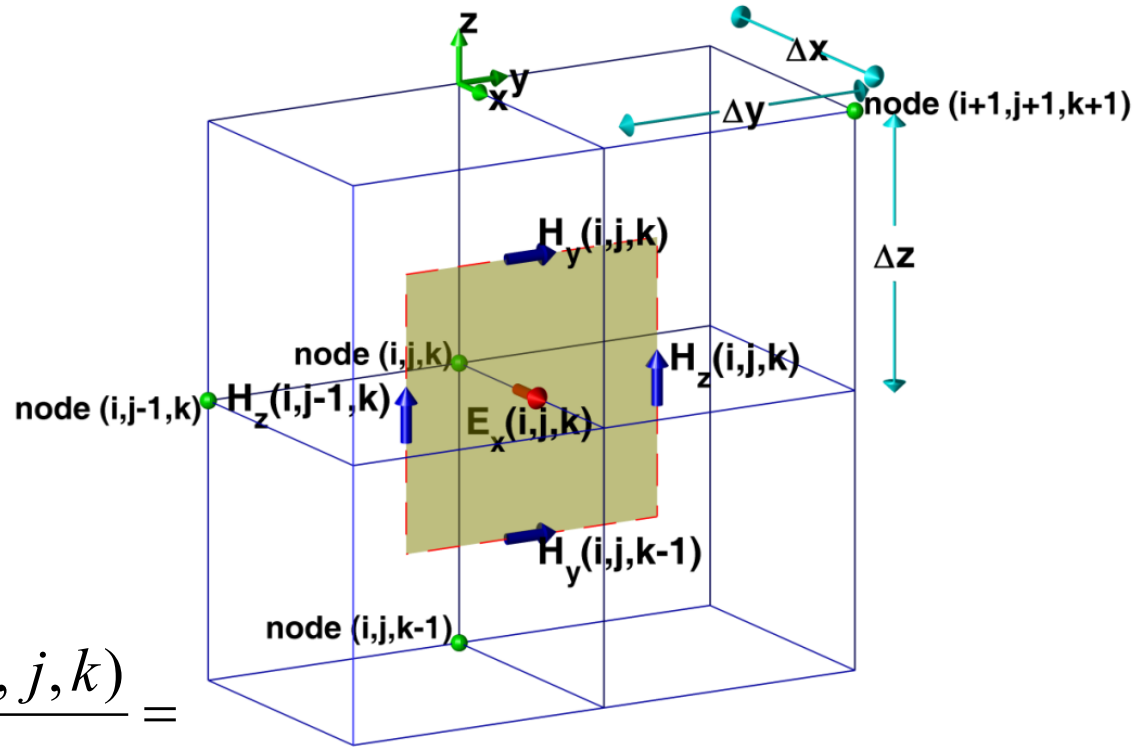
# FDTD

$$\epsilon_x \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}$$



$$\epsilon_x(i, j, k) \frac{E_x^{n+1}(i, j, k) - E_x^n(i, j, k)}{\Delta t} =$$

$$\frac{H_z^{n+0.5}(i, j, k) - H_z^{n+0.5}(i, j-1, k)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+0.5}(i, j, k) - H_y^{n+0.5}(i, j, k-1)}{\Delta z}$$

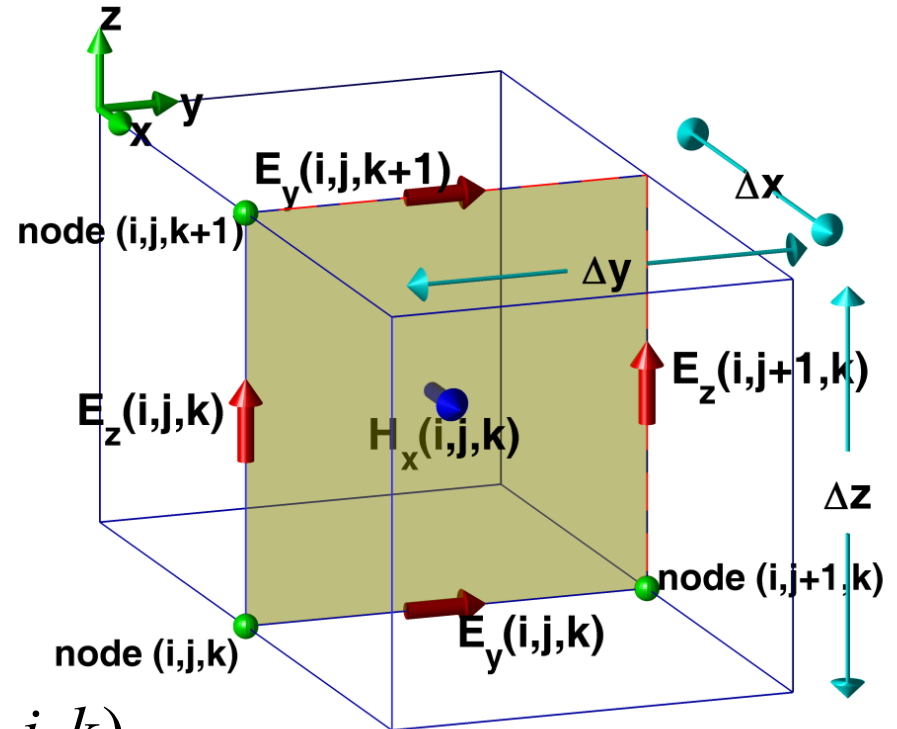


# FDTD

$$\mu_x \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y}$$



$$\mu_x(i, j, k) \frac{H_x^{n+0.5}(i, j, k) - H_x^{n-0.5}(i, j, k)}{\Delta t} = \frac{E_y^n(i, j, k+1) - E_y^{n+0.5}(i, j, k)}{\Delta z} - \frac{E_z^n(i, j+1, k) - E_z^n(i, j, k)}{\Delta y}$$







# Symulacje komputerowe oddziaływania fali na ciało

- Metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu FDTD umożliwia obliczanie za pomocą komputera pól elektromagnetycznych w złożonych obiektach
- Takim obiektem może być ciało człowieka, podzielone na komórki elementarne
- Metoda zalecana do obliczania oddziaływania fal na ciało człowieka

[*IEEE Std C95.3™-2002 (R2008),  
IEEE Recommended Practice for Measurements and  
Computations of Radio Frequency Electromagnetic Fields  
With Respect to Human Exposure to Such Fields, 100 kHz–  
300 GHz*]





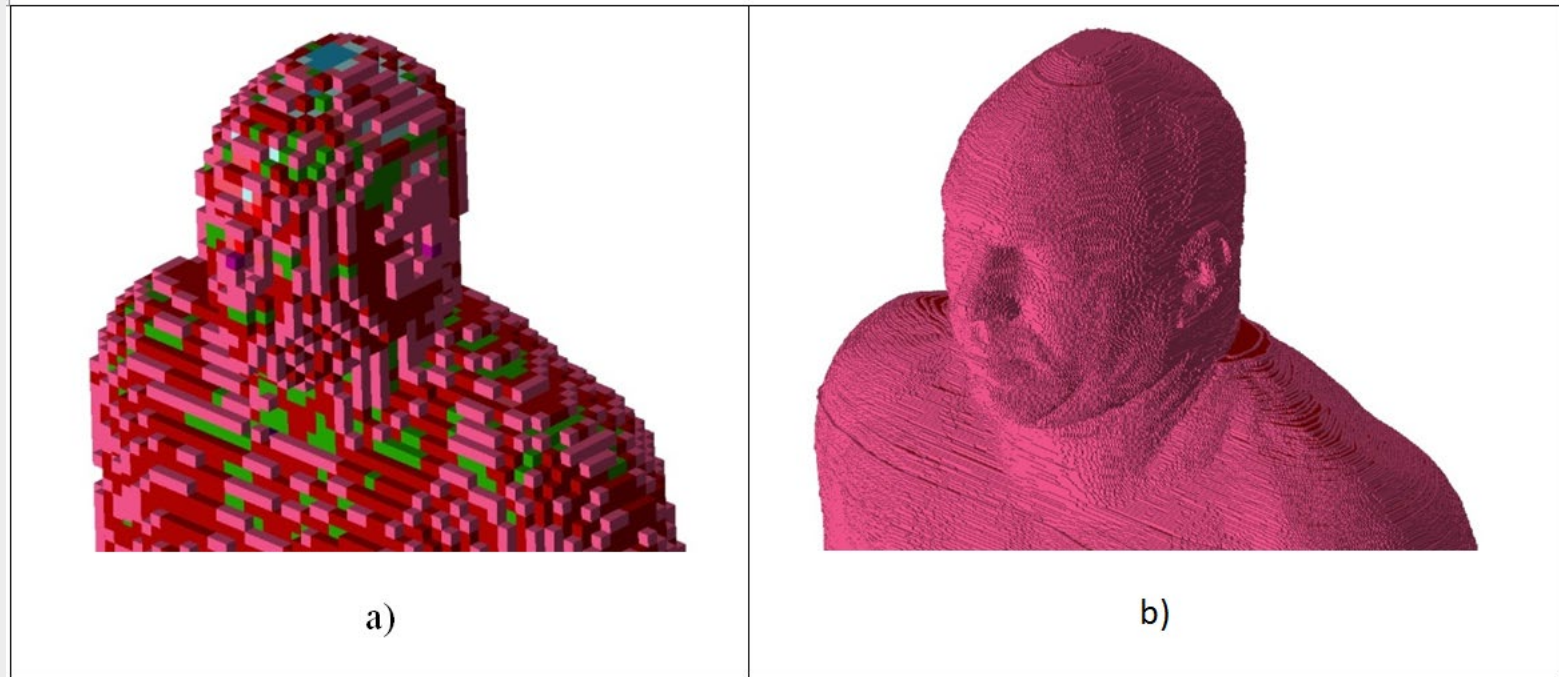
## Modele heterogeniczne (wielotkankowe)

- Reprezentują „spróbkowane” tkanki
- Różnią się szczegółowością (geometria, liczba tkanek)
- Remcom NMR Hershey
- CST HUGO
- Virtual Population





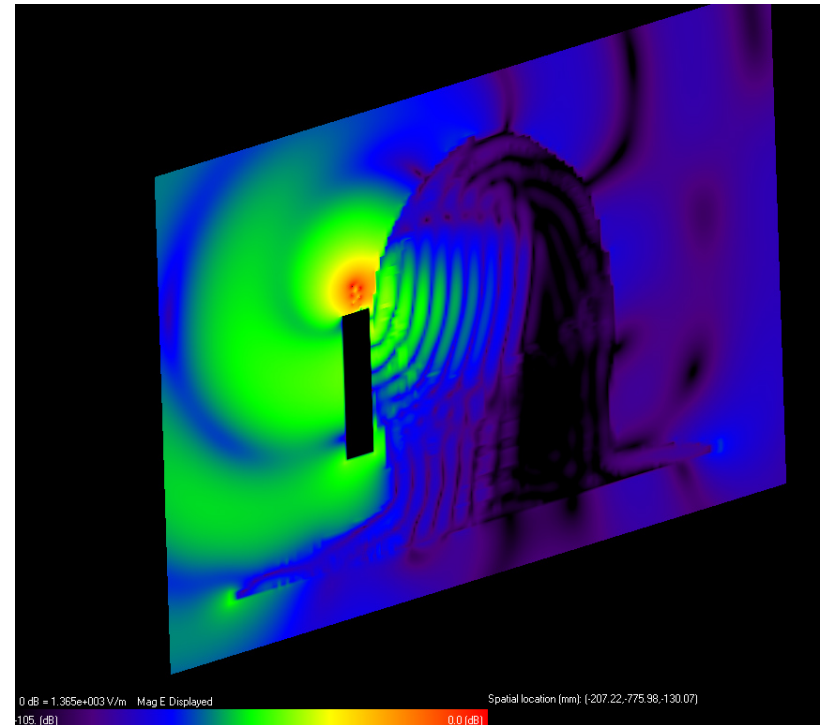
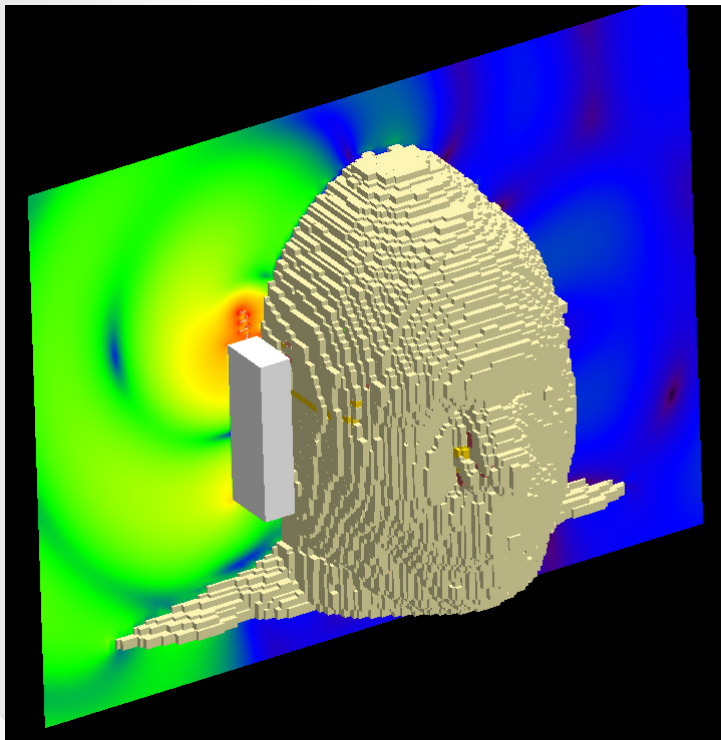
# Fantom numeryczny NMR Hershey (Remcom)



Model komputerowy NMR Hershey (Remcom), przy różnych dokładnościach dyskretyzacji: rozmiar woksela 10 mm (a) i 1 mm (b)

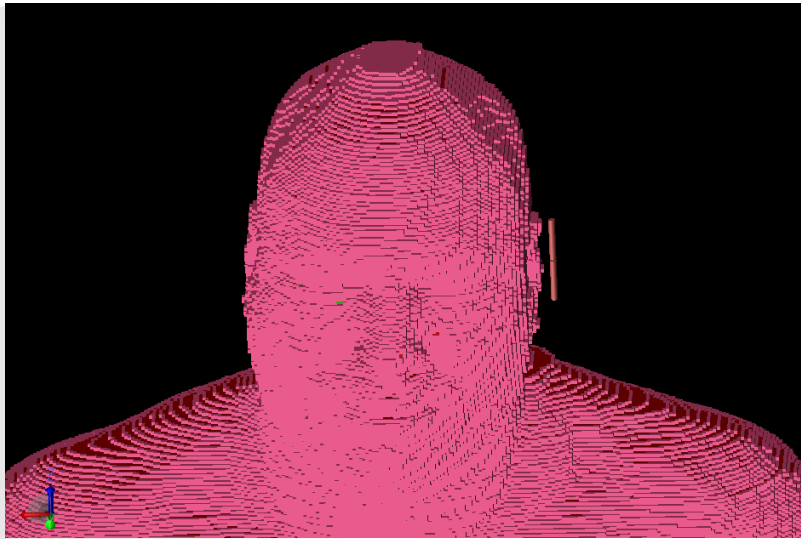
# Przykładowe wyniki symulacji – pole elektryczne

- Pole elektryczne w pobliżu terminala

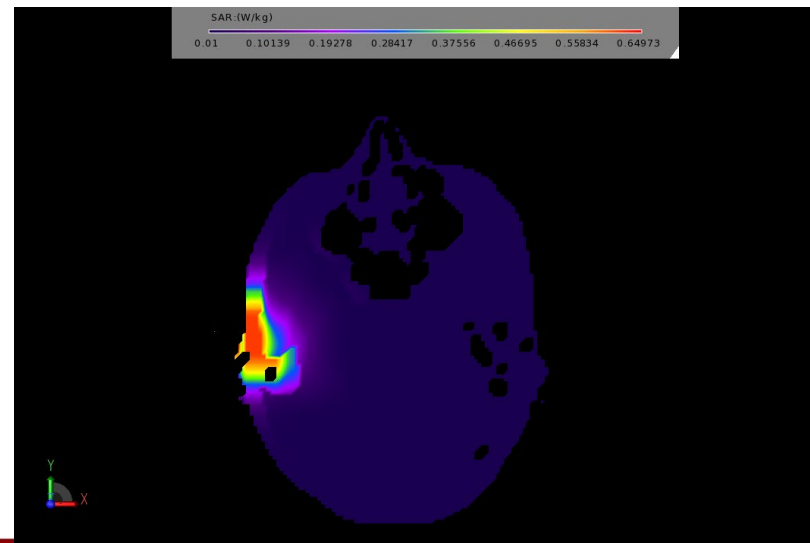
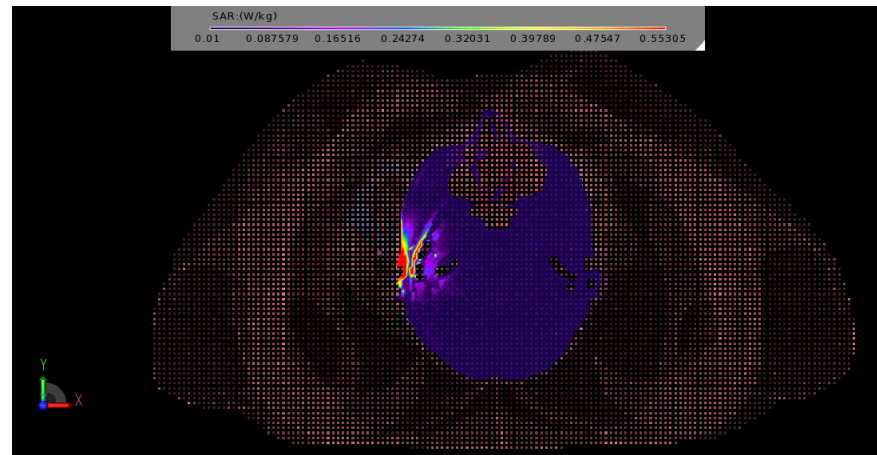




# Przykładowe wyniki symulacji SAR

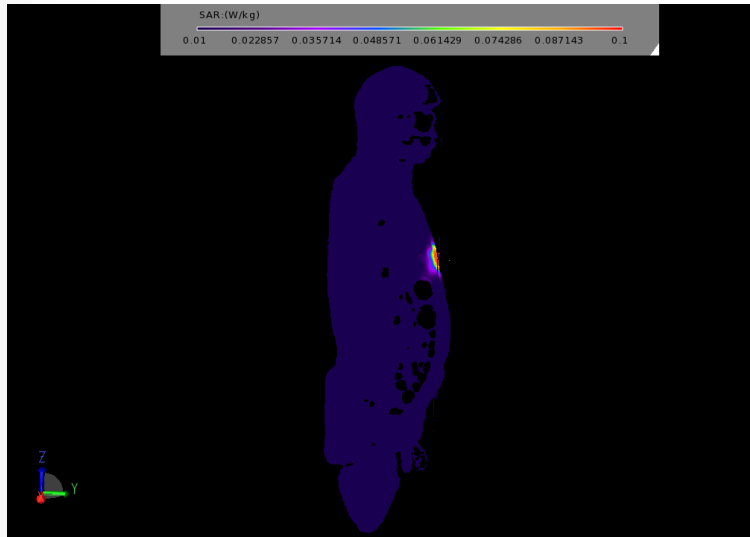
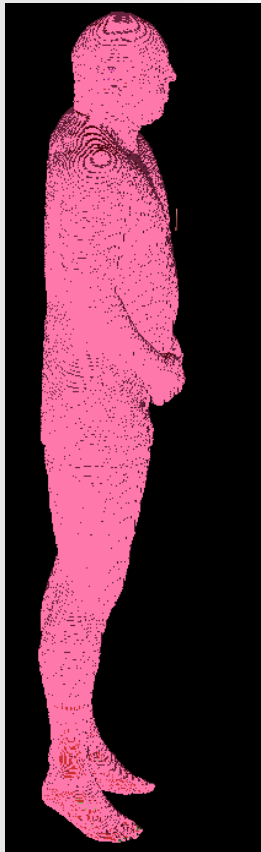


Moc doprowadzona do anteny 0,1W  
2,4 GHz

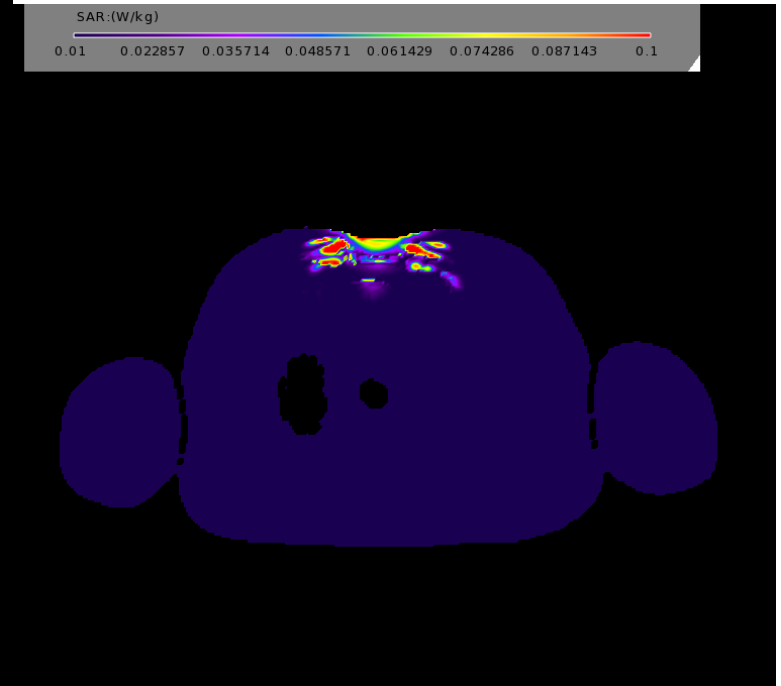




# Przykładowe wyniki symulacji SAR

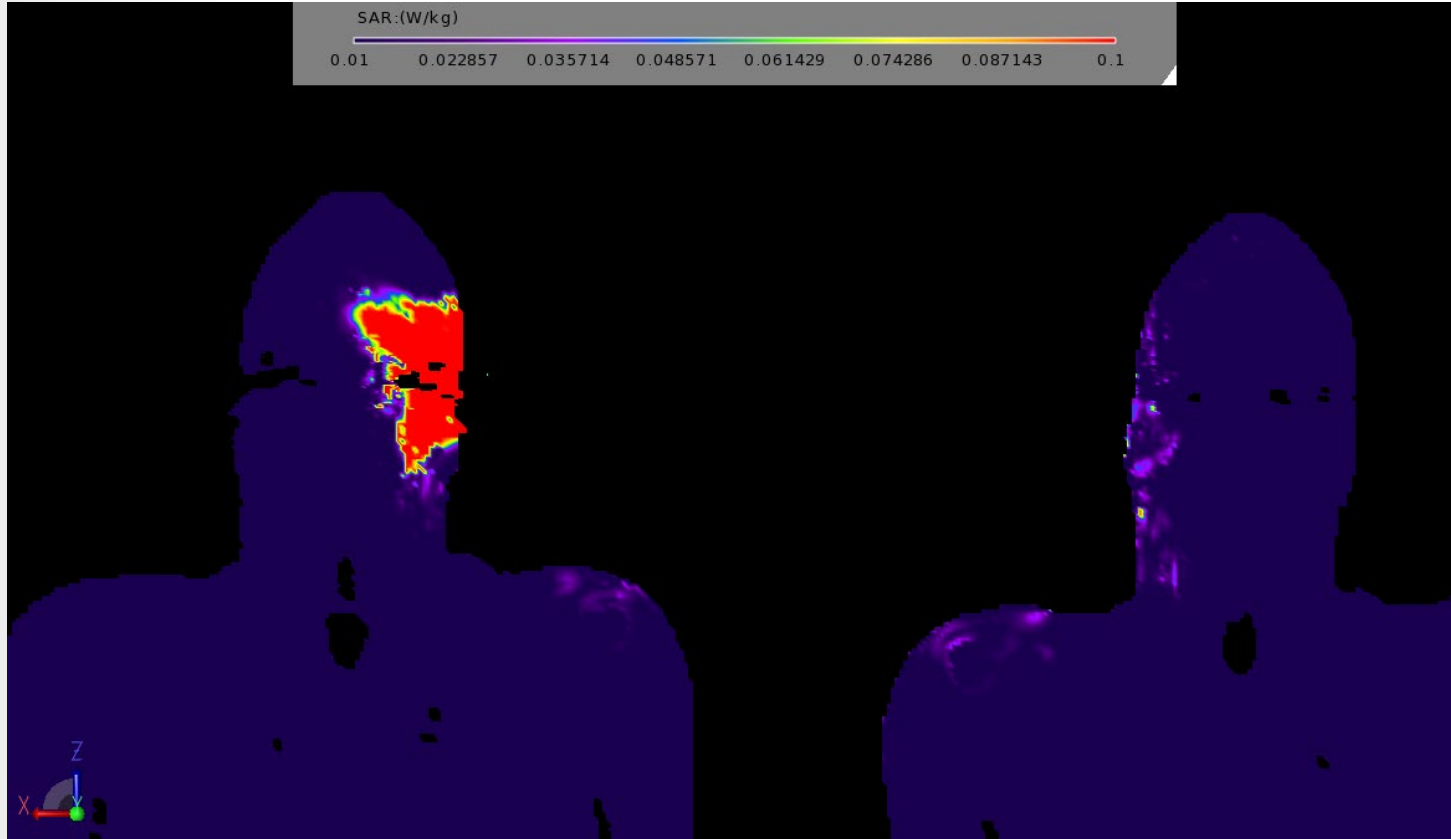


Moc doprowadzona do anteny 0,1W  
2,4 GHz





# Przykładowe wyniki symulacji





# FDTD – symulacje efektu termicznego

- Znając wartość SAR z symulacji metodą FDTD możemy obliczyć przyrost temperatury
- Równanie Pennesa:

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + [-\rho_{\text{blood}} w c_{\text{blood}} (T - T_{\text{core}})] + Q_m + SAR \rho$$

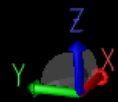
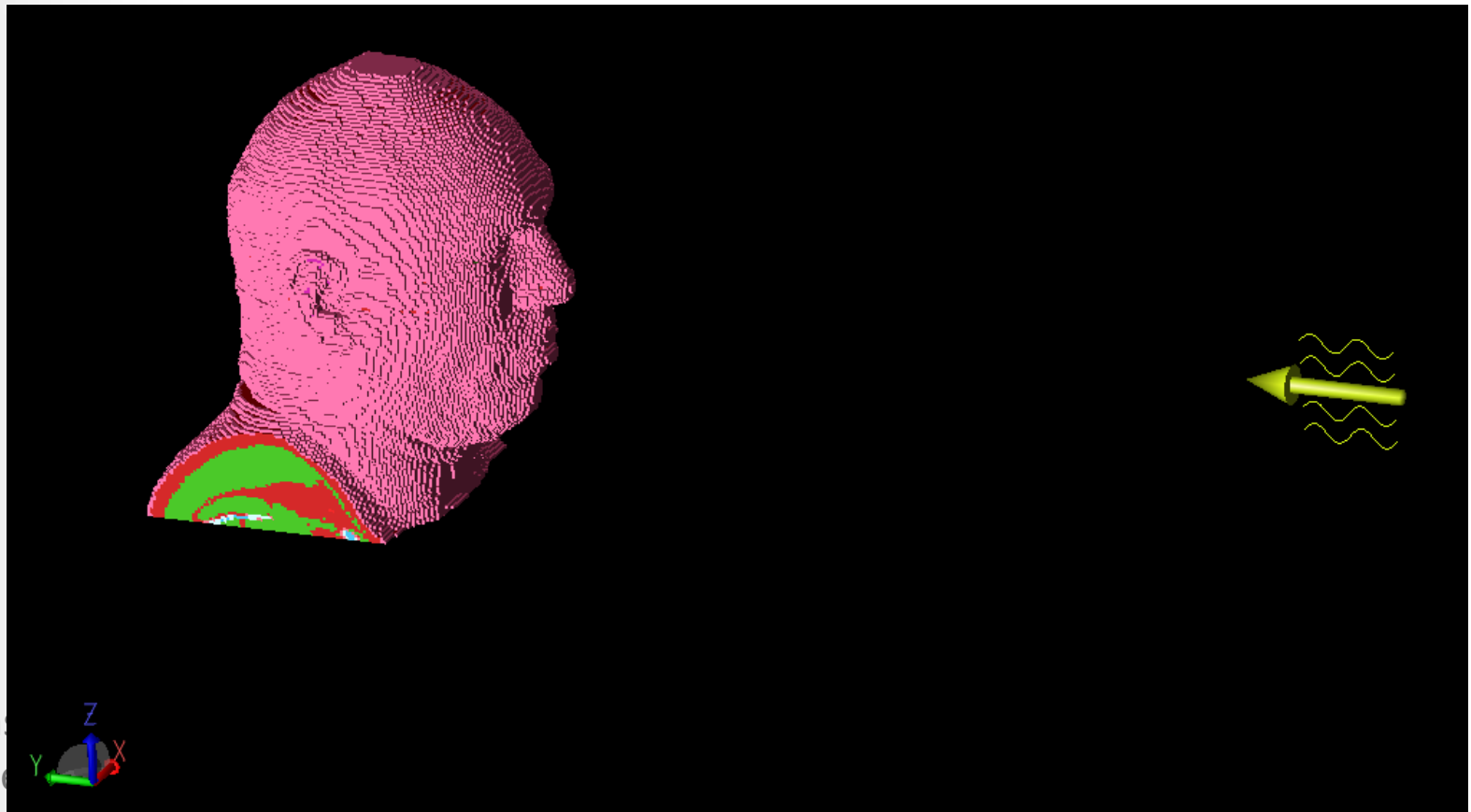
$\rho$  - gęstość tkanki,  
 $c$  - pojemność cieplna,  
 $k$  - przewodność cieplna,  
 $w$  - przepływ krwi przez tkankę,  
 $Q_m$  - ciepło metaboliczne





# FDTD – symulacje efektu termicznego

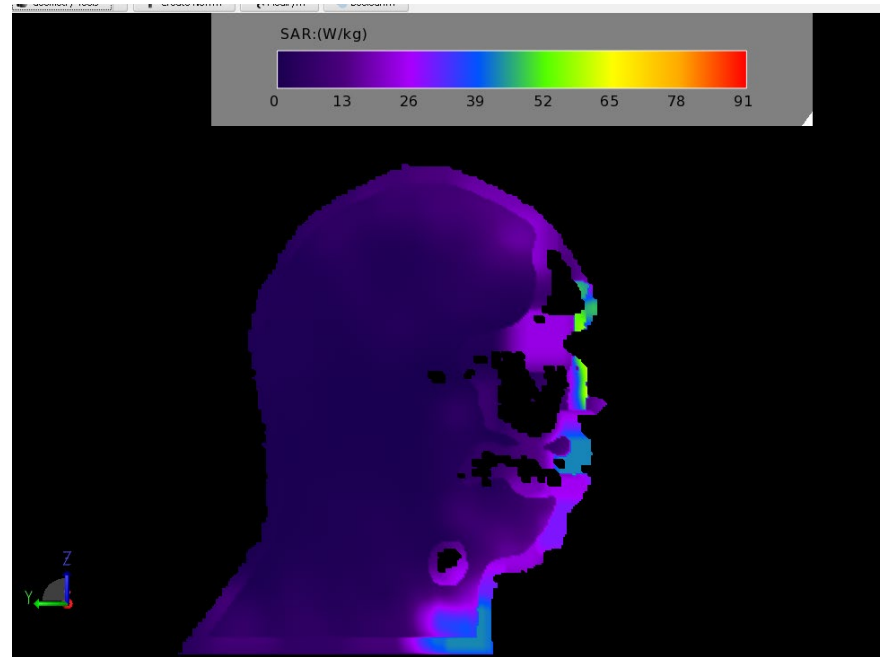
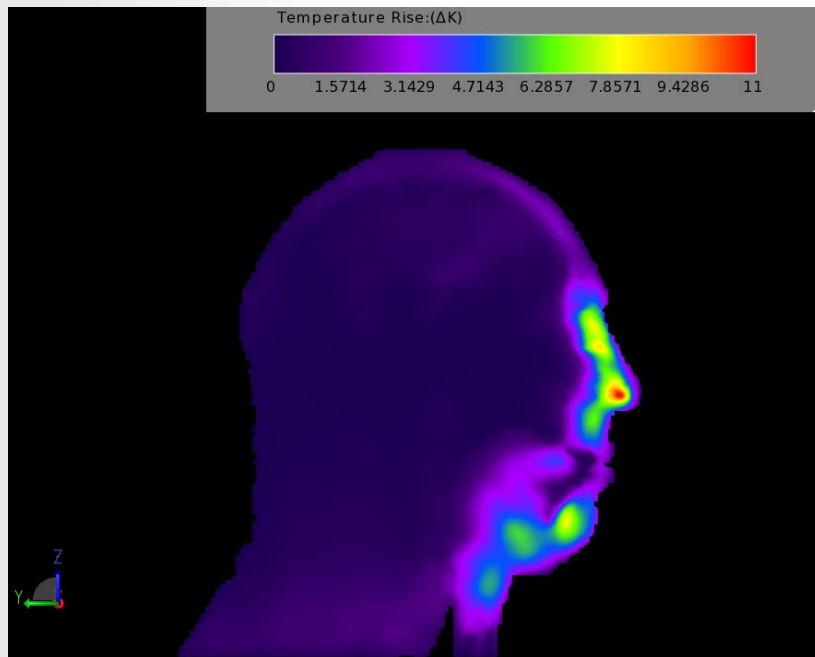
- 2 mm voxel, 2.45 GHz,  $E=1\text{kV/m}$







# FDTD – symulacje efektu termicznego



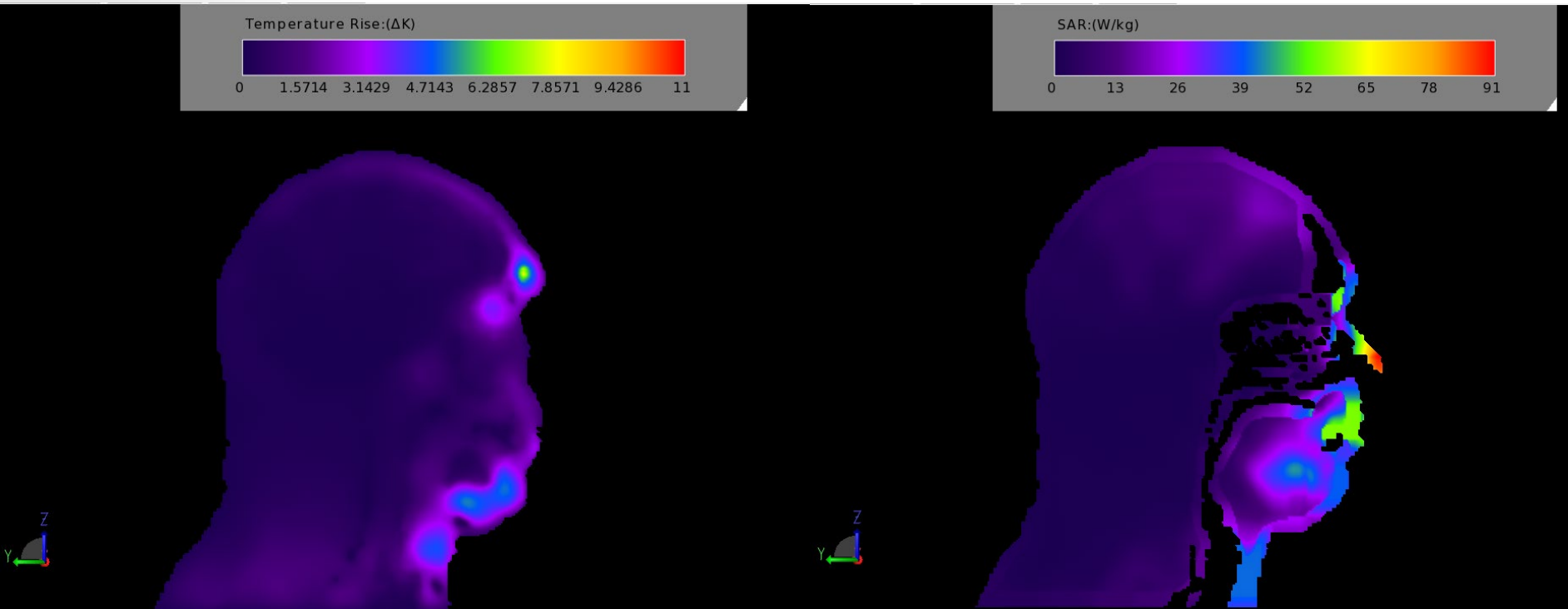
Instytut  
Elektroniki Przyrost temperatury

SAR



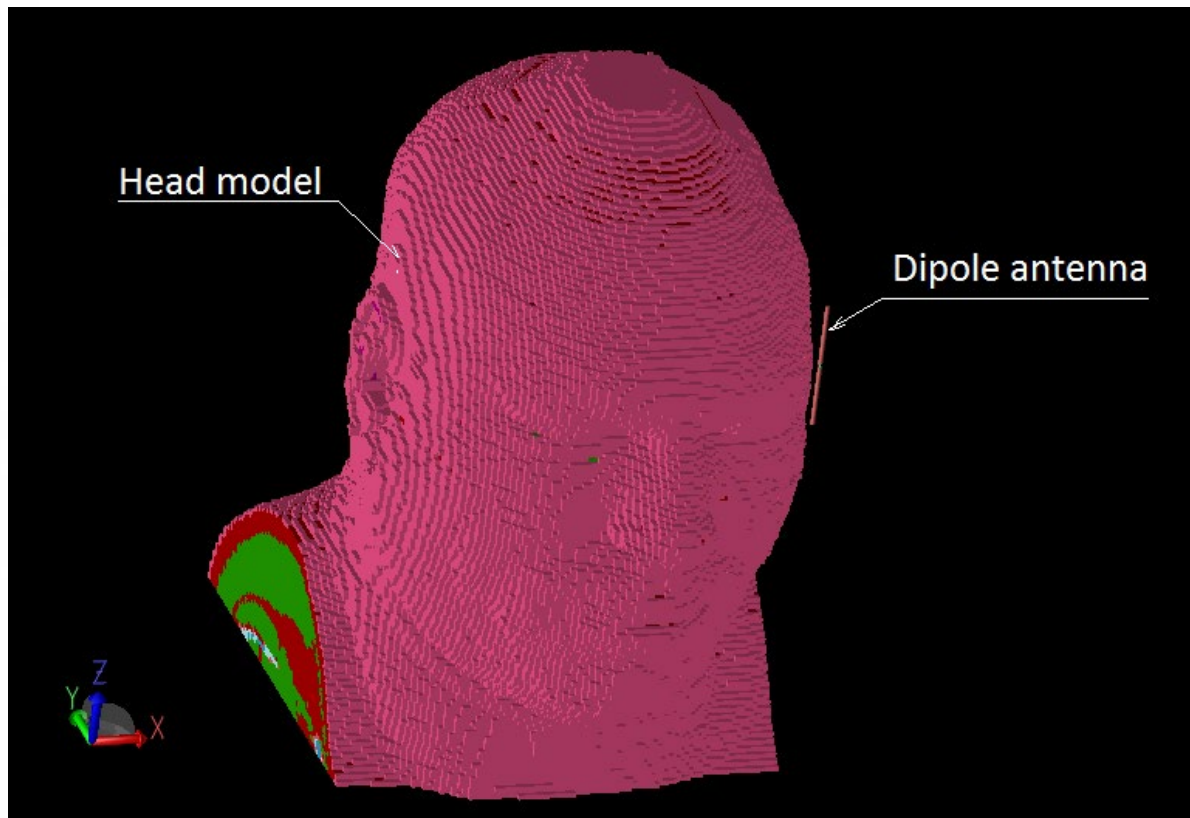


# FDTD – symulacje efektu termicznego

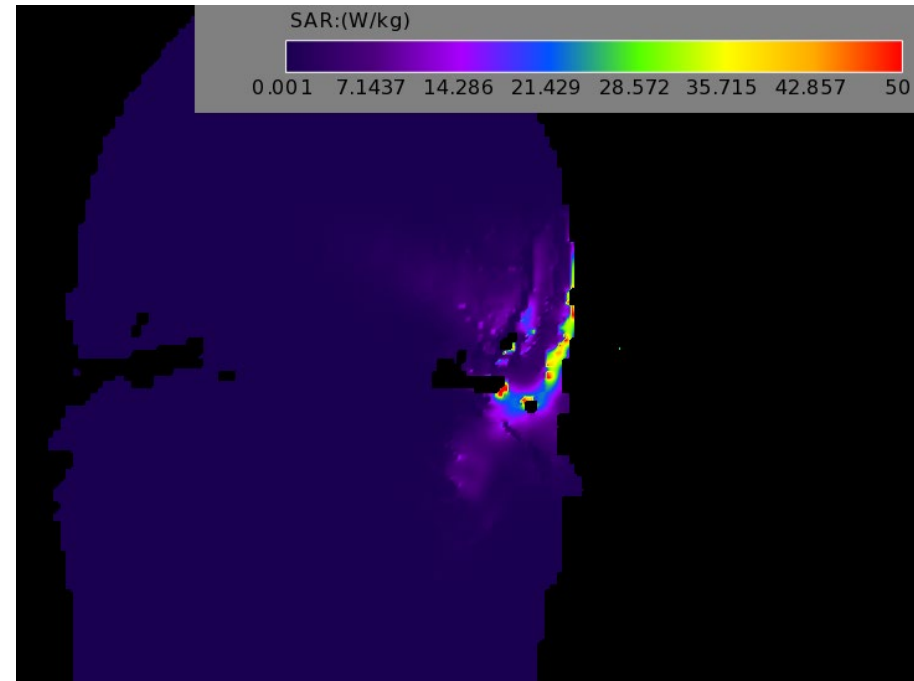
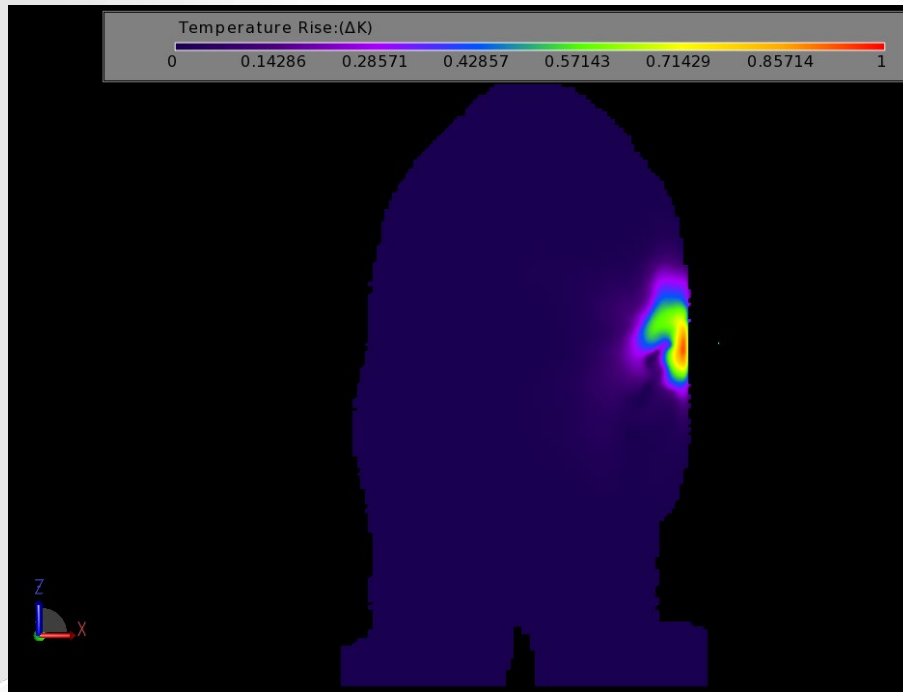




# FDTD – symulacje efektu termicznego



# FDTD – symulacje efektu termicznego

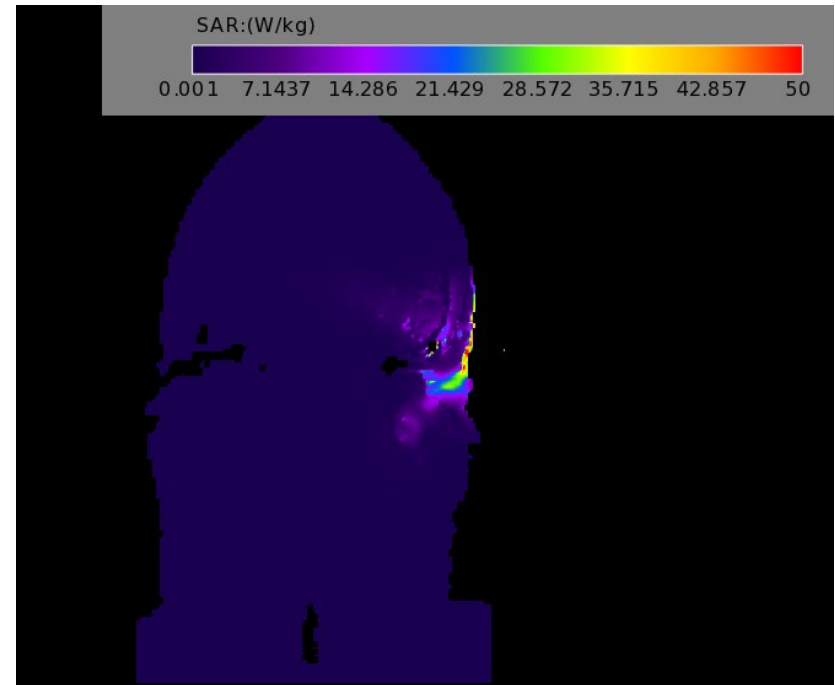
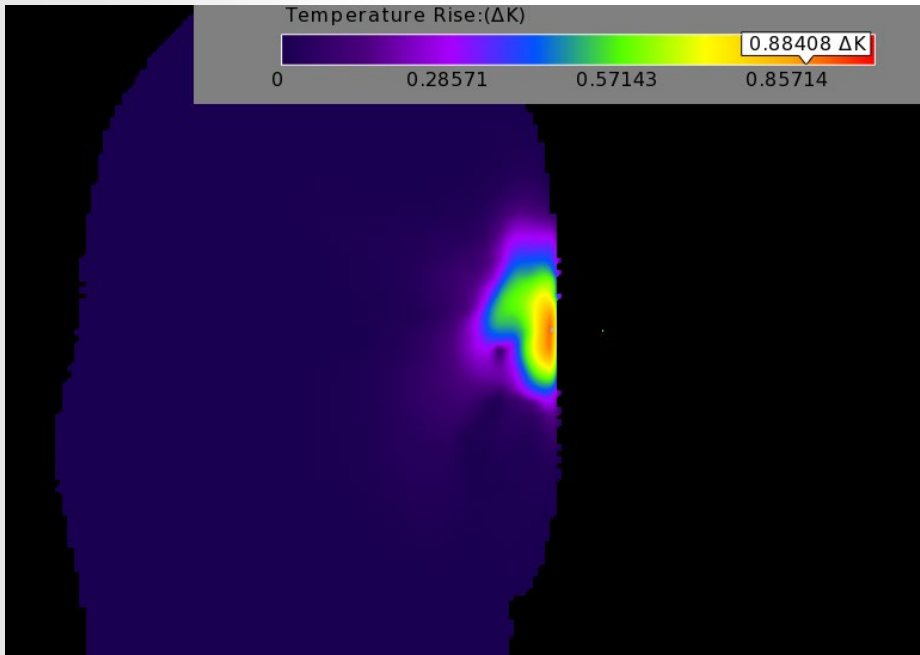


Instytut  
Elektroniki Przyrost temperatury

SAR

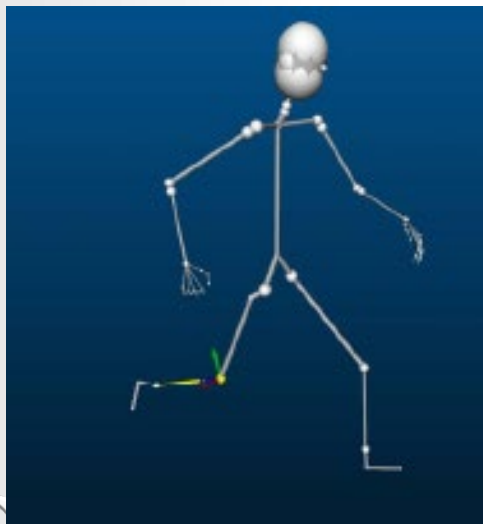


# FDTD – symulacje efektu termicznego



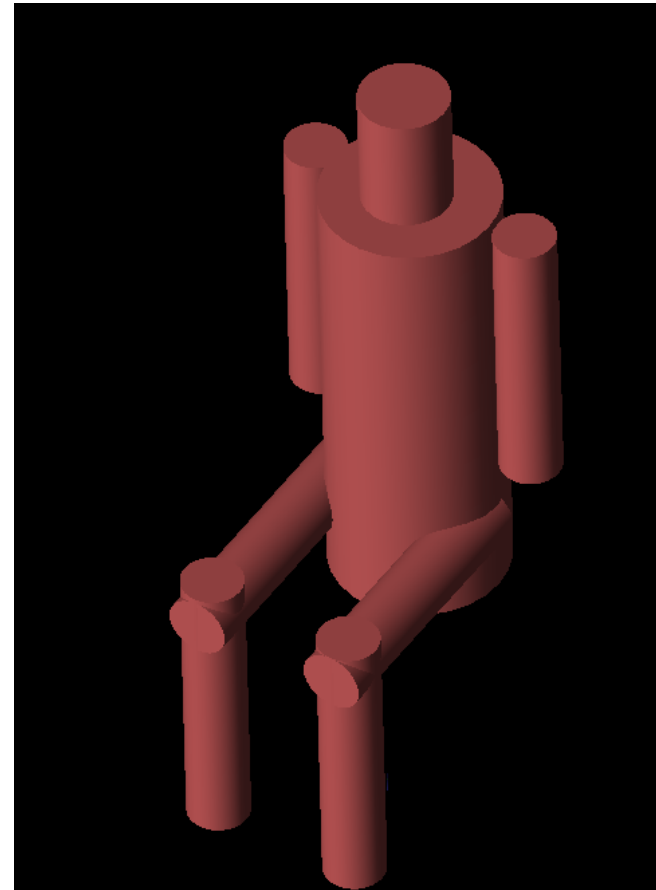
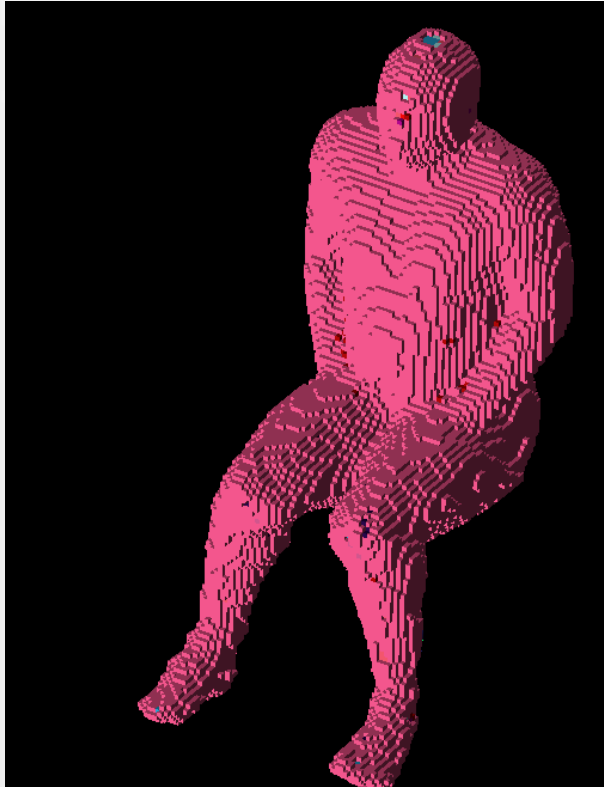
## Modele ciała w różnych pozach

- Numeryczne modele heterogeniczne można modyfikować tak aby odwzorowywały ciało w różnych pozycjach
- Program Varipose firmy Remcom
- Modele fizyczne o zmiennej geometrii są bardzo drogie i nie mają dokładnych odpowiedników numerycznych



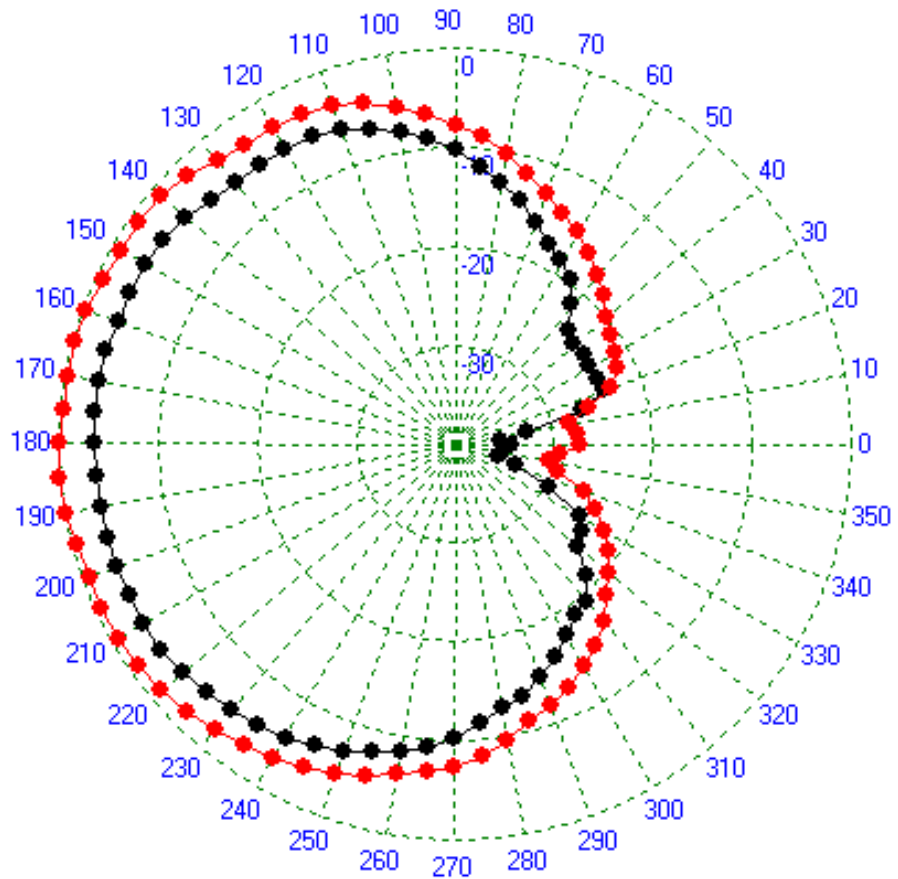


# Model człowieka siedzącego



# Model człowieka siedzącego

- Charakterystyka promieniowania anteny umieszczonej na nodze



● Model walcowy  
● NMR Hershey





# Fizyczne modele uproszczone

- Modele uproszczone stosowane są w pomiarach weryfikujących symulacje komputerowe
- Uproszczenie budowy wewnętrznej – model SAM
- Uproszczenie budowy wewnętrznej i zewnętrznej – modele walcowe

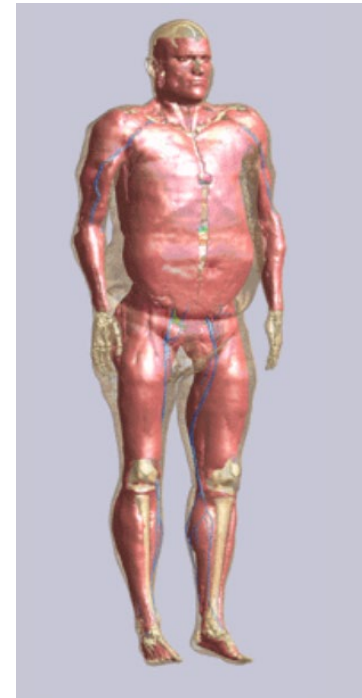






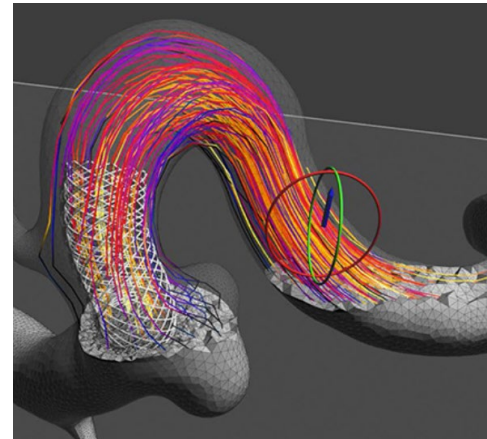
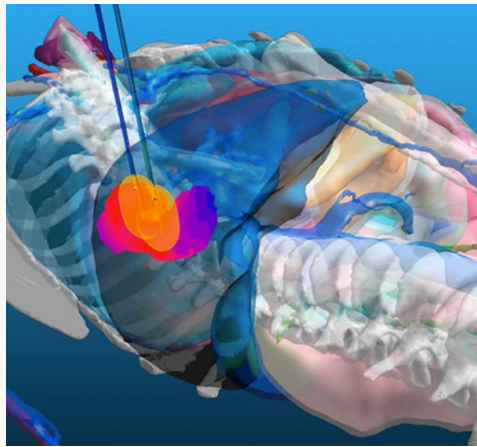
# Kierunki rozwoju narzędzi symulacyjnych

- **Modele reprezentantów populacji**
- Modele ciała kobiet (kobiet w ciąży), mężczyzn, dzieci, osób starszych
- Modele uwzględniające różną ilość tkanki tłuszczowej
- Virtual Population [ViP3.0 models](#), [IT'IS Foundation](#) at ETH Zurich



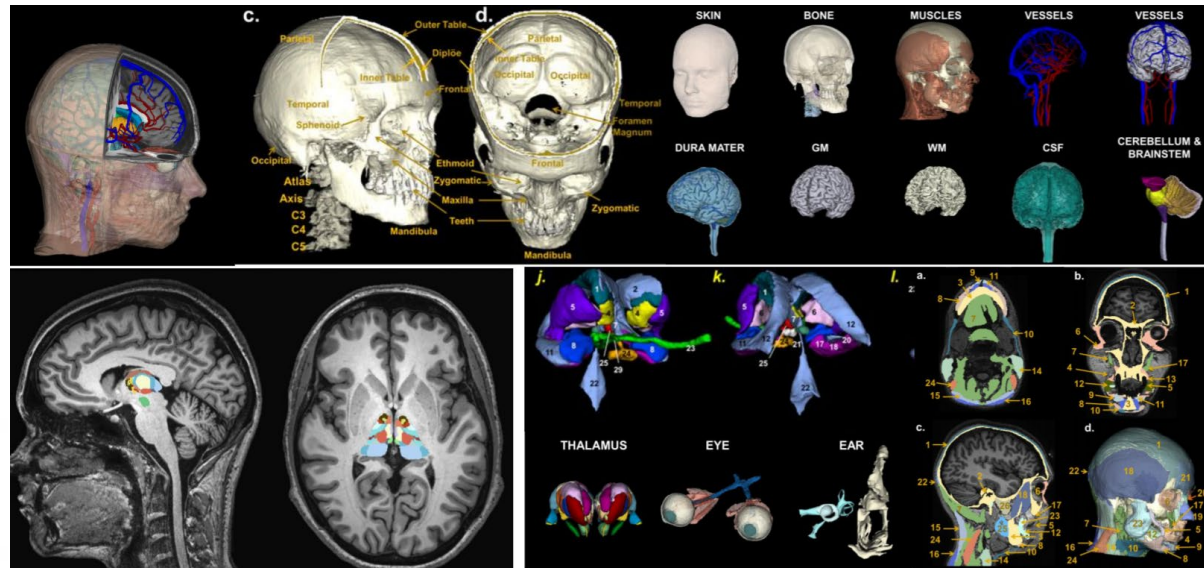
# Kierunki rozwoju narzędzi symulacyjnych

- **Rozwój symulacji wielodziedzinowych**, łączących symulacje elektromagnetyczne, termiczne i mechaniczne
- Możliwe jest dzięki temu analizowanie kompleksowych skutków oddziaływania pól elektromagnetycznych
- Bardzo duże wymagania w stosunku do komputerów



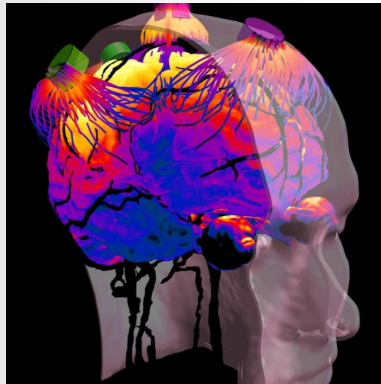
# Kierunki rozwoju narzędzi symulacyjnych

- Narzędzia ułatwiające generowanie modeli ciała na podstawie danych obrazowych
- Możliwość przeprowadzenia symulacji dla konkretnego pacjenta



# Kierunki rozwoju narzędzi symulacyjnych

- Symulacja oddziaływania fal elektromagnetycznych na ciało z uwzględnieniem propagacji impulsów w układzie nerwowym.
- Wspomaganie projektowania stymulatorów nerwów i mózgu



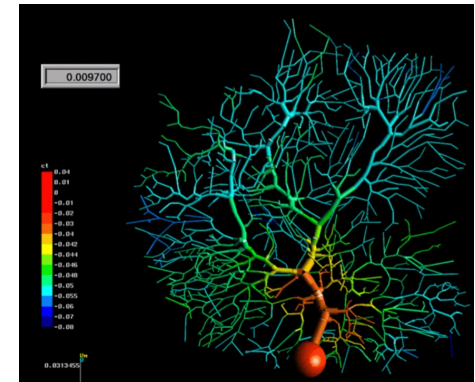
```
jupyter test1 Last Checkpoint: Yesterday at 6:05 PM (unsaved changes)
File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help
Run H Run C Code ? LM

In [1]: from neuron import gui2, h, rxd
        gui2.set_backend('jupyter')

In [2]: h.load_file('geo5038804.hoc')
Out[2]: 1.0

In [3]: ps = gui2.PlotShape()
        ps.variable('v')
        ps.show(0)
```

No coloration
cm
diam
L.cap
v

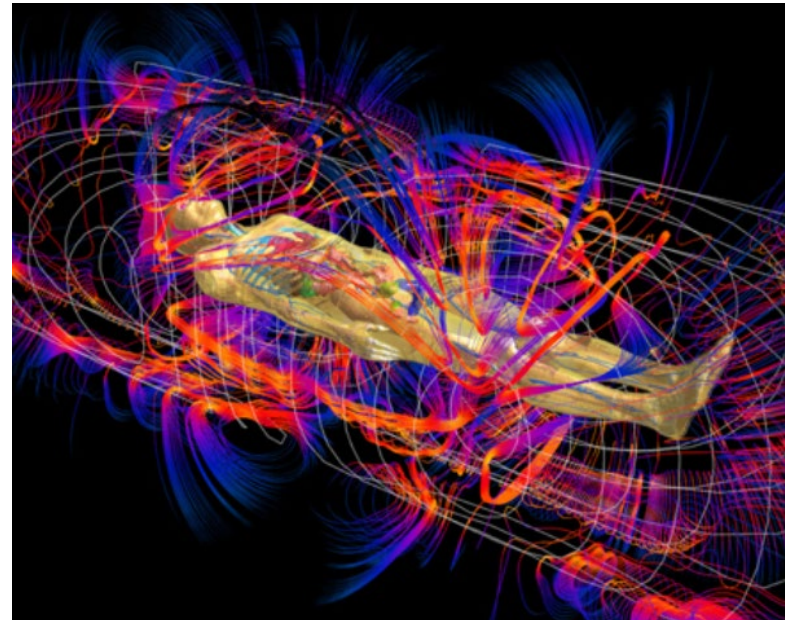
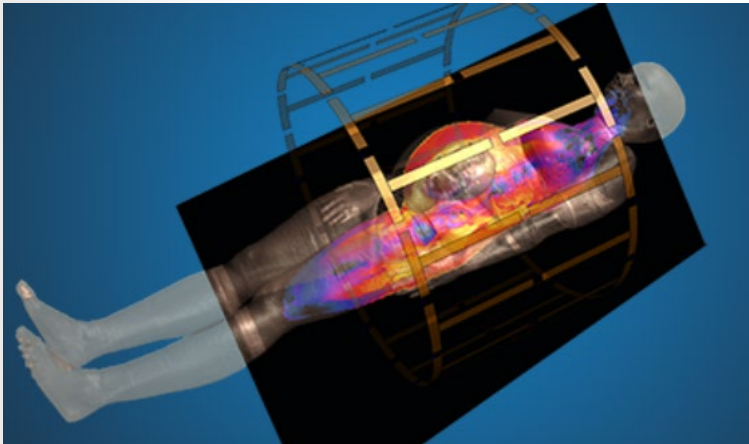






# Kierunki rozwoju narzędzi symulacyjnych

- Optymalizacja aparatury do obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego





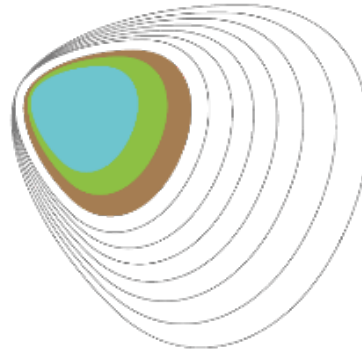
# Podsumowanie

- Oddziaływanie pól elektromagnetycznych na ludzi jest przedmiotem badań naukowych
- Zastosowanie metod numerycznych umożliwia analizę rozkładów pól elektromagnetycznych w ciele człowieka
- Możliwe jest badanie efektu termicznego
- Symulacje stanowią sprawdzone narzędzie umożliwiające weryfikację poziomu ekspozycji użytkownika na promieniowanie terminala przenośnego
- Wyniki symulacji umożliwiają projektowanie i optymalizację zabiegów medycznych oraz aparatury, w których wykorzystywane są pola elektromagnetyczne





Politechnika Łódzka



IV Międzynarodowa Konferencja

Pole elektromagnetyczne  
i przyszłość telekomunikacji

Badania. Monitoring. Doświadczenia krajowe i zagraniczne.

Dziękuję za uwagę



Instytut  
Elektroniki