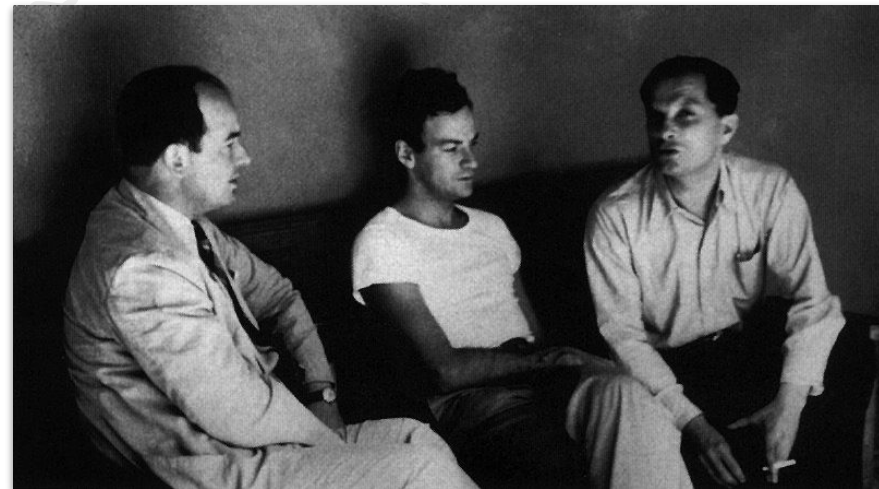


Automat komórkowy w modelowaniu i symulacji

dr inż. Paweł Topa
Katedra Informatyki
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Automat komórkowy - początek

- John von Neumann, Stanisław Ulam (koniec lat 40tych XX wieku)
- Von Neumann, J. and A. W. Burks (1966). *Theory of self-reproducing automata*. Urbana, University of Illinois Press.
- *What kind of logical organization is sufficient for an automaton to be able to reproduce itself?*
- **Uniwersalny konstruktor von Neumanna:** automat komórkowy (reguły, konfiguracji początkowej), który na podstawie zadanej informacji będzie powielać sam siebie.

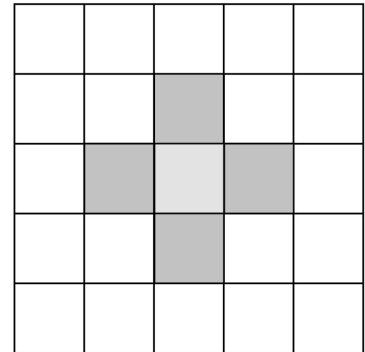


Automat komórkowy

jedyna prawdziwa wersja

- Regularna siatka kartezjańska
- Każdy węzeł zawiera automat skończony (ang. *Finite State Automata*)
 - FSA w każdej chwili znajduje się w jednym z możliwych stanów
 - Zbiór stanów jest **dyskretny i skończony**
 - Zmiana stanu wszystkich FSA jest realizowana jest przy pomocy **tej samej funkcji/reguły przejścia** (ang. *transition*)
 - Funkcje przejścia aplikowane są do wszystkich FSA w jednej chwili (**synchronicznie**).
- Każdy automat posiada możliwość odczytania stanu czterech **najbliższych sąsiadów** (tzw. sąsiedztwo von Neumanna)

von Neumann



Automat komórkowy Codda

- Uniwersalny konstruktor von Neumanna miał 29 stanów
- Edgar F. Codd w 1968 zaproponował automat z 8 stanami

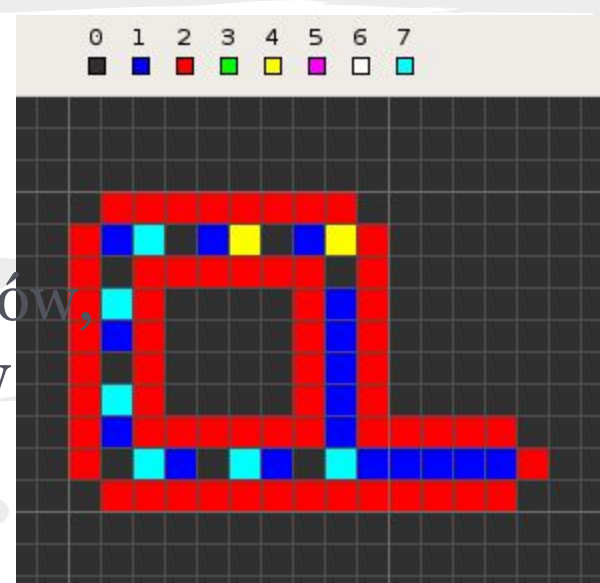
What kind of logical organization is necessary for an automaton to be able to reproduce itself?

- Edwin R. Banks w 1971 zaproponował automat z 4 stanami
- Automaty komórkowe realizujące samoreplikację wymagały ogromnych populacji ($> 100\ 000$ komórek) i ogromnej liczby kroków ($> 10^8$)

Automaty komórkowe

Chrisa Langtona

- Pętla Langtona (*Langton's loop*): 8 stanów, 86 komórek, okres replikacji 151 kroków
- Mrówka Langtona
 - komórki mogą być w stanie 0 (czarny) lub 1 biały
 - poprzez siatkę wędruje mrówka:
 - w komórce 0 skręca 90 w lewo, zmienia stan komórki i idzie do przodu o jedną kratkę
 - w komórce 1 skręca 90 w prawo, zmienia stan komórki i idzie do przodu o jedną kratkę
 - Gajardo et al. (2000) w *Complexity of Langton's ant* udowodnił, że uniwersalność tej reguły to znaczy, że **może zamodelować uniwersalną maszynę Turinga** (czyli wykonać dowolne obliczenie)



Game of Life (John Conway)

- Martin Gardner, *Scientific American* (1974)
- Komórka (FSA) ma dwa stany: żywy lub martwy
- Komórka martwa ożywa gdy:
 - ma trzech żywych sąsiadów
- Komórka żywa umiera gdy:
 - ma mniej niż dwóch żywych sąsiadów
 - ma więcej niż trzech żywych sąsiadów
- Komórka żywa nie zmienia stany gdy ma dwóch lub trzech sąsiadów

Stephen Wolfram i jego automaty komórkowe 1D

- Stephen Wolfram... (tak ten od Mathematici)
- Automat Komórkowy 1D (tzw. elementarny)

- linia komórek

0	1	1	0	0	1	0	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
- stan 0 / 1
- 256 reguł, np. reguła $90=0101010_{(2)}$

111	110	101	100	011	010	001	001
0	1	0	1	1	0	1	0

- <http://mathworld.wolfram.com/ElementaryCellularAutomaton.html>
- *A new kind of science (2002) Książka on-line*
(<https://www.wolframscience.com/nks/>)

Automat Komórkowy on-line

Elementary Cellular Automata in HTML5

Canvas

Symulator Golly <http://golly.sourceforge.net/>

Klasyfikacja Wolframa

Oparta o długookresowe obserwacje ewolucji automatu rozpoczynającego od stanu nieuporządkowanego

1. Klasa I - niezależnie od stanu początkowego automat dochodzi zawsze do tego samego stanu końcowego
2. Klasa II - niezależnie dochodzą zawsze do pewnej stabilnej lub okresowej konfiguracji
3. Klasa III - zachowanie jest cały czas chaotyczne
4. Klasa IV - produkuje złożone wzorce, czasami długookresowe

Klasyfikacje przy pomocy badania reguł

- Wady klasyfikacji Wolframa
- Klasyfikacja na podstawie reguł λ
- Grafy de Brujina
- Stabilność rozwiązań równania iteracyjnego
- Równania ewolucji

prof. Krzysztof Malarz, AGH
<http://www.zis.agh.edu.pl/ak/>

Po co nam te klasyfikacje?

Klasyfikacja CA umożliwi także klasyfikację procesów dynamicznych

Co możemy zmienić w Automacie Komórkowym?

- dyskretny zbiór stanów \rightarrow ciągły zbiór stanów (liczby rzeczywiste, zmiennoprzecinkowe)
- siatka kartezjańska \rightarrow siatka heksagonalna, siatka nieregularna
- synchroniczna aktualizacja stanów \rightarrow asynchroniczna aktualizacja
- sąsiedztwo \rightarrow sąsiedztwo Moora, Margoulusa, ...
- promień sąsiedztwa 1 \rightarrow promień sąsiedztwa > 1

Coupled Map Lattices

- Zaproponowane przez Kaneko w 1983/84
 - dyskretna siatka
 - zmienne stanu wyrażone liczbami rzeczywistymi
 - ewolucja na podstawie równania logistycznego
- Automat komórkowy ma lepsze PR

Modele oparte o Automaty Komórkowe

- Model reakcji Żabotyńskiego-Bielousowa (oscylator chemiczny)
- Model Isinga, model ferromagnetyka, model przejść fazowych
- Model nawiewania śniegu by Chopard
- Model przepływu lawy by DiGregorio et al.
- Model ruchu pojazdów: Nagel-Shreckenberg (automat 184 Wolframa również symuluje ruch drogowy)
- Model dynamiki pieszych (ewakuacja)
- Modele procesów urbanistycznych
- Kryptografia

Modelowanie z wykorzystaniem automatu komórkowego

- Modelowanie zjawisk naturalnych: reakcje chemiczne, pożar lasu, przepływ lawy, powstawanie zasp śnieżnych, ruch pieszych, zachowania społeczne, dynamika populacji etc
- Inne: kryptografia, szeregowanie zadań, generowanie liczb pseudolosowych, grafika komputerowa
- *Konferencja ACRI, Journal of Cellular Automata*

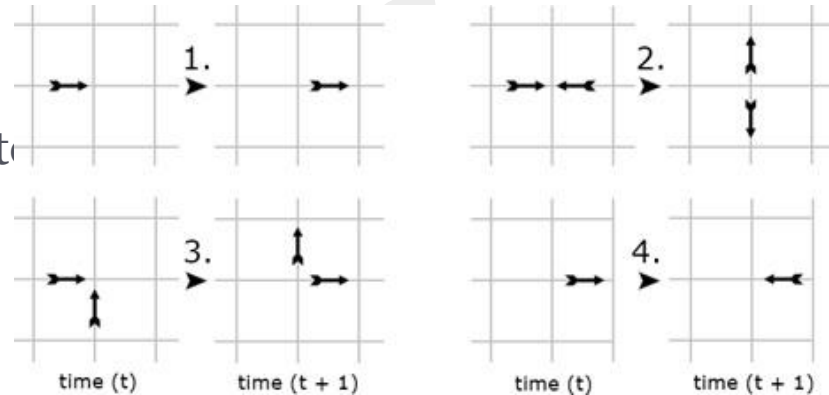
Automat komórkowy w publikacjach

	Wszystko	2017	2018
Google Scholar	159 000	8340	4490
Scopus	20 073	1182	724
Web of Science	6370	264	165

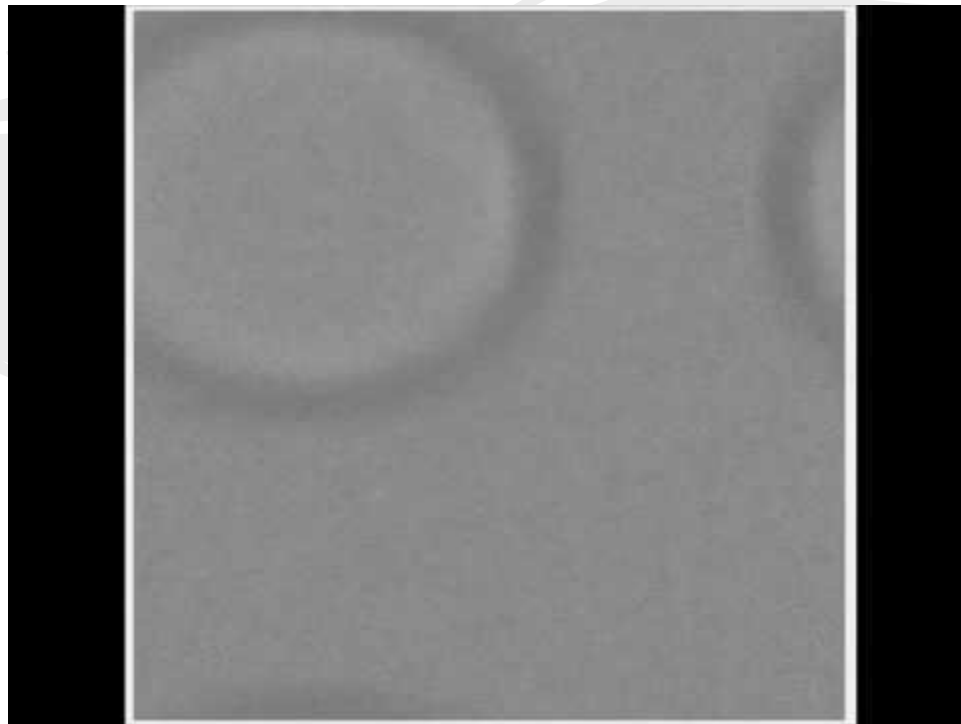
Stan na wrzesień 2018

Gaz siatkowy i metody pochodne

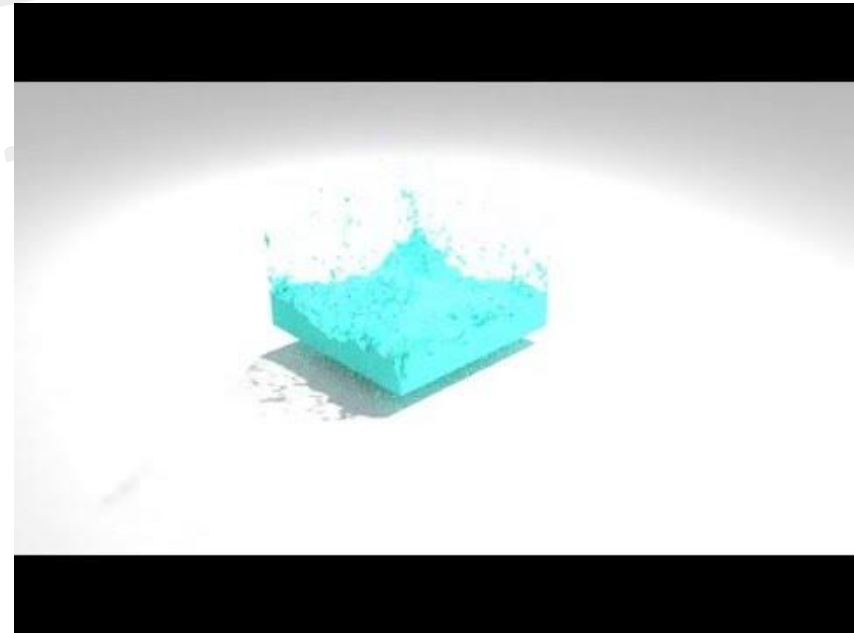
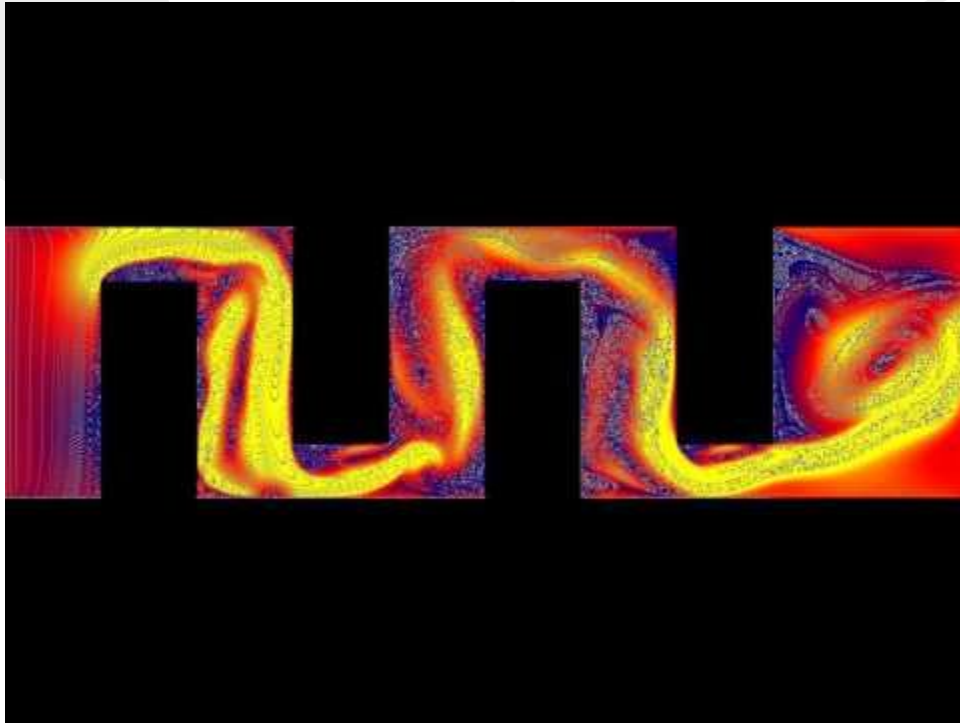
- *Lattice gas automaton, lattice gas cellular automata*, HPP CA, 1973 (Hardy, Pomeau, de Pazzis)
- FHP (Frisch, Hasslacher, Pomeau) - siatka heksagonalna
- gaz siatkowy Boltzmannna
 - zamiast cząstki, funkcja rozkładu gęstości
 - zamiast zderzeń sprężystych, operacje kolizyjne



Symulacja metodą FHP

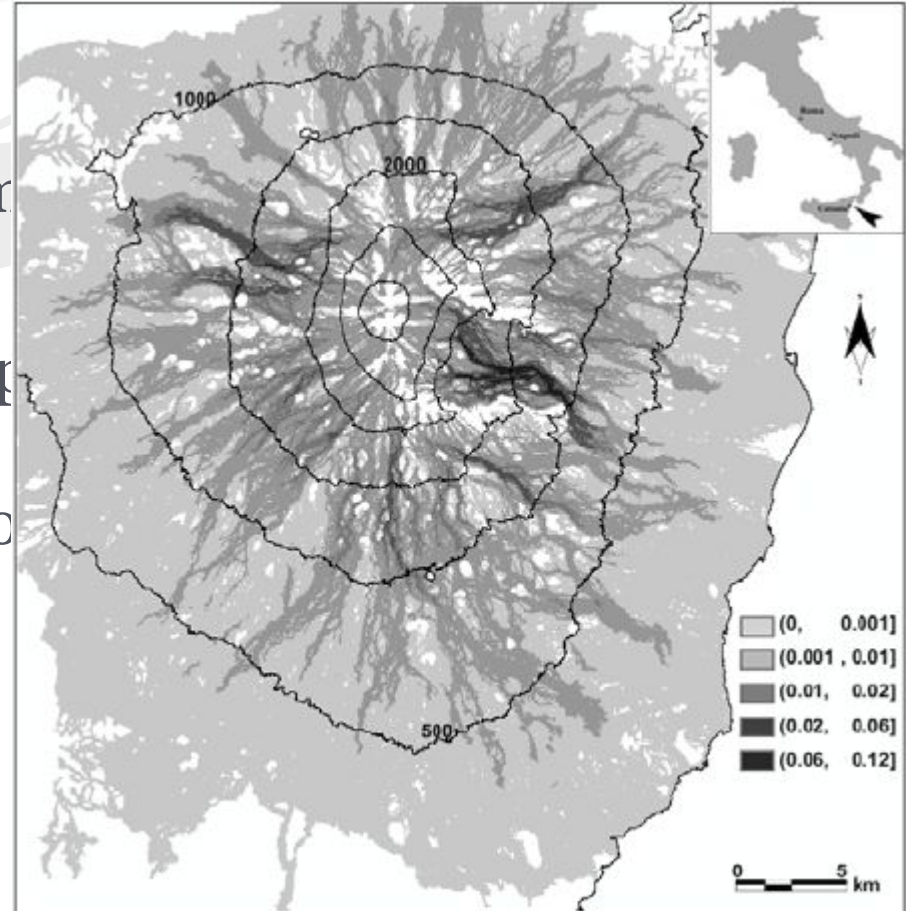


Symulacja metodą LBM (Lattice Boltzmann Method)



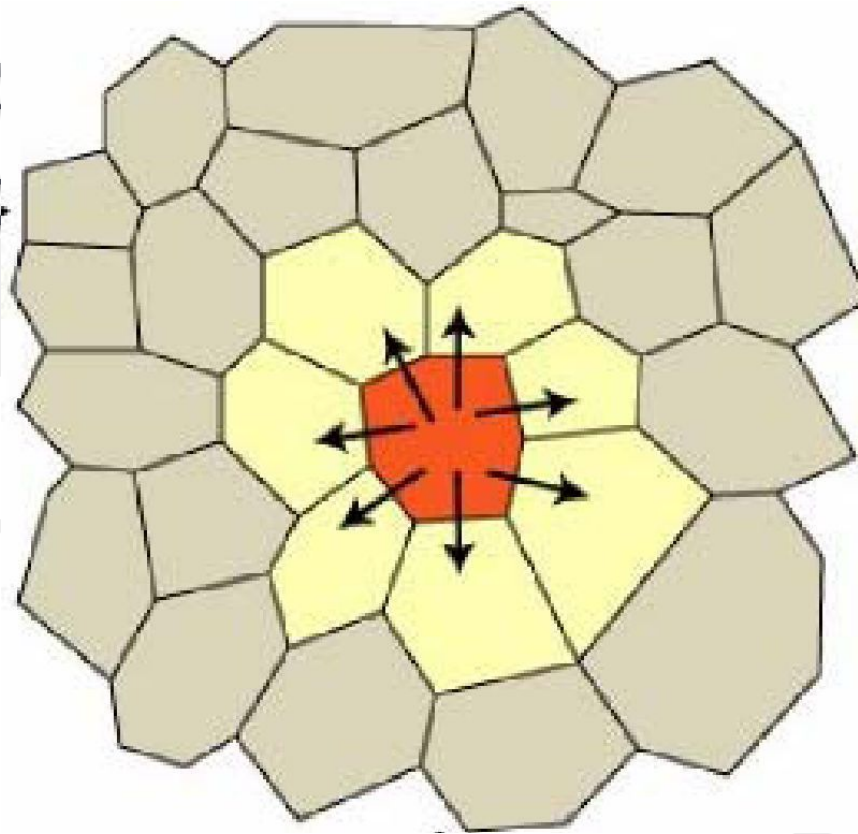
Automat komórkowy z ciągłym zbiorem stanów

- Wolfram określa je mianem *automata*
- Modelowanie przepływów p
 - lawa (Di Gregorio et al.
 - spływy błotne (Di Grego
 - woda (Topa, 2002)



Automat komórkowy nie-czworokątną siatką

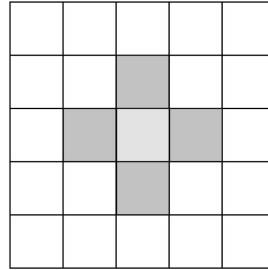
- Siatka heksagonalna
 - metody gazu siatkowego
- Siatka nieregularna
 - diagramy Voronoi
- Siatki dynamiczne
- Siatki trójwymiarowe



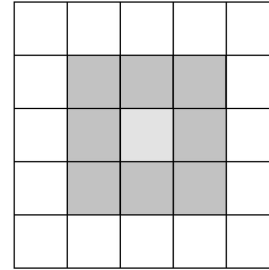
Sąsiedztwo automatu komórkowego

- Kształt sąsiedztwa

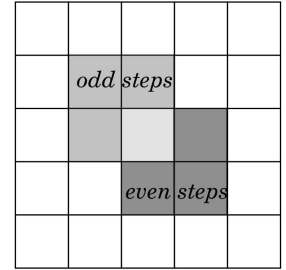
von Neumann



Moore

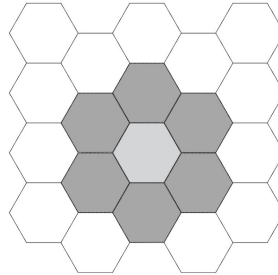


Margolus

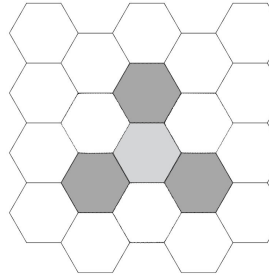


- Zasięg sąsiedztwa

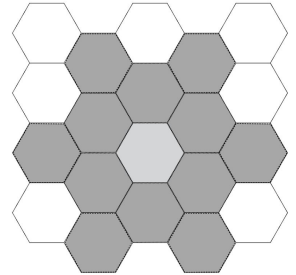
Honeycomb



Tripod



Hexagonal Star



Asynchroniczna aktualizacja

- Rzeczy nie zdarzają się w tym samym czasie
- Trudniejsza w implementacji
 - schematy aktualizacji
- Problemy z określeniem dynamiki automatu
- Stosowane raczej w przypadkach gdy istotą zjawiska jest asynchroniczność

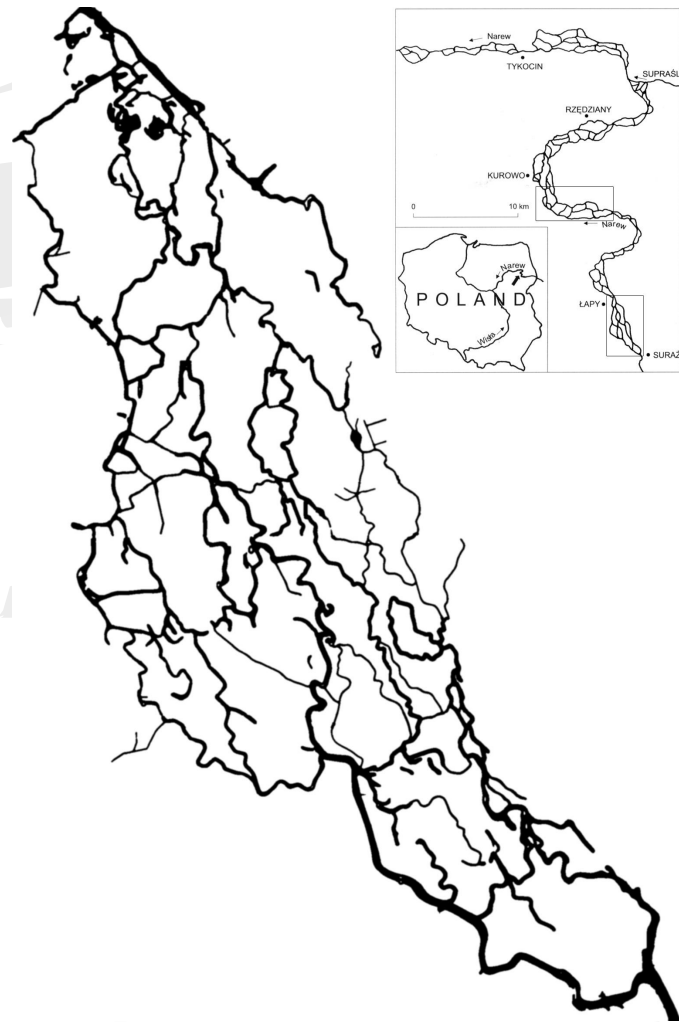
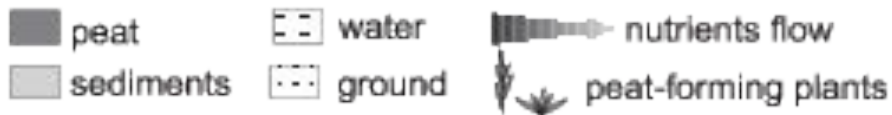
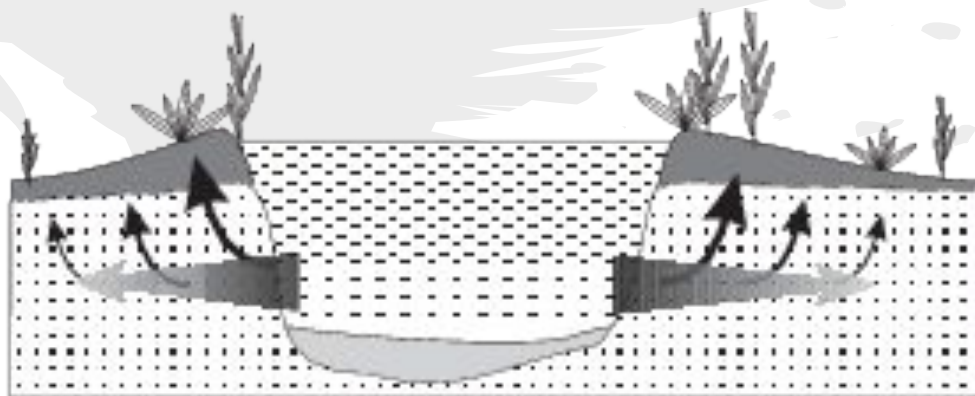
Zalety automatu komórkowego

- Proste struktury danych
- Łatwe programowanie - reguły lokalnych interakcji
- Naturalna równoległość
- Naturalna masywna równoległość: GPU
- Zaskakująco nietrywialne zachowanie: systemy złożone

A new kind of science?

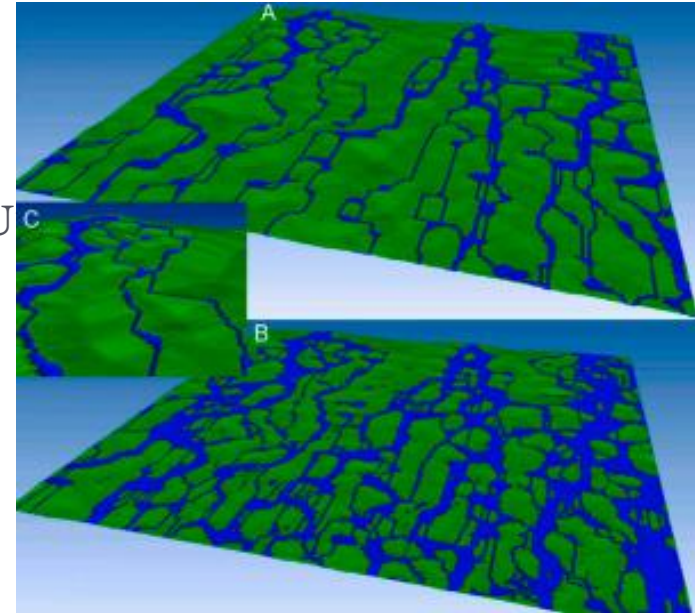
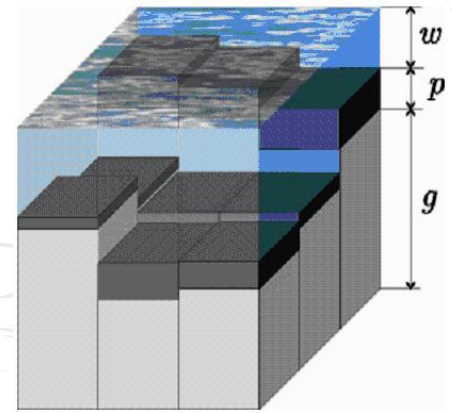
- Czy CA mogą wszystko?
 - skala czasowa i przestrzenna
 - weryfikacja wyników
- Główny obszar zastosowań:
modelowanie zjawisk/systemów złożonych z wielu obiektów wchodzących z sobą w lokalne interakcje

Rzeka anastomozująca

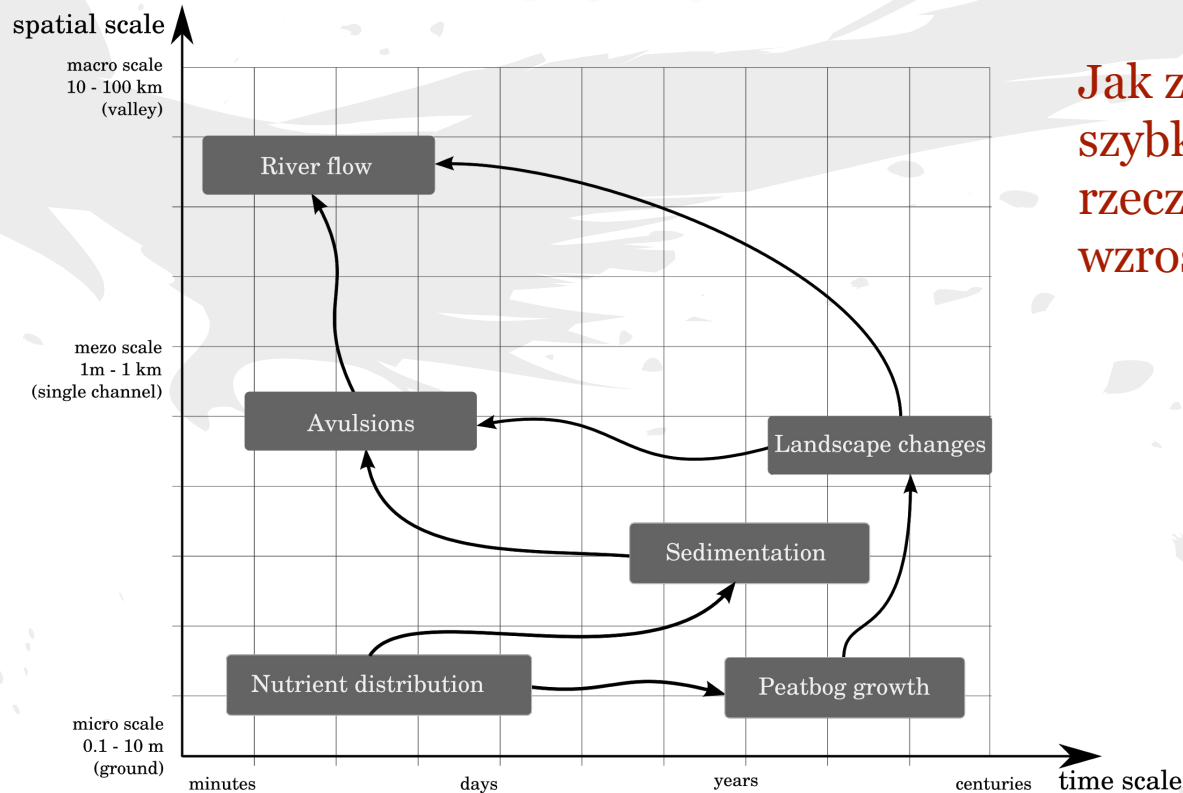


anastomozującej - podejście drobnoziarniste

- Automat komórkowy na bazie modelu przepływu lawy (Di Gregorio et al)
- Gęsta siatka CA (*fine-grained model*)
- Reguła przelewania wody między komórkami
- Implementacja dla klastra
- Implementacja dla GPU (przyspieszenie względem CPU do 1000 x)



Wieloskalowość zjawiska rzeki anastomozującej

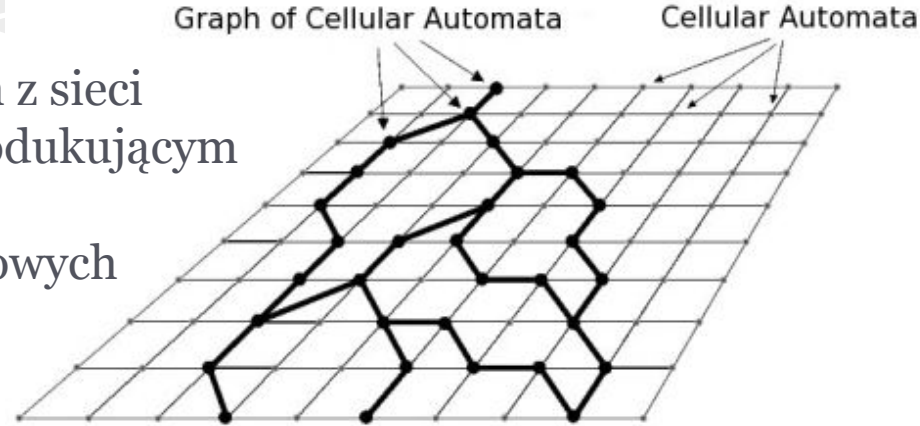


Jak zunifikować procesy szybkie (formowanie kanałów rzecznych) i wolne (wertykalny wzrost torfowiska)?

Graf (nad) automatem komórkowym

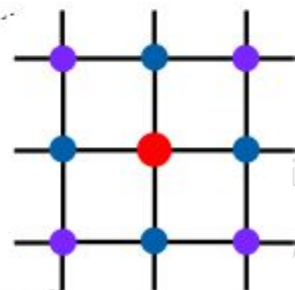
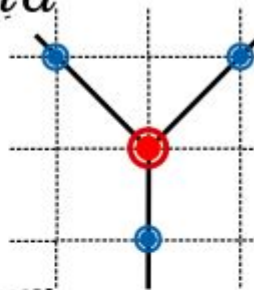
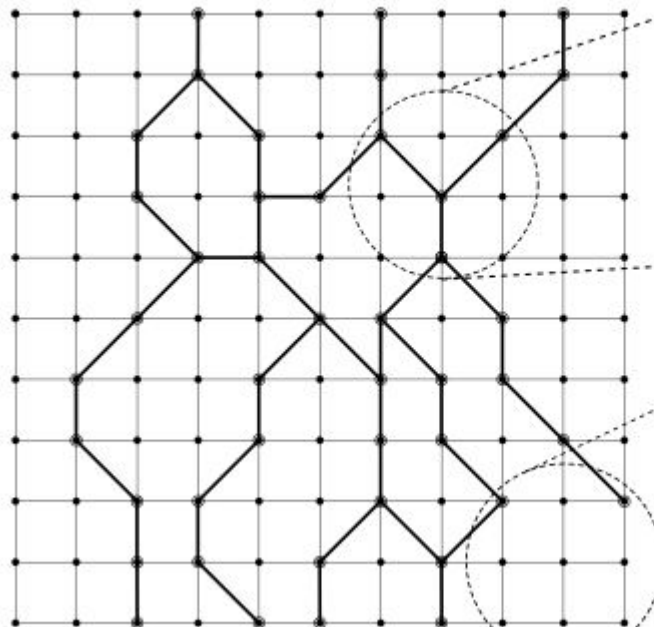
Rozszerzenia metodologii Automatu Komórkowego

- Graf Automatu Komórkowego
 - modelowanie systemów złożonych z sieci transportowej umieszczonej w produkującym lub konsumującym środowisku
 - modelowanie procesów wieloskalowych
- Dynamiczny Automat Komórkowy
 - zmienna w czasie topologia siatki lub grafu
 - reguły zmieniające się w czasie



Rozszerzony automat komórkowy

Graph over Cellular Automata



Definicja Automatu Komórkowego

$$\Lambda = \langle Z^n, G_{CA}, X_K, S, \delta \rangle$$

siatka kartezjańska 2D lub 3D

węzłach siatki automaty wielostanowe

$$= (V_{CA}, E_{CA})$$

$V_{CA} \subset Z^n$ zbiór węzłów

$E_{CA} \subset Z^n$ zbiór

krawędzi

okoliczność automatu w siatce:

$$N_i = \{a_{i-1,j}, a_{i-1,j}, a_{i-1,j}, a_{i-1,j}\}$$

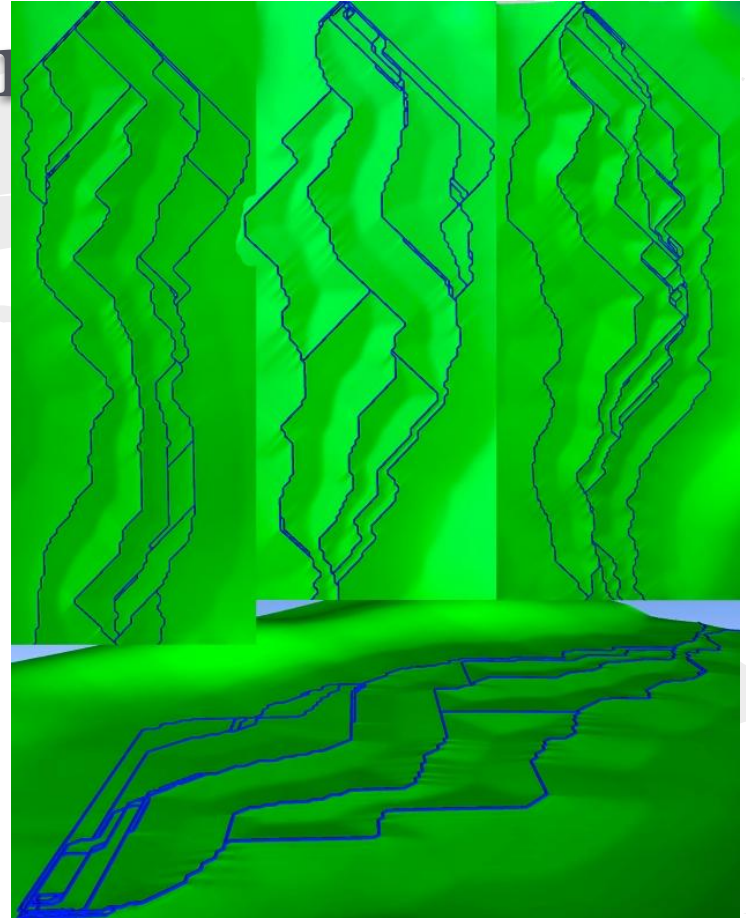
Neumanna, Moore, Margolous etc.

- $\delta = S_{grid} \times S_{graf}$
- Automat zmienia swój stan w wyniku działania zbioru reguł:

Rzeka anastomozująca - model z grafem automatu komórkowego

Graf Automatu Komórkowego:

- Regularna siatka reprezentuje dolinę rzeczną i torfowisko
 - reguły dyfuzji wody i nutrientów jak w klasycznym CA
- Graf reprezentuje sieć kanałów rzecznych
 - węzły grafu są źródłami nutrientów dla sąsiednich komórek
 - stan komórek odzwierciedla przepustowość i przepływ w kanale
 - reguły blokowania kanałów, formowania nowych kanałów etc



Model wieloskalowy z grafem automatu komórkowego

spatial scale ↑

macro scale
10-100 km
(valley)

Graph of CA

River flow

mezo scale
1m-1 km
(single channel)

Avulsion

Landscape

Cellular Automata

Sedimentation

Nutrient distribution

Peatbog growth

micro scale
0.1m-1 m
(ground)

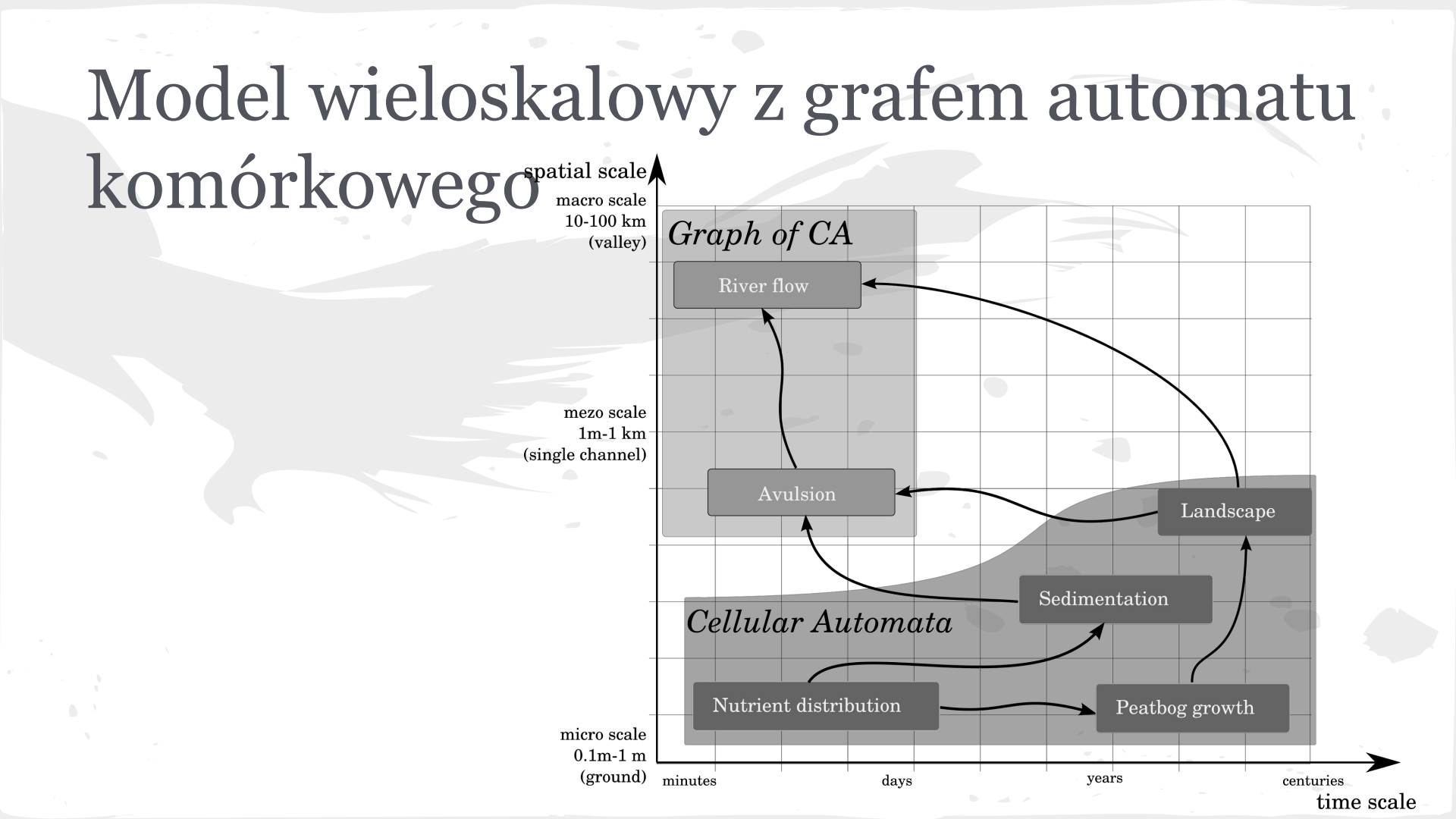
minutes

days

years

centuries

time scale →



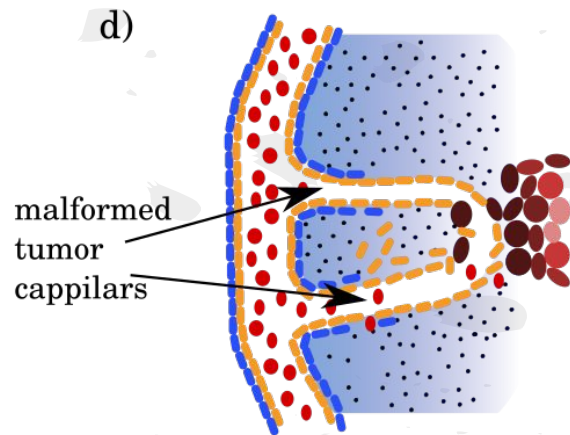
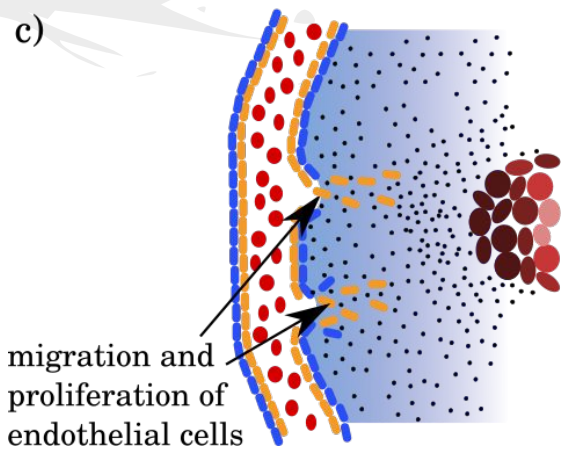
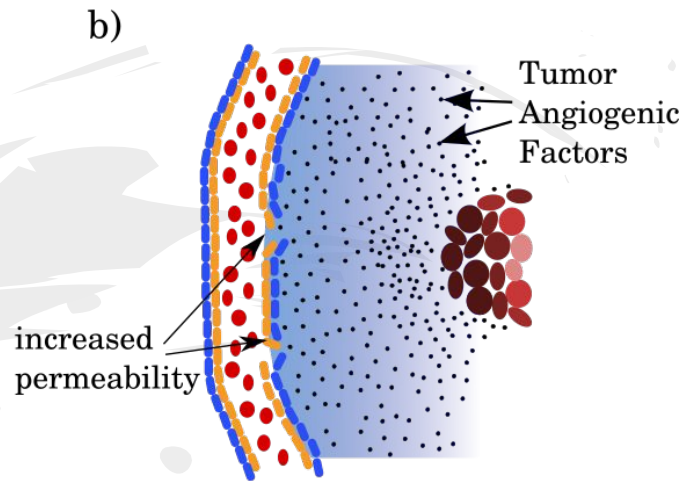
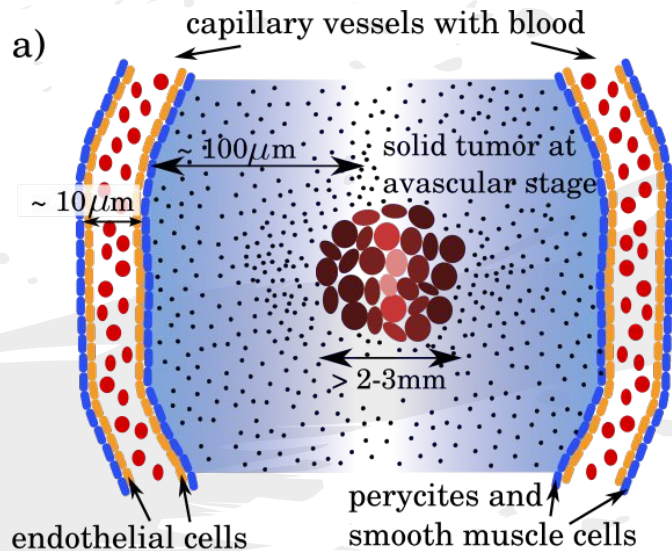
Sieć transportowa w konsumującym/produkującym środowisku

1. System złożony z dwóch oddziałujących komponentów:
 - środowisko, które konsumuje lub produkuje pewne zasoby,
 - sieć transportowa, która dostarcza lub odbiera zasoby z środowiska.
2. Zarówno środowisko jak i sieć zmieniają się w zależności od lokalnych warunków

Angiogeneza stymulowana rozwojem guza łitego

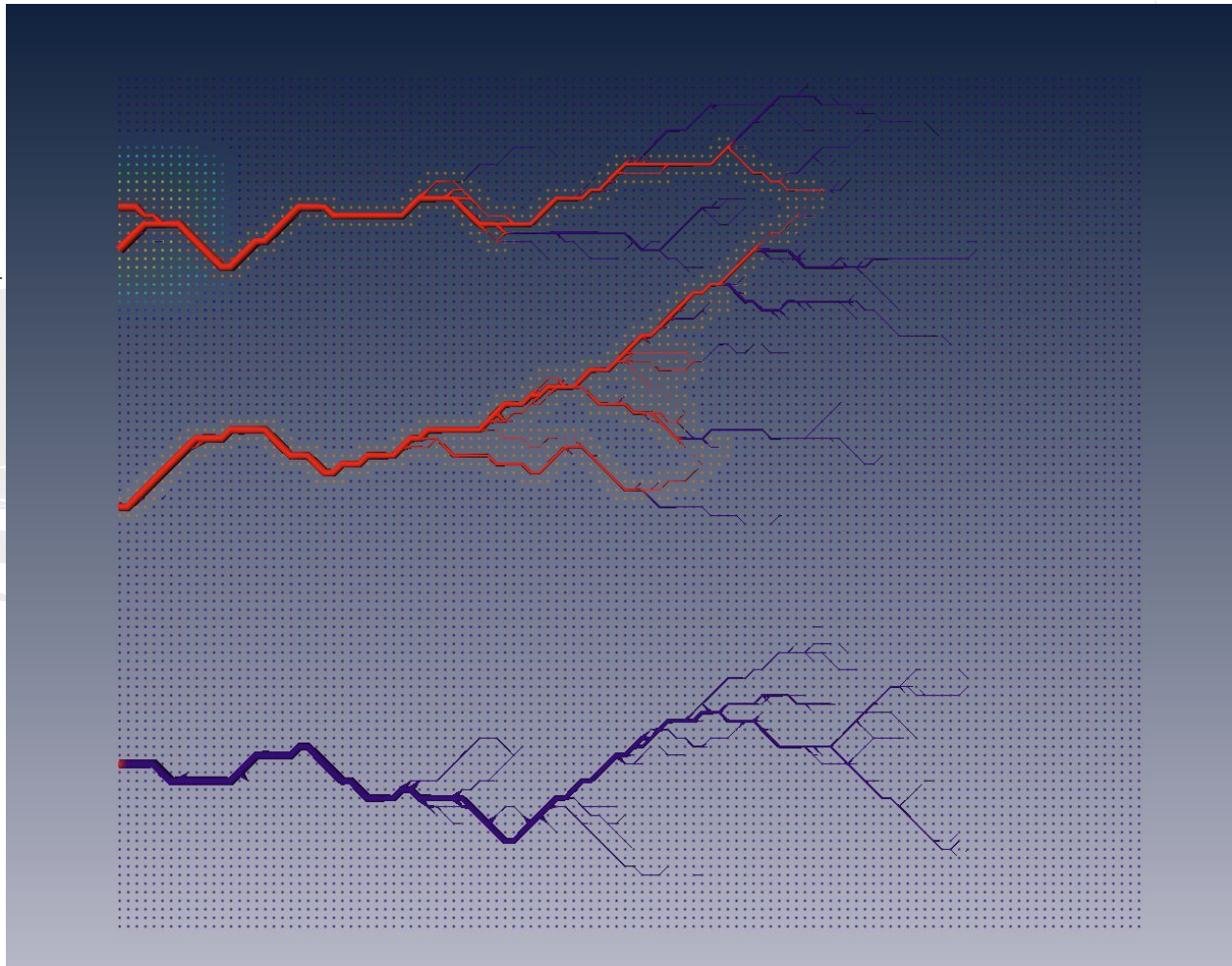
- Angiogeneza: proces formowania naczyń krwionośnych
- Rosnący guz łity (tumor) wymusza formowanie nowych naczyń, które dostarczą mu tlenu i substancji odżywczych
- Strategie terapeutyczne:
 - jeśli wstrzymamy angiogenezę to zagłodziemy „drania”
 - jeśli pomożemy w formowaniu to nowe naczynia lepiej dostarczą lekarstwa do komórek rakowych

Tumor Induced Angiogenesis

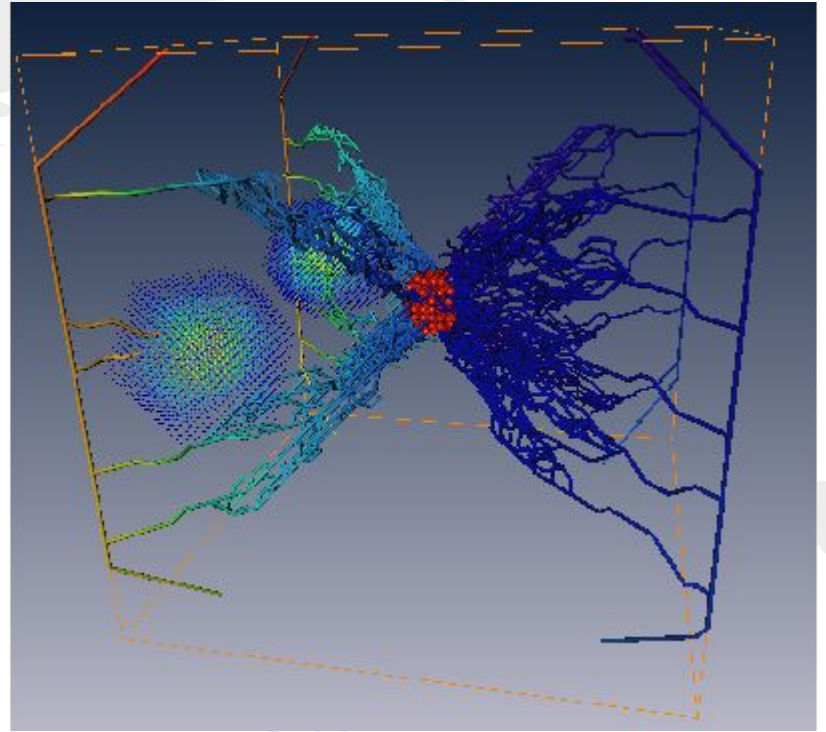
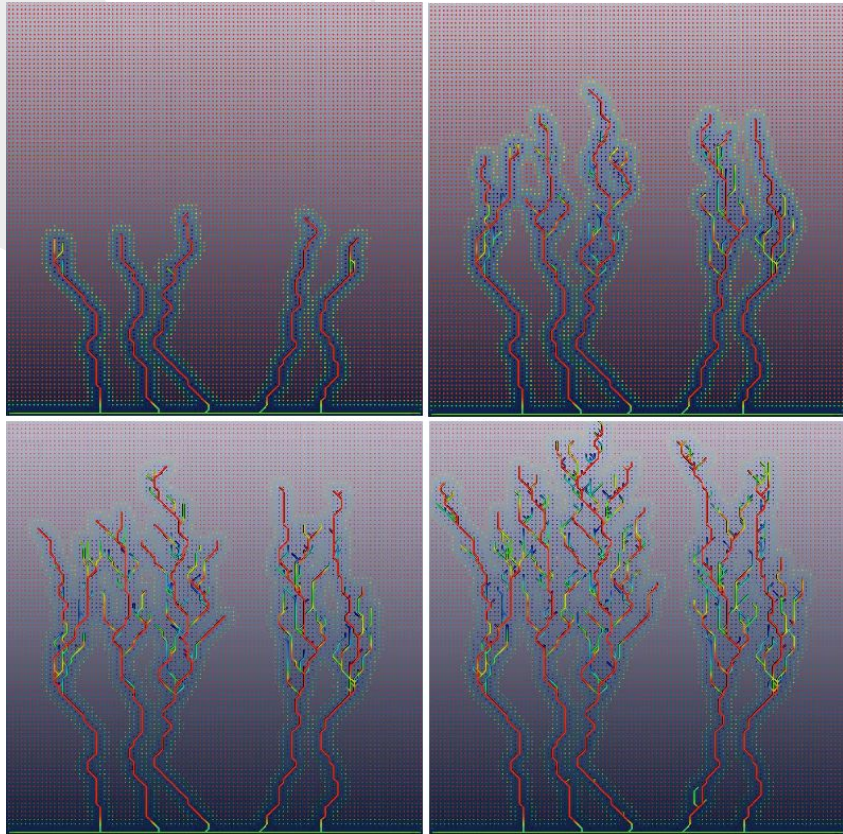


Model TIA

- Dynamiczny system
 - Sieć transportowa
 - Konsumujące (i produkujące) środowisko

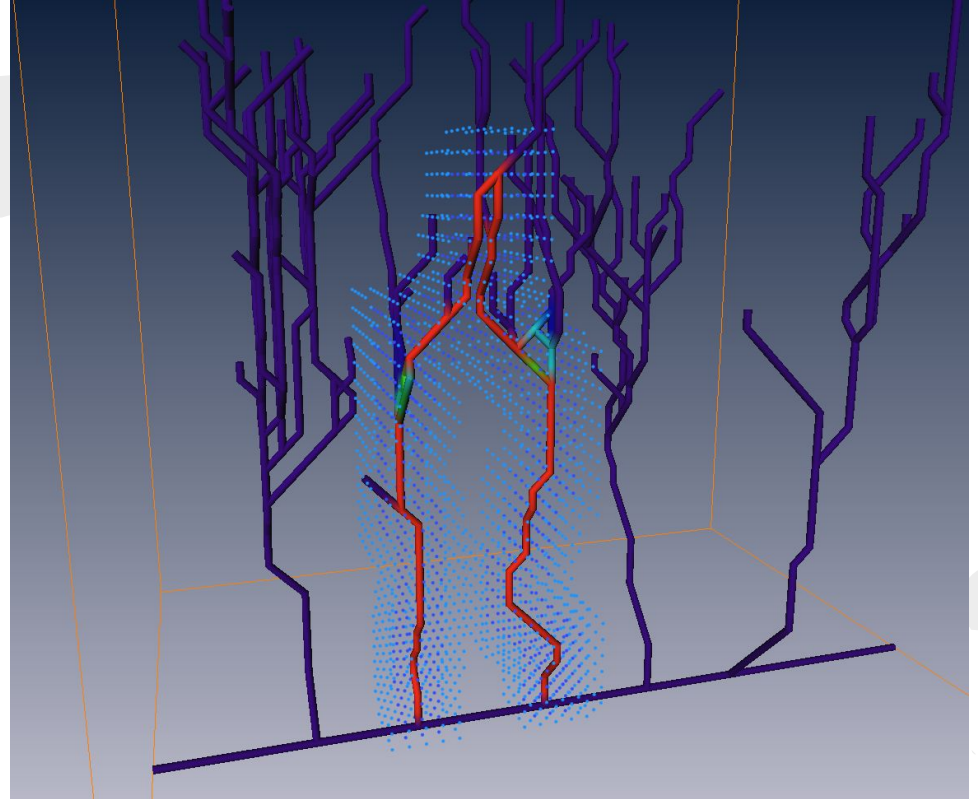
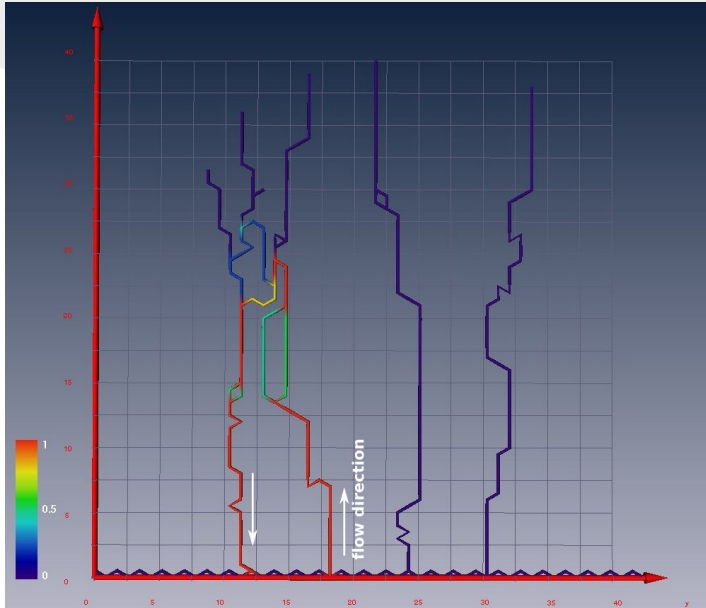


Model TIA



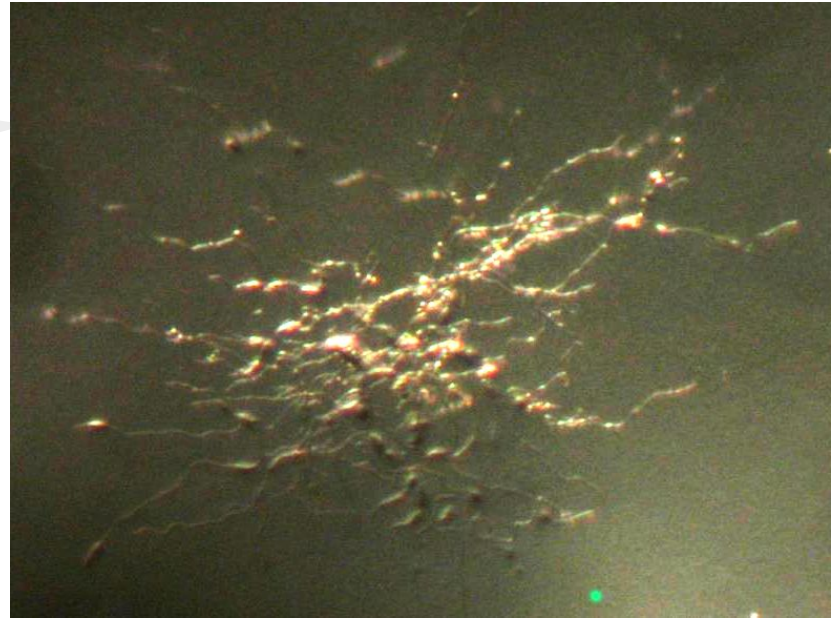
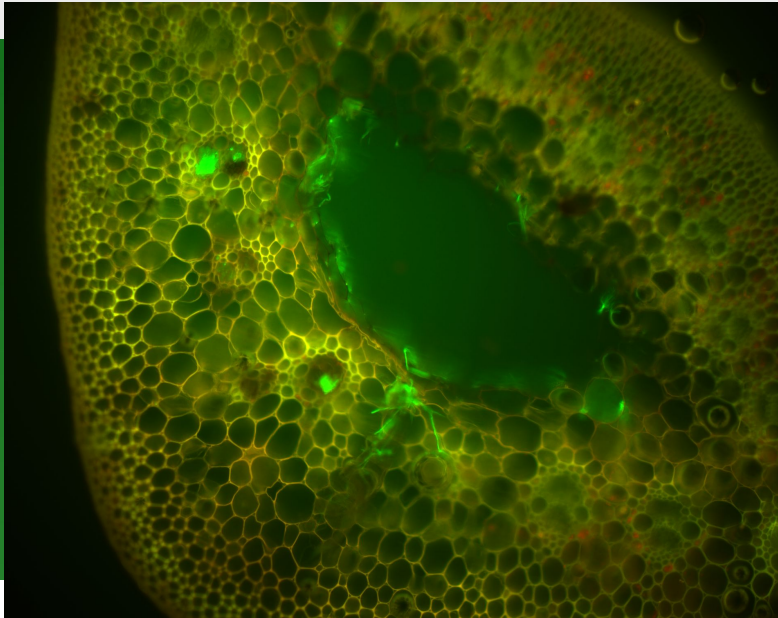
Model TIA: przepływ krwi

Równanie Poissela



Model grzyba *Fusarium Graminearum*

- Patogen niszczący uprawy w USA i Kanadzie
- Model wzrostu grzyba *Fusarium Graminearum* wewnątrz kłosów zbóż
- Poszukiwanie strategii wzmacniania odporności roślin na patogen



Zalety i wady Grafu Automatu Komórkowego

- **Zalety:**
 - To wciąż to prosty i klarowny schemat modelowania
 - Możliwość zastosowania metodologii i narzędzi teorii grafów
 - Implementacje dla GPU są również efektywne
- **Wady:**
 - Bardziej skomplikowana implementacja
 - Graf jest „czarną skrzynką” dla lokalnych procesów w sieci transportowej

Agenci a automat komórkowy

Czym jest agent:

„An agent is a computer system *situated in an environment*, and capable of undertaking *independent, autonomous* actions in this environment in order to fulfill *defined objectives*.”

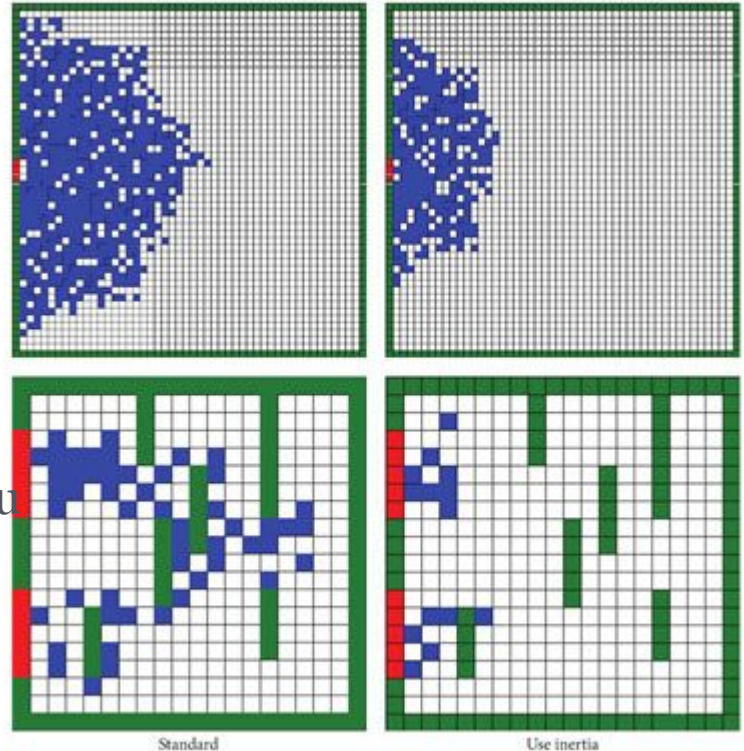
Pojedynczy automat w CA (klasycznym) nie jest agentem: brak środowiska, akcje zależne od sąsiadów, brak celu.

Zbiór agentów (*Multi-Agent System*) może być traktowany jako Automat Komórkowy

Automat Komórkowy Agentów

Model dynamiki pieszych (by Wąs), implementacja (Kłusek, Topa):

- Regularna siatka
- Stan automatu (komórki):
 - pusta, przeszkoda, zajęta
 - odległość do POI (Points of Interests)
- Pieszy: automat/agent
 - cel: POI
 - reguły: wybór kierunku i prędkości ruchu
- Środowisko
 - przeszkody
 - pole potencjalne odległości do POI



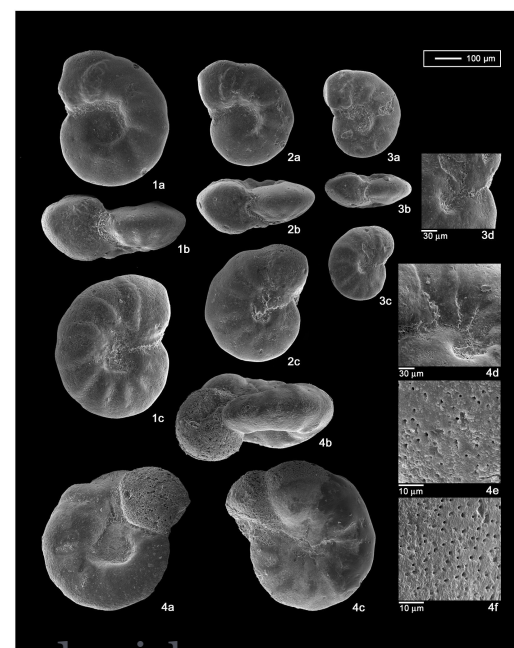
Symulacja wielkich zgromadzeń

- Akceleracja istniejącego modelu dynamiki pieszych - zastosowania GPU
 - Możliwość symulacji 7 mln pieszych w czasie rzeczywistym i szybciej
 - *Use case*: ewakuacja Błonia Krakowskich podczas Światowych Dni Młodzieży
 - Khumb Mela Experiment
<http://www.the-kumbh-mela-experi>



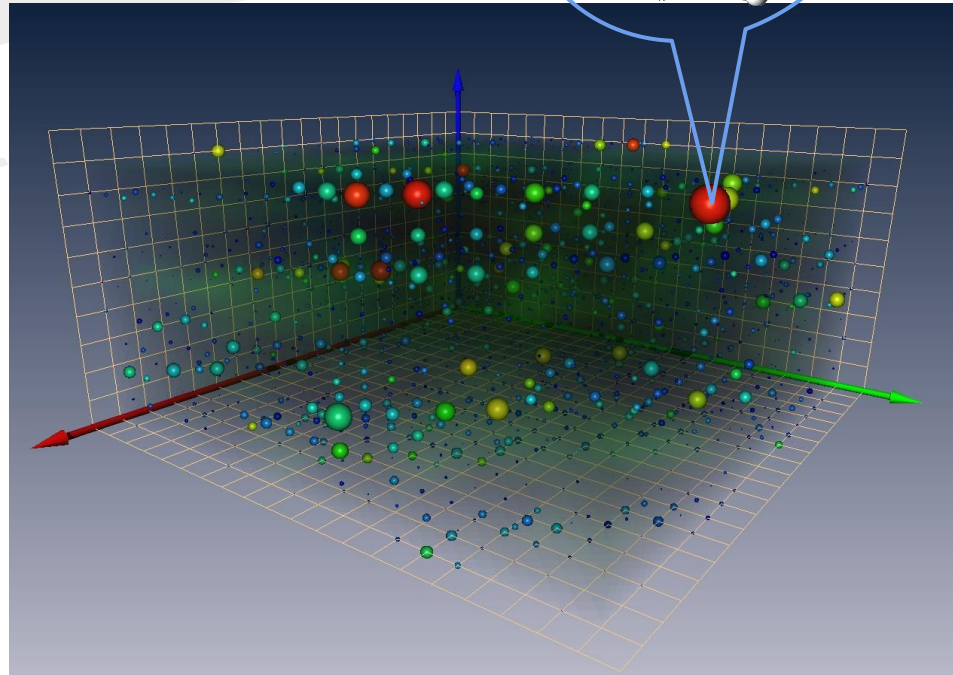
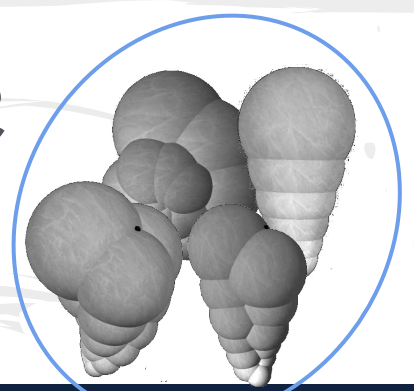
Agenci w automacie komórkowym

- Individual Based Modeling
- Evolutionary Multiagent Systems (EMAS)
- Modelowanie populacji otwornic (mikroorganizm morski)
 - otwornica - agent (+kod genetyczny), obserwujący środowisko, rośnie, rozmnaża się (+operatory mutacji i krzyżowania)
 - środowisko - morze, dno morza
 - Automat Komórkowy reprezentuje środowisko i jego ewolucję, organizuje przestrzennie populację agentów
- Możemy stosować te same strategie implementacji



Model habitatu otwornic

- długookresowa (np. 1000 lat) symulacja obejmująca dużą populację ($> 10^9$) agentów w środowisku o dużych rozmiarach ($> 100 \text{ km}^3$ oceanu)
- skomplikowane strategie zachowań agentów: żerowanie, mobilność, reprodukcja
- symulacja zmian genetycznych
- implementacje dla przetwarzania rozproszonego i GPU



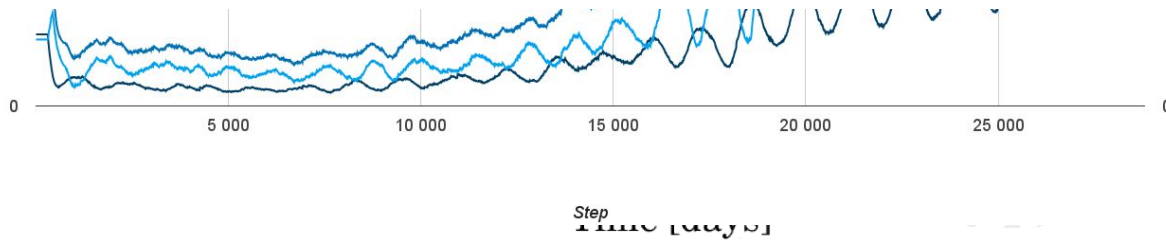
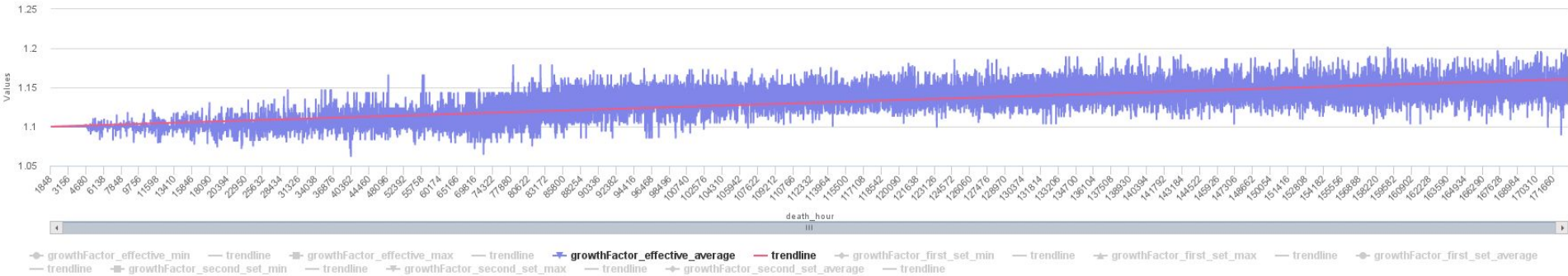
Inne zalety CA: GPGPU

- Zazwyczaj GPU wykonuje vertex shadery i pixel shadery
 - stosunkowo krótkie programy wykonywane dla ogromnych zbiorów wierzchołków i fragmentów
 - brak zależności między danymi, pełna równoległość
- Automat Komórkowy to w zasadzie to samo.
Ewentualne wyzwania:
 - operacje na pamięci, ale skutecznie wspierane przez mechanizmy sprzętowe np. cache
 - pełna równoległość: eliminacja rozgałęzień kodu lub

Ewolucja wirtualnych otwornic

Total forams (haplo and diploidal) count, born and dead, algae availability

— Forams count — Haploid count — Diploid count — Algae availability

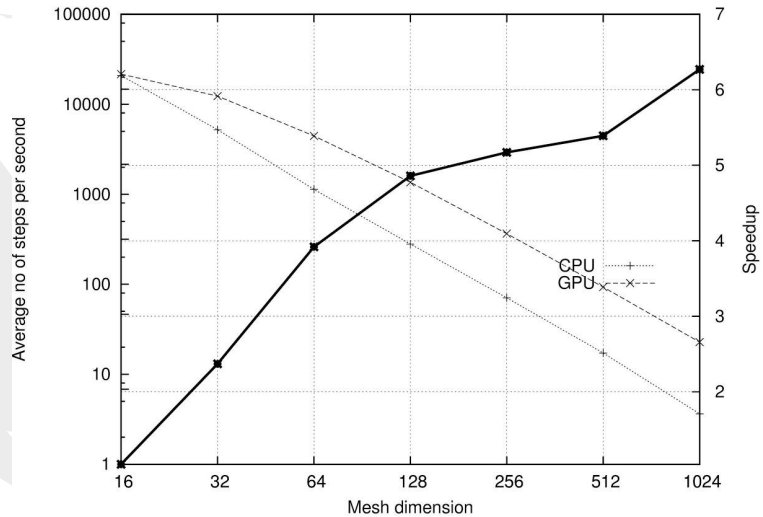


Automat komórkowy i GPU

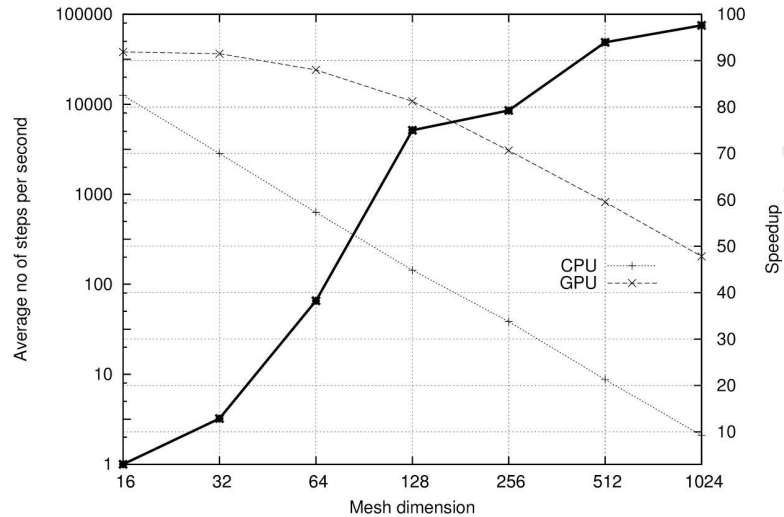
- Podstawowe zastosowanie GPU
 - krótkie programy
 - proste, regularne struktury danych
 - przetwarzanie masywnie równoległe



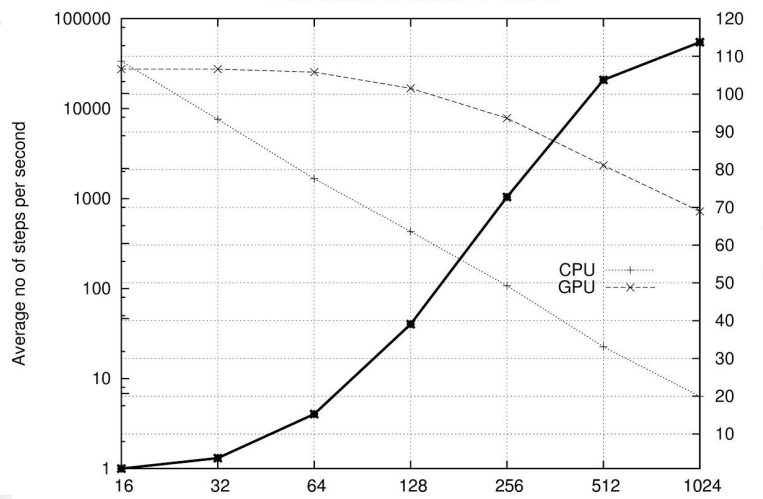
Nvidia Quadro NVS 140M/Intel Core2duo 2.1GHz



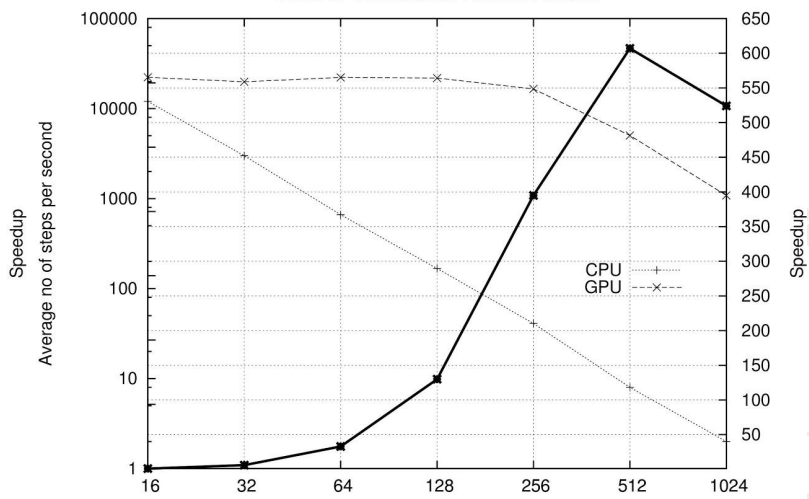
Nvidia GeForce 8800 GT/AMD Athlon64 X2 4000+



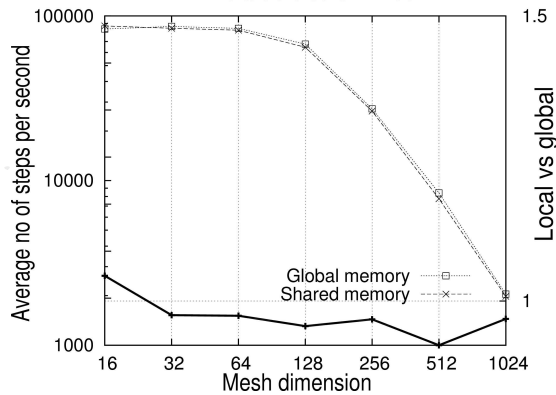
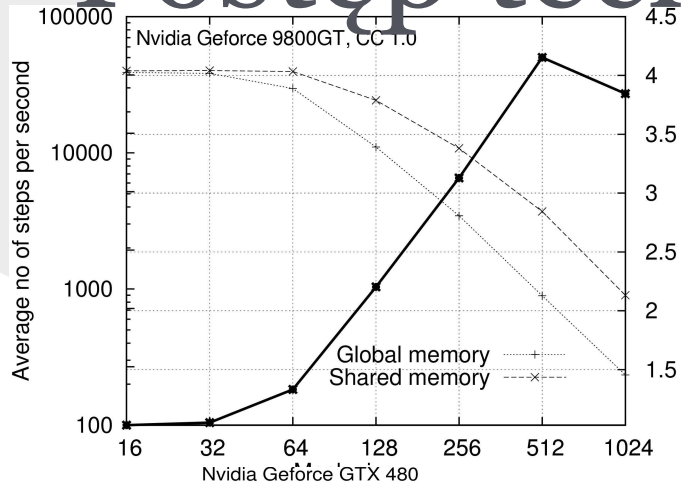
Nvidia QuadroFX4800/Intel i7 2.8GHz



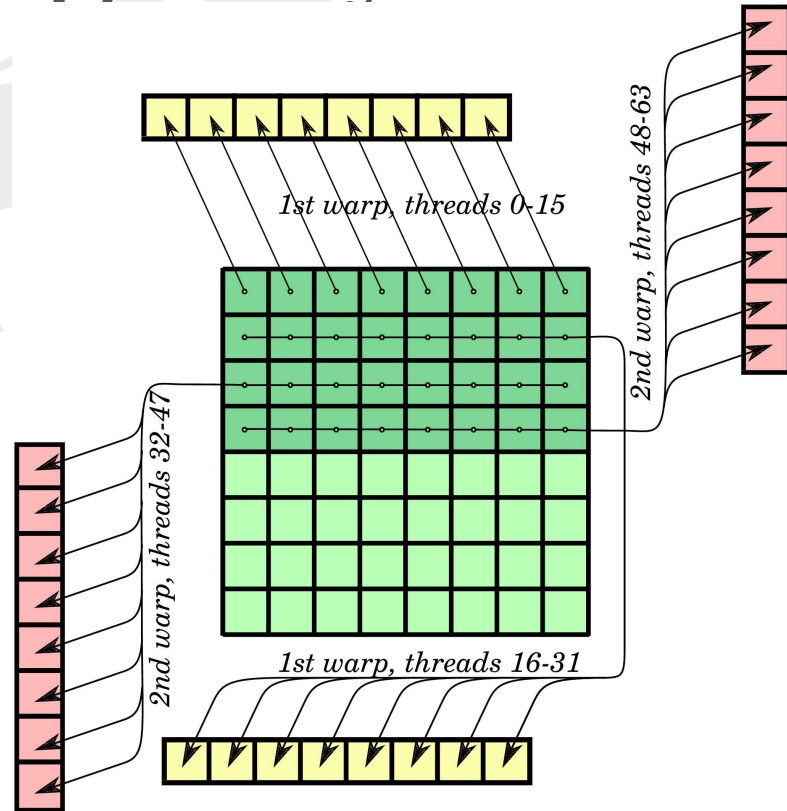
Nvidia GF GTX460/Intel PentiumD 2.8GHz



Postęp technologiczny w GPU



Local vs global



Podsumowanie

Automat komórkowy:

- dyskretny czas i przestrzeń
- wiele oddziałujących obiektów
- ewolucja opisana regułami

Automat Komórkowy tworzy wygodne i efektywne ramy (framework) dla budowania modeli zjawisk składających się z wielu oddziałujących obiektów.