



Komunikacja w nanoskali

Plan wykładu

1. Jak stworzyć nową dziedzinę badań?

Historia **Tadashiego Nakano**

2. Nanokomunikacja:

- gdzie ją zobaczymy?

- jak działa?

3. Mechanizm FRET

4. Eksperymenty

5. Przykłady zastosowań medycznych

6. Podsumowanie

Jak to się może zacząć

Tadashi Nakano, post-doc,
Osaka → University of California, 2002



Szef grupy badawczej:

- *"codziennie przychodźcie z jednym nowym pomysłem na badania"*
- nacisk na to czym się chcemy zająć, a nie na to jak to zrobić

Pierwsze efekty

Tadashi Nakano, post-doc,
Osaka → University of California, 2002



Nowa idea:

komunikacja molekularna

Pierwsze publikacje, 2005:

1. T. Suda, M. Moore, T. Nakano, R. Egashira, and A. Enomoto, “Exploratory research on molecular communication between nanomachines,” Genet. Evol. Comput. Conference (GECCO), Washington, USA.
2. S. Hiyama, Y. Moritani, T. Suda, R. Egashira, A. Enomoto, M. Moore, T. Nakano, “Molecular communication,” NSTI Nanotechnol. Conference.

Interdyscyplinarność

- naukowcy z laboratorium sieci komputerowych studiujący:
 - biologię
 - chemię
- konieczność prac doświadczalnych



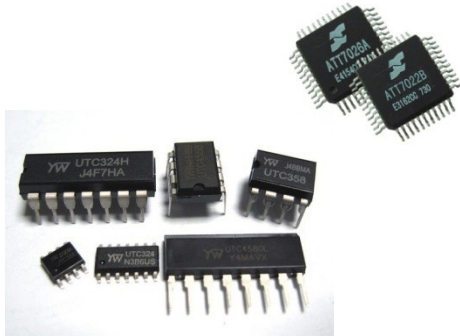
- kontakty z biologami,
lekarzami

podejście do eksperymentu,
oczekiwane wyniki,
metody pracy...

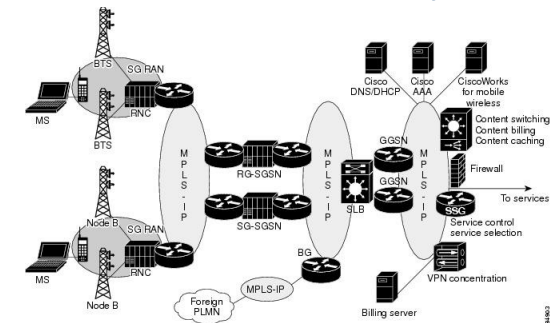


Motywacja dla rozwoju dziedziny

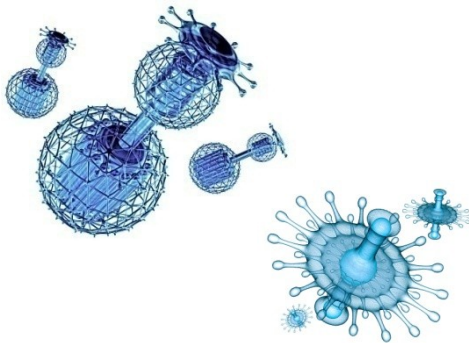
ELEKTRONIKA



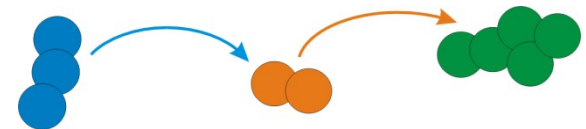
TELEKOMUNIKACJA



NANOTECHNOLOGIA



NANOKOMUNIKACJA

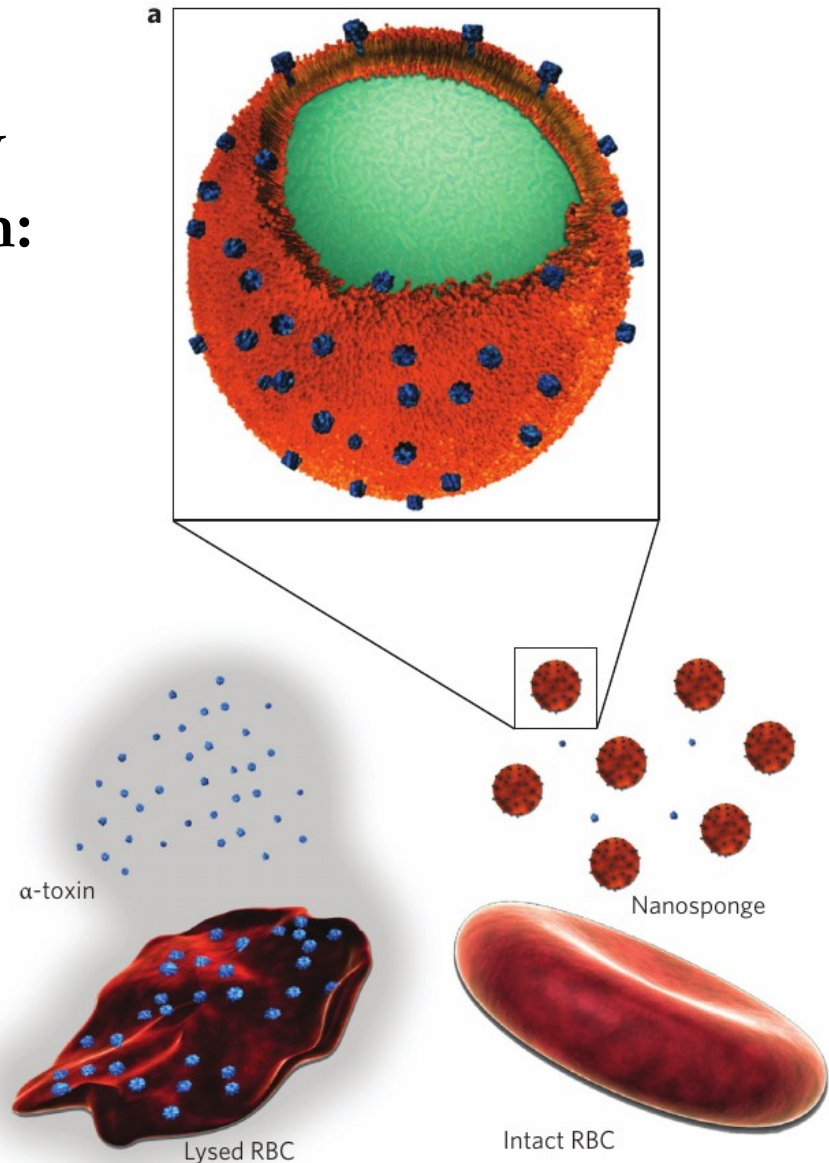


Motywacje: nano-robotyka

Nano-maszyny czyszczące krew z bakterii i toksyn:

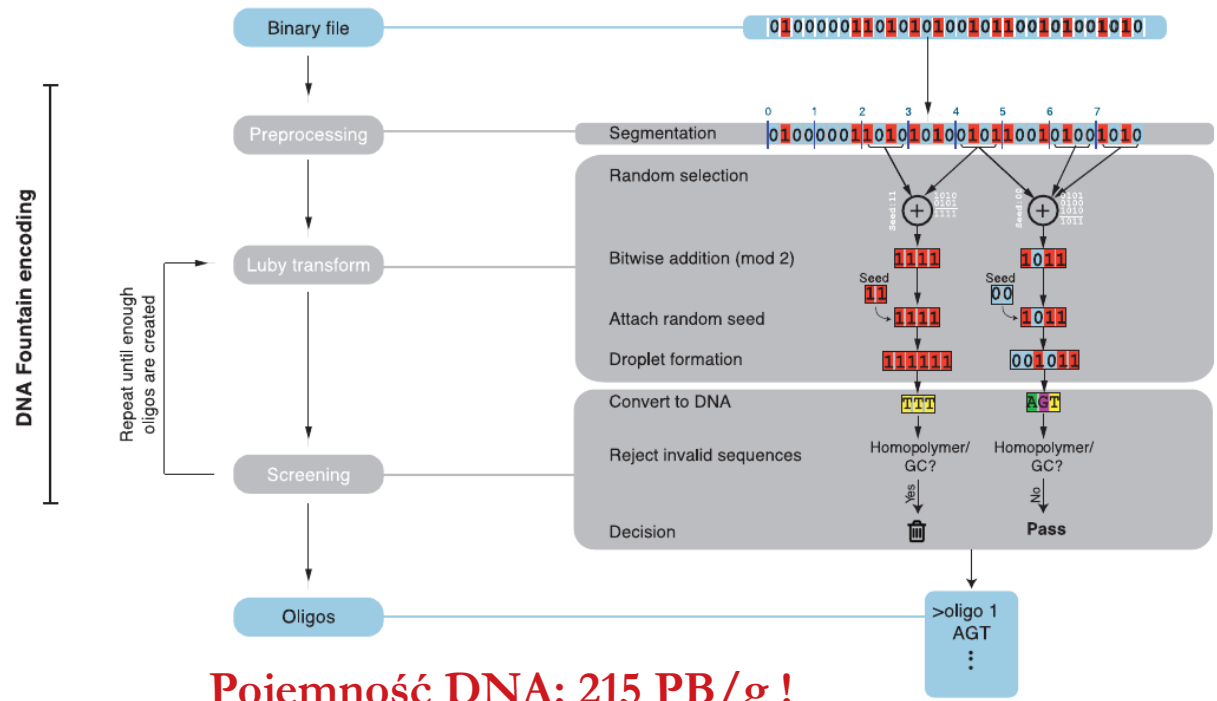
C. Hu, R. Fang, J. Copp, *et al.*, A biomimetic nanosponge that absorbs pore-forming toxins, *Nature Nanotechnology*, 2013.
<https://www.youtube.com/watch?v=1le-uYBnCNs>

B. Esteban-Fernández de Ávila *et al.*, Hybrid biomembrane-functionalized nanorobots for concurrent removal of pathogenic bacteria and toxins, *Science Robotics*, 2018.



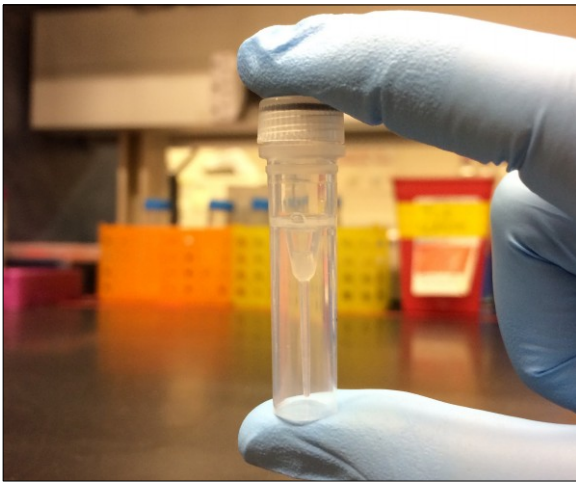
Motywacje: bazy danych

Kodowanie danych w łańcuchach DNA:



Pojemność DNA: 215 PB/g !

← **Cyberatak z wykorzystaniem kodu zapisanego w DNA**

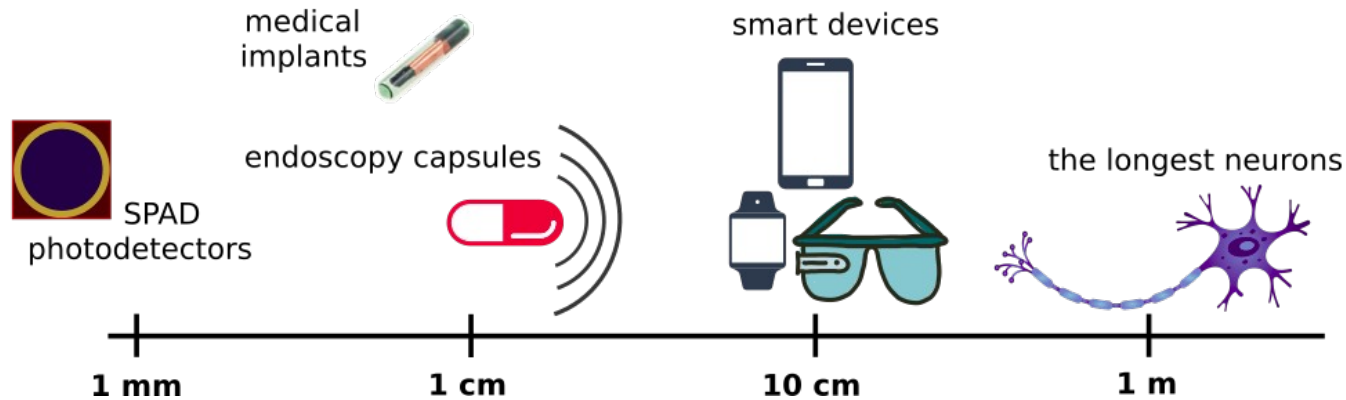
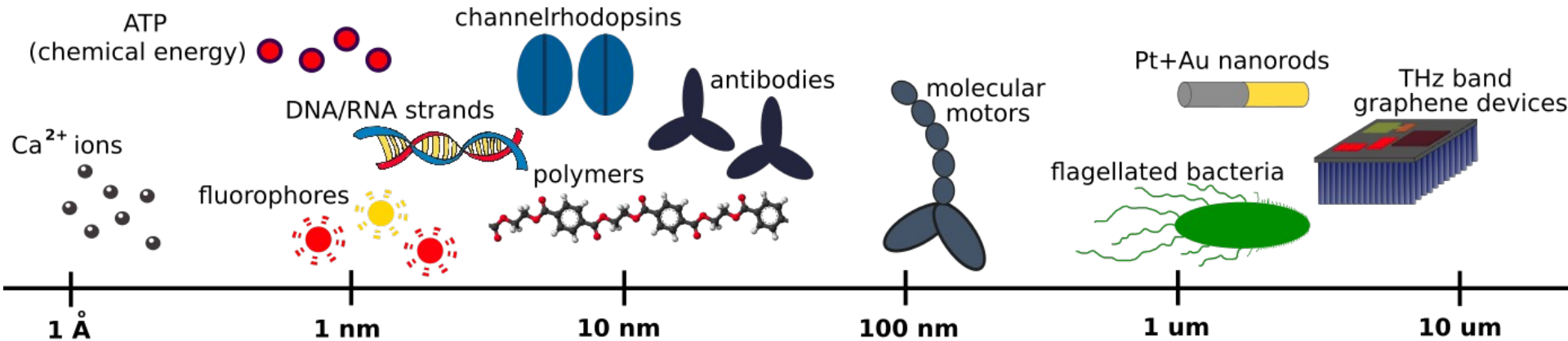


"baza" danych :-)

Y. Erlich and D. Zielinski, DNA Fountain enables a robust and efficient storage architecture, Science, 2017.

P. Ney, K. Koscher, L. Organick, L. Ceze, T. Kohno, Computer Security, Privacy, and DNA Sequencing: Compromising Computers with Synthesized DNA, Privacy Leaks, and More, USENIX Security Symposium, 2017.

Rozmiary cząsteczek i urządzeń



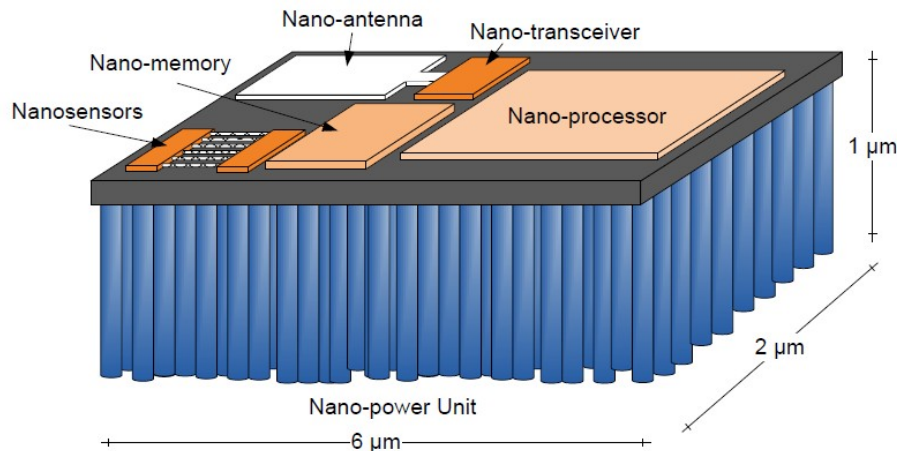
Podjęcia do problemu

1. Komunikacja molekularna

(wywodząca się podejścia *bio-hybrid*, następny slajd)

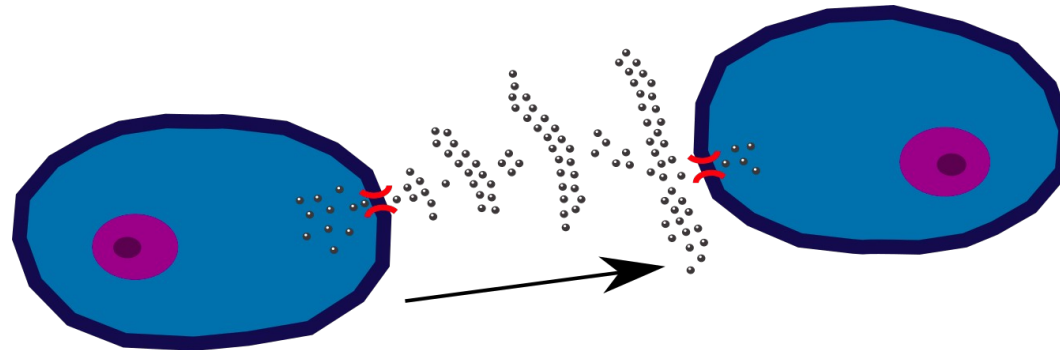
2. Miniaturyzacja (*top-down*)

- rozmiar maszyn: mikrometry
- pasmo 0.1-10 THz
- nowe materiały: nanorurki węglowe i grafen
- w grafenie fala EM rozchodzi się ok. 100 razy wolniej,
a więc: dla $f = 1 \text{ THz} \Rightarrow \lambda \approx 3 \mu\text{m}$

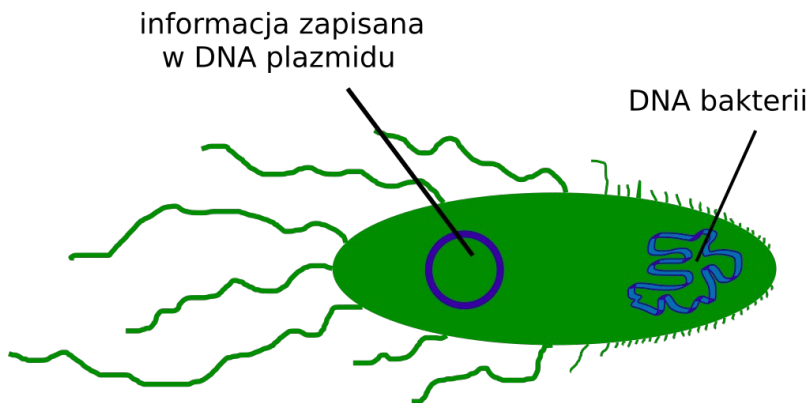


Josep Miquel Jornet

Mechanizmy komunikacji molekularnej



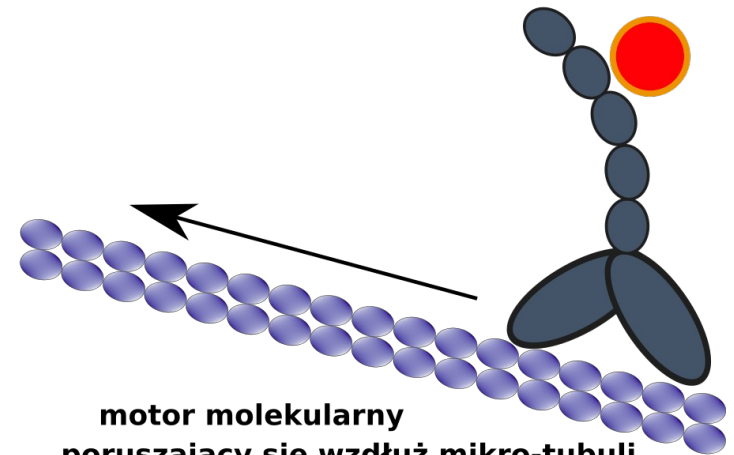
sygnalizacja między żywymi komórkami
przy użyciu jonów wapnia Ca^{2+}



informacja zapisana
w DNA plazmidu

DNA bakterii

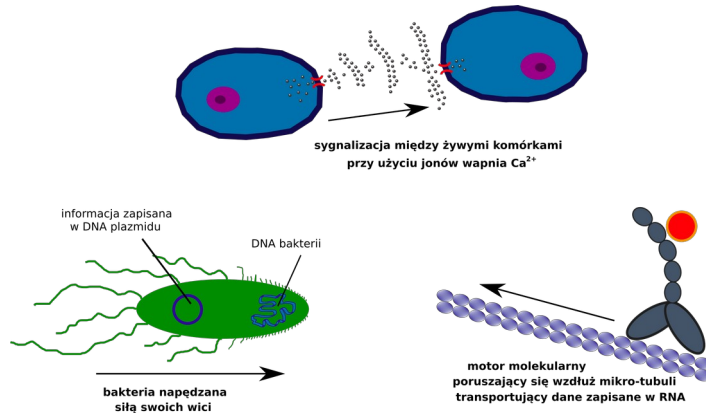
bakteria napędzana
siłą swoich wici



motor molekularny
poruszający się wzdłuż mikro-tubuli
transportujący dane zapisane w RNA

Szybkość propagacji sygnału

Mechanizmy molekularne



$< 50 \mu\text{m/s}$ ($5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)

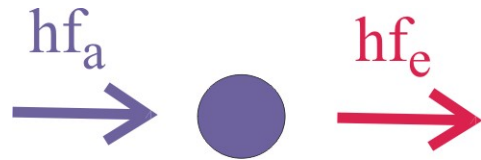
Förster Resonance Energy Transfer (FRET)



$\approx 1 \text{ m/s}$

Förster Resonance Energy Transfer (FRET)

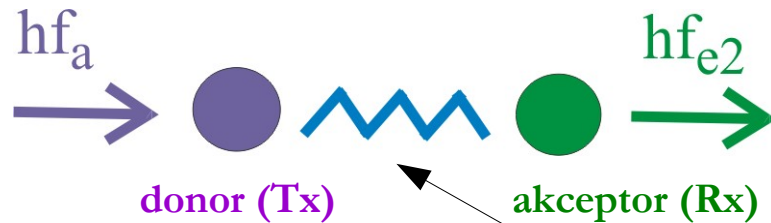
WZBUDZENIE, EMISJA:



MIMO-FRET:



WZBUDZENIE, FRET, EMISJA:



Modulacja ON-OFF:

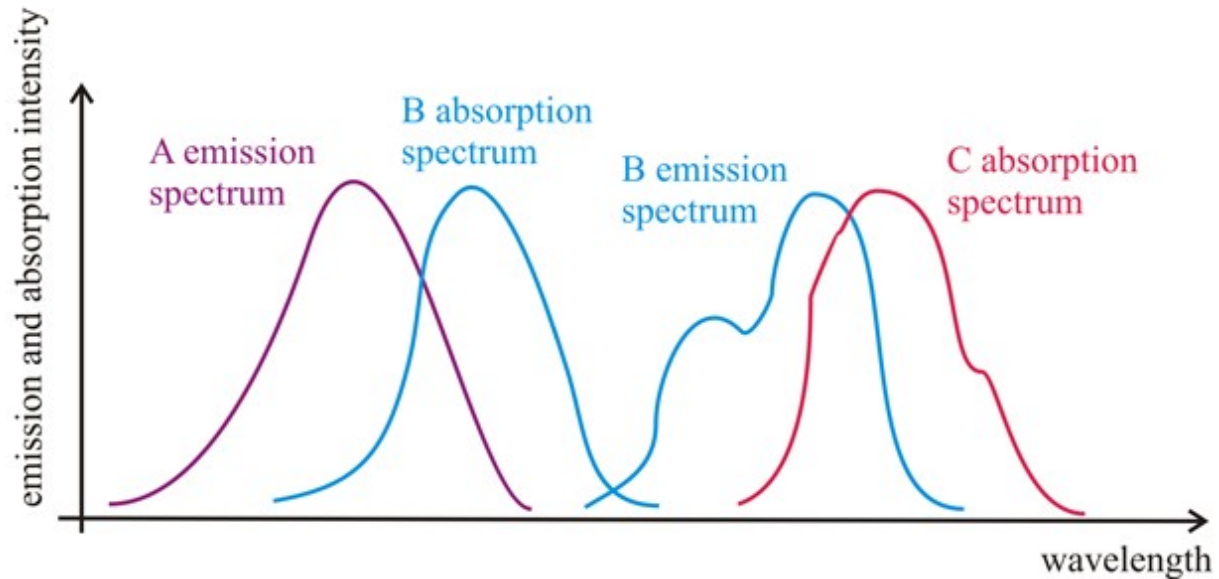
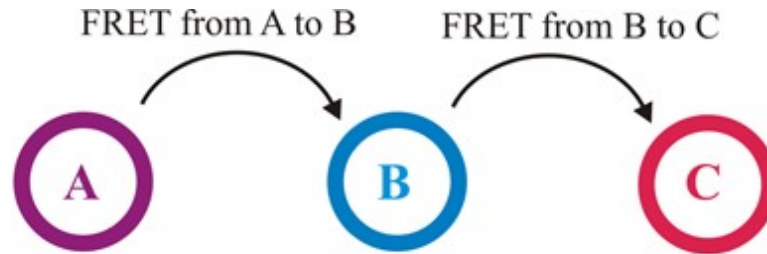
- bit '0' = brak sygnału
- bit '1' = wzbudzenie donora → FRET

Energia:

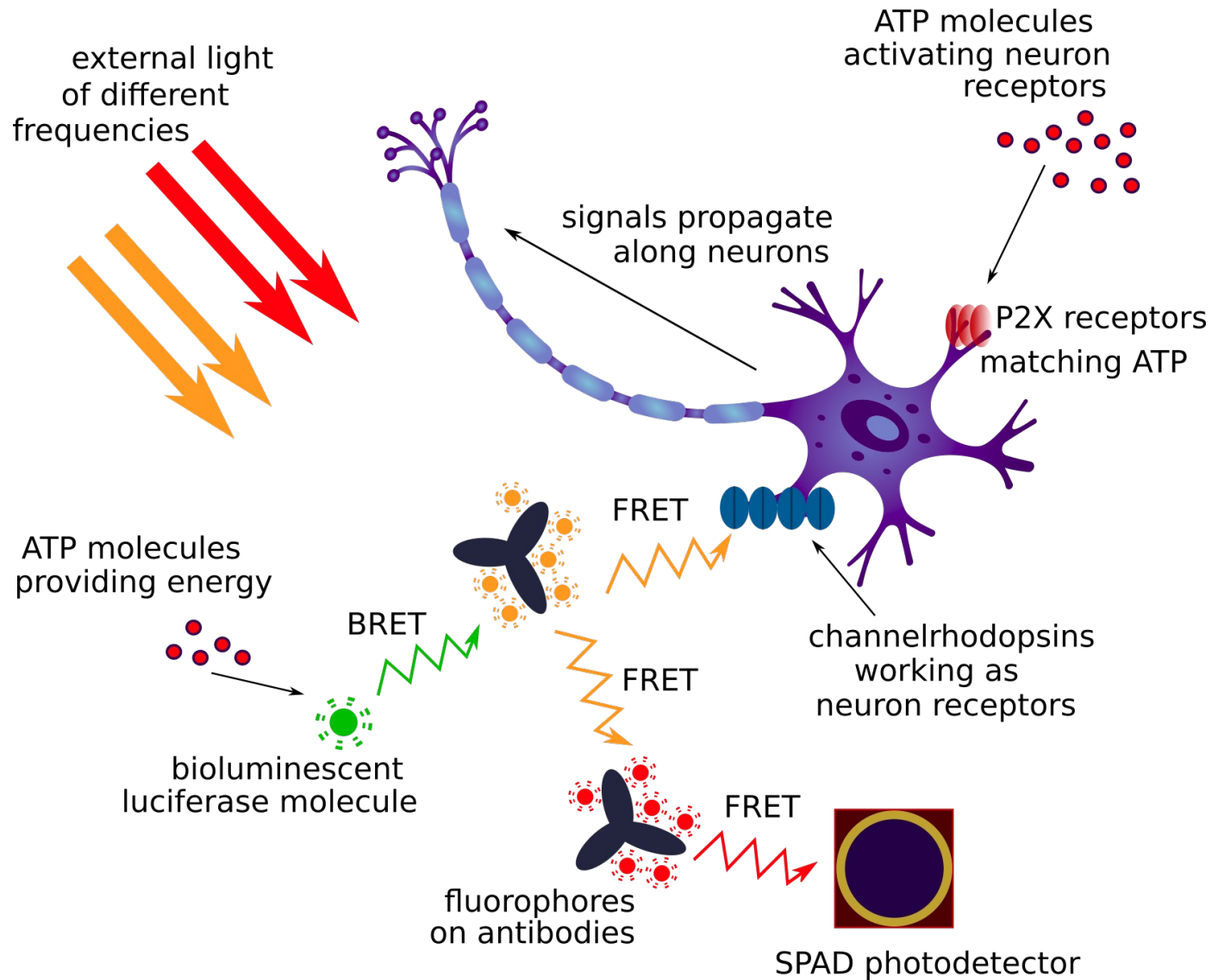
$$hf_a > hf_e > hf_{e2}$$

zasięg FRET: kilka nanometrów

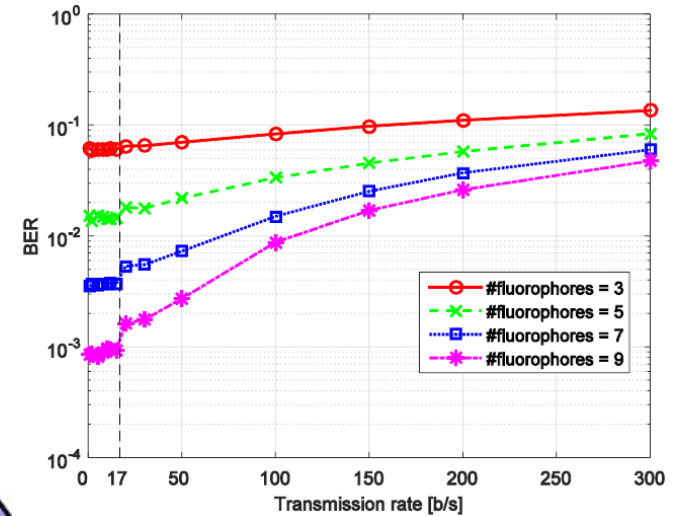
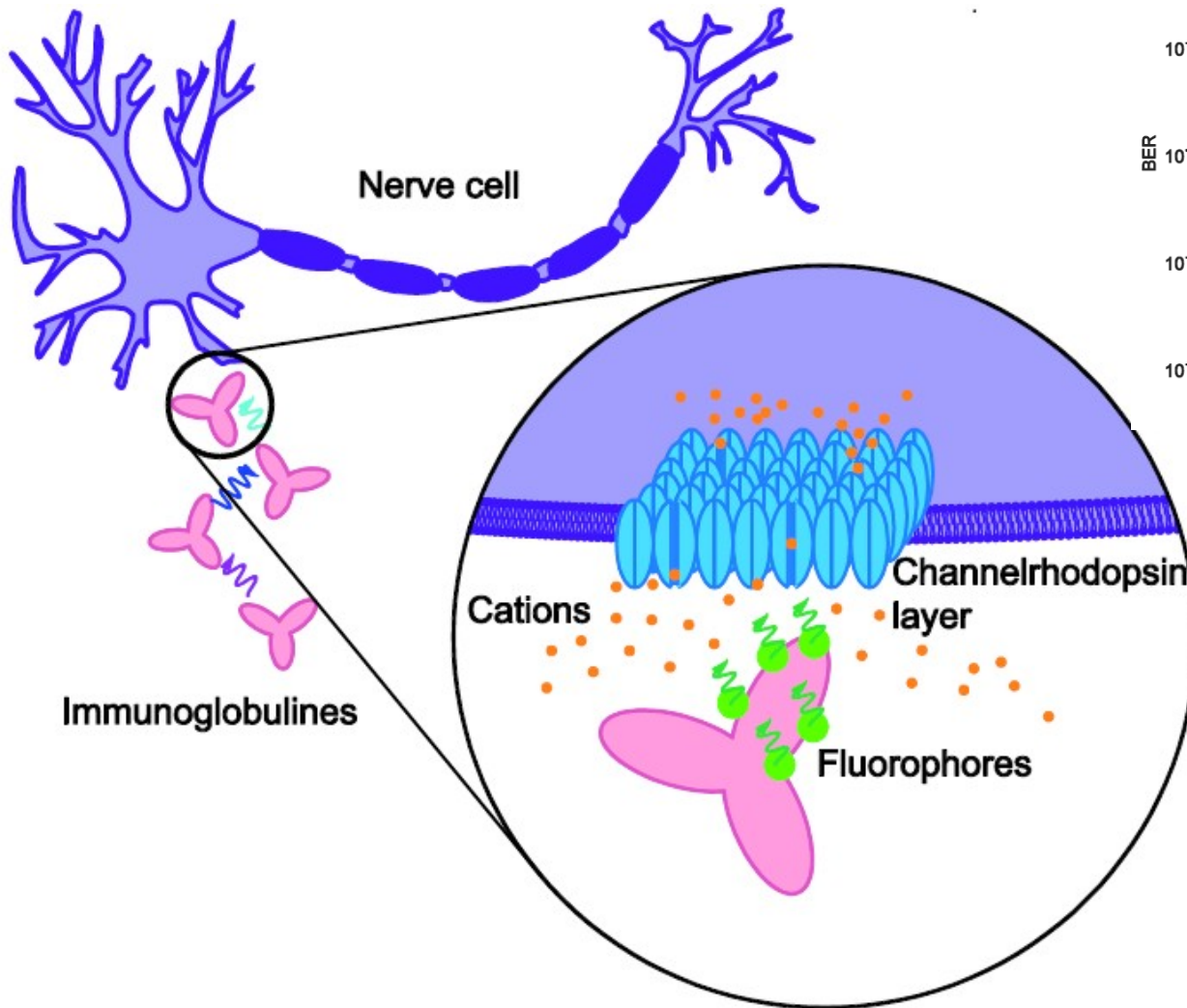
Komunikacija multi-hop FRET



Interfejsy nano-micro-macro



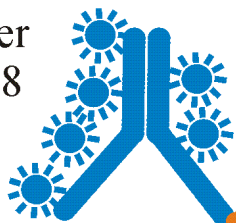
Transmisja do komórek nerwowych



Wyniki eksperymentalne

Ruting pod mikroskopem konfokalnym Leica

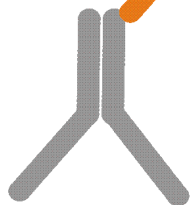
nanoreceiver
with AF 488



nanoreceiver
with AF 750

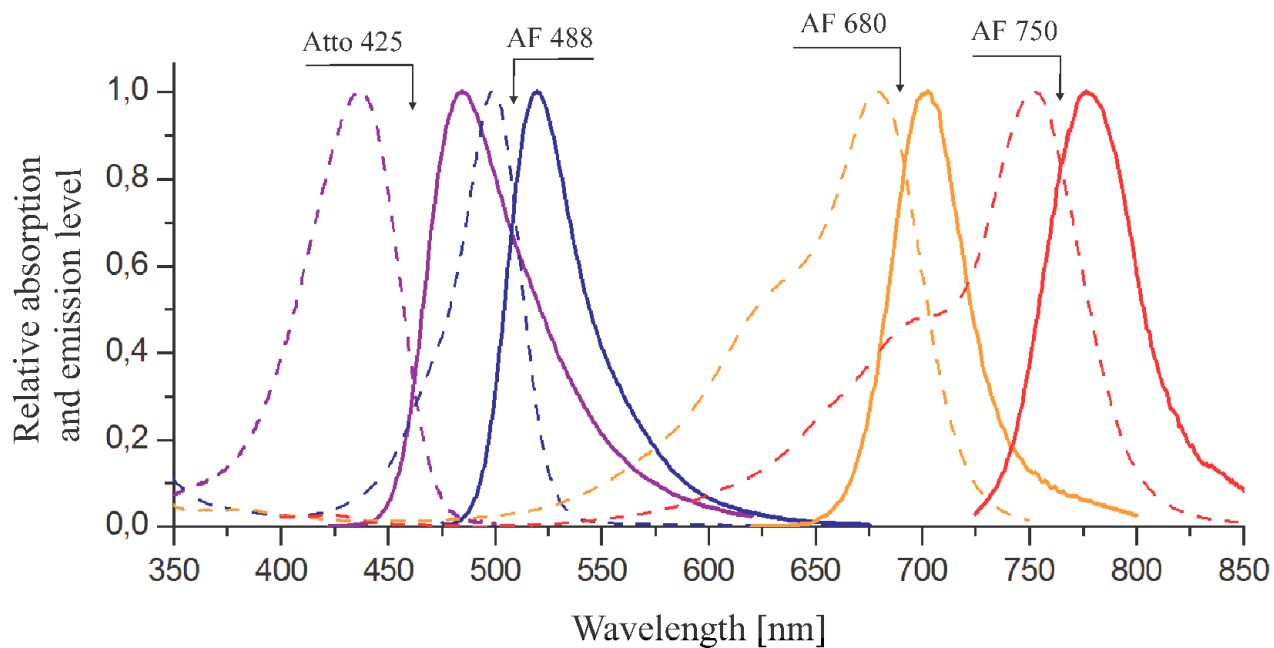
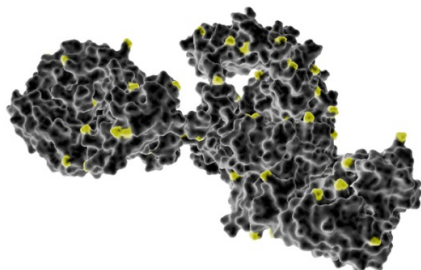


nanorouter
with Atto 425 and AF680



około 10^8 nanosieci

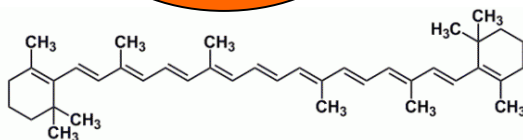
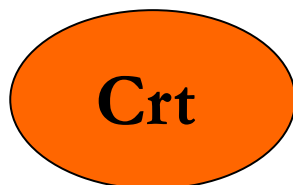
antyciała w eksperymencie:
Immunoglobulina G



Nano-komunikacja w strukturach fotosyntetycznych

światło

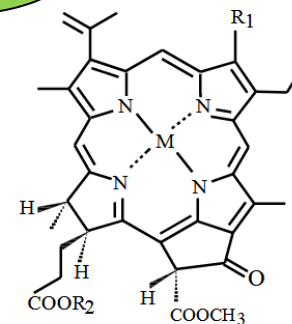
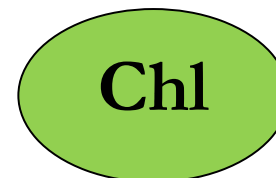
beta-carotene:



FRET



chlorophyll-a:



elektrony



Zalety:

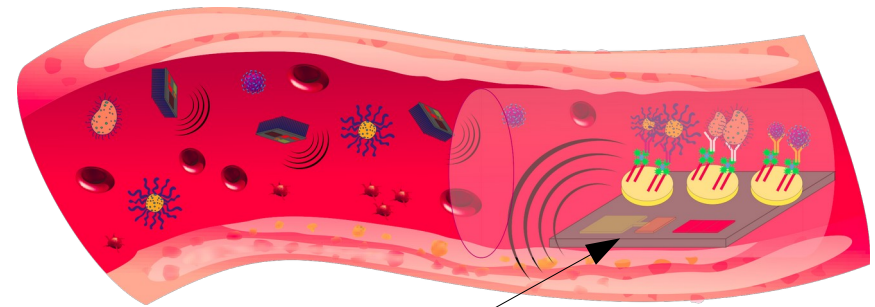
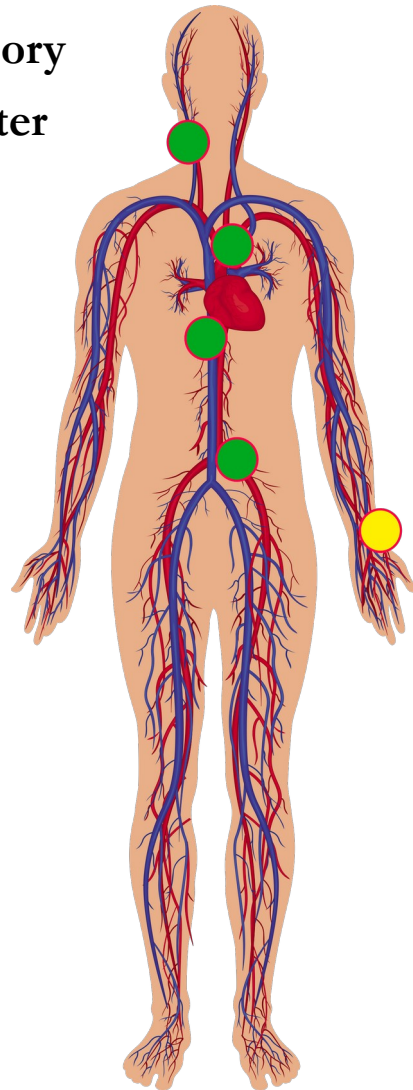
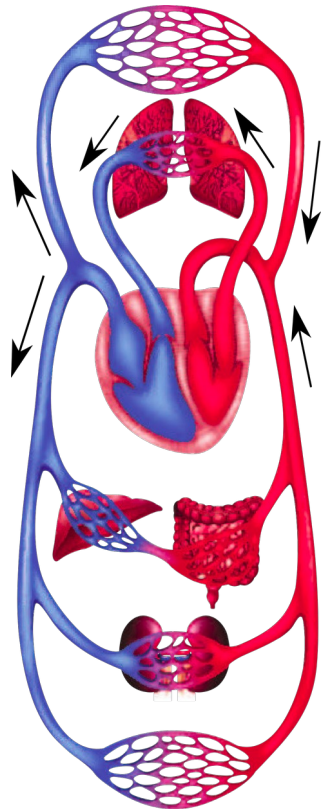
- zasilanie energią słoneczną/światłem
- **bio-kompatybilność**
- konwersja FRET → elektrony
- super szybkie (ps) i super energo-wydajne

Zastosowania medyczne

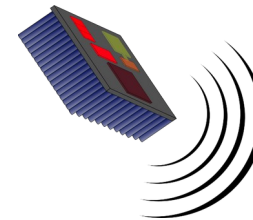
Krwioobieg jako medium dla sieci nano-maszyn

● - bio-sensory

● - nano-ruter



bio-sensor



- nano-maszyna
płynąca w krwioobiegu

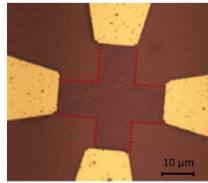
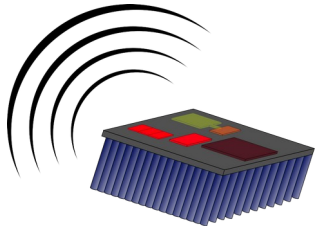
- pasmo: 0.1-10 THz
- zasięg komunikacji: 1 mm
- częstotliwość ładowania: 1 Hz
- całkowita moc: ~ 1 pW
- transmisja ramek: 64 bits/64 μ s
(raz na sekundę)

- S. Canovas-Carrasco, R. Asorey-Cacheda, A.J. Garcia-Sanchez, J. Garcia-Haro, K. Wojcik, P. Kulakowski, Understanding the Applicability of Terahertz Flow-Guided Nano-Networks for Medical Applications, IEEE Access, 2020.

- R. Asorey-Cacheda, L.M. Correia, C. Garcia-Pardo, K. Wojcik, K. Turbic, P. Kulakowski, Bridging Nano and Body Area Networks: A Full Architecture for Cardiovascular Health Applications, IEEE Internet of Things Journal, 2023.

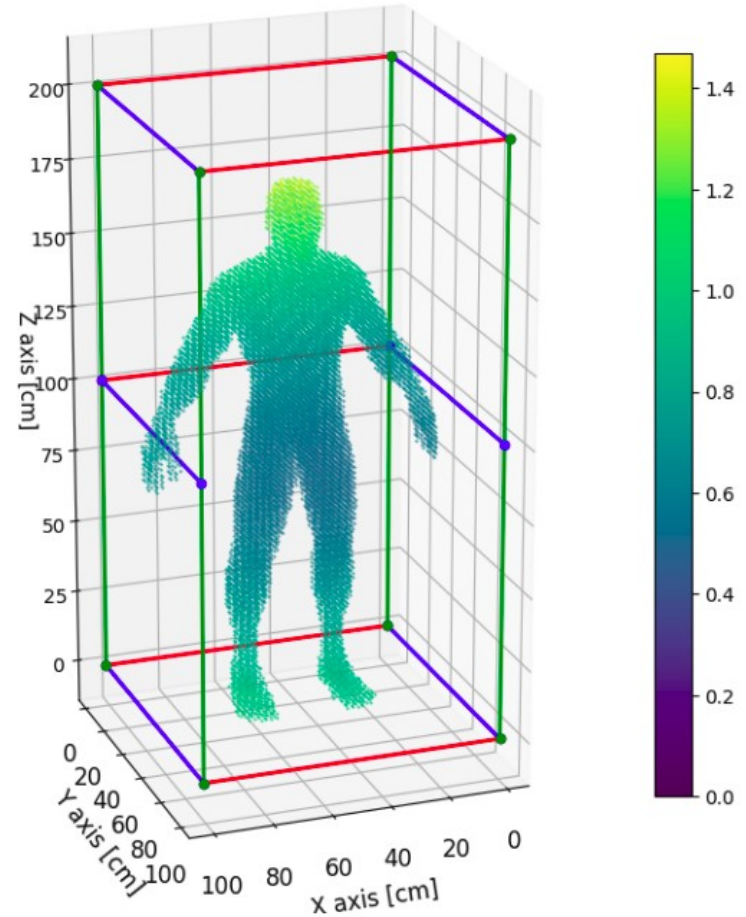
Lokalizacja nano-maszyn

- 15 przewodów z prądem stałym generujących pole magnetyczne
- mikro-magnetometry, dokładność 1%, mierzące pole do 120 mT



Mikro-magnetometr,
obszar aktywny: 10 μm

- lokalizacja: ranging + multilateration
- model pola magnetycznego Ziemi
- model ciała człowieka: 17 381 punktów



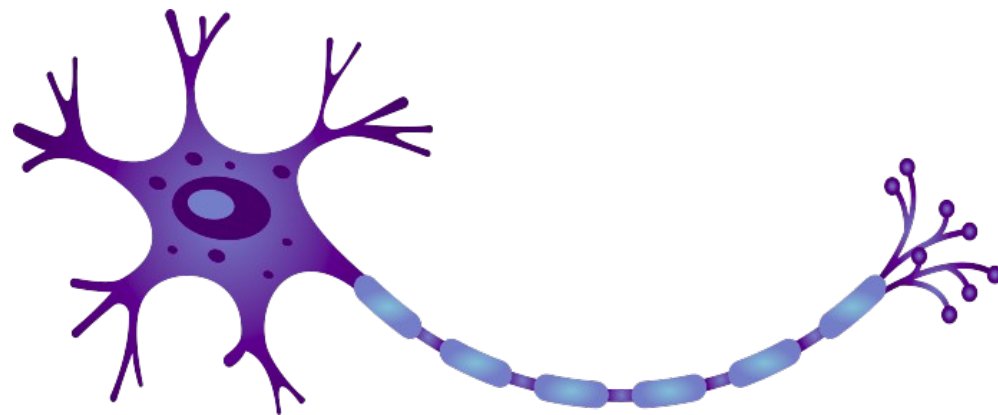
średni błąd lokalizacji: **7.4 mm**

K. Skos, J.M. Jornet, P. Kulakowski, Magnetic field localization for in-body nano-communication medical systems, 5th COST INTERACT Meeting, Barcelona May 2023.

D. Izci, C. Dale, N. Keegan, J. Hedley, The construction of a graphene hall effect magnetometer, IEEE Sensors Journal, 2018.

Podsumowanie – co warto zapamiętać

1. Nanokomunikacja: temat bardzo aktualny, wymagający współpracy światów **BIO** i **TELE**
2. Komunikacja **terahercowa**, m.in. wykorzystaniem grafenu: raczej dla skali **MIKRO**
3. Komunikacja **molekularna** (*bio-inspired*): dla skali nano, ale wiąże się z bardzo dużymi opóźnieniami
4. Zjawisko **FRET**: szybkie, na małe odległości, wymagany **MIMO-FRET**
5. Zastosowania: **nano-medycyna**, komunikacja nano-maszyn wewnątrz ciała ludzkiego
6. Nanokomunikacja to wciąż **badania podstawowe**, potrzebujemy więcej badań eksperymentalnych



Dziękuję bardzo!

