

# Modelowanie klimatu

Axel Zuziak, Marcin Węglarz

AGH WFiIS  
Fizyka Techniczna

14 marca 2015

# Co to jest klimat?

## Klimat

Klimatem nazywamy średnie warunki pogodowe obserwowane w danym miejscu na przestrzeni lat.

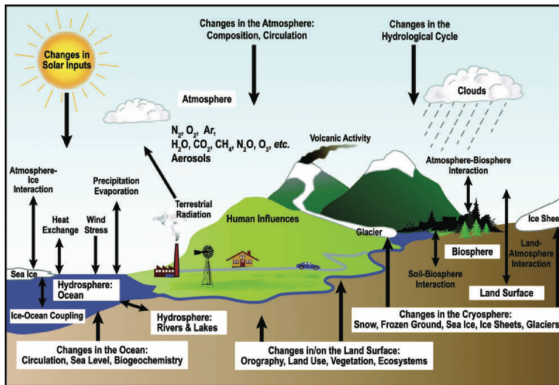
Modele klimatu są uproszczonym opisem skomplikowanych procesów.

### **Klimat dzielimy na:**

- Atmosfera
- Hydrosfera
- Kriosfera
- Powierzchnia lądowa
- Biosfera

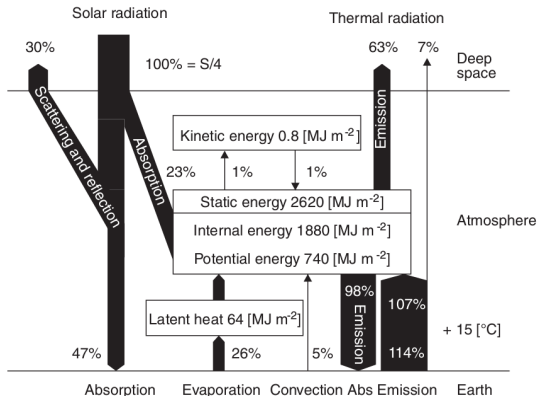
### **Składniki klimatotwórcze:**

- Temperatura
- Opady
- Zachmurzenie
- Wilgotność
- Wiatr



Rysunek: Czynniki definiujące i wpływające na klimat

# Zerowymiarowy model cieplarniany



Rysunek: Zerowymiarowy model bilansu promieniowania

# Matematyczne spojrzenie na bilans energetyczny

Bardzo prosty model bilansu radiacyjnego

$$(1 - a) \frac{S}{4} = \sigma T_a^4 + t \sigma T_s^4$$

Bilans dla powierzchni Ziemi

$$(-t_a)(1 - a_s) \frac{S}{4} + c(T_s - T_a) + \sigma T_a^4 = 0$$

Bilans dla atmosfery

$$-(1 - a_a - t_a + a_s t_a) \frac{S}{4} - c(T_s - T_a) - \sigma T_s^4 (1 - t'_a - a'_a) + 2\sigma T_a^4 = 0$$

(Wartości z primem to wartości dla fal długich.)

# Hipotetyczne przykłady

- *Współczesna Ziemia.* ( $a = 0,30$ ,  $T_s = 288K$ )
- *Biała Ziemia.* ( $a = 0,50$ ;  $T_s = 268K$ )
- *Zima nuklearna.* ( $a = 0,35$ ;  $T_s = 284K$ )

# Wymuszenie radiacyjne i sprzężenie zwrotne.

**Wymuszeniem radiacyjnym** nazywamy zjawisko zmiany temperatury na powierzchni Ziemi celem wyrównania bilansu radiacyjnego.

Wzory do ilościowego opisu zmian temperatury

$$\Delta I = \frac{\partial I}{\partial T_s} \Delta T_s$$

$$\frac{\partial I}{\partial T_s} = \frac{4}{T_s} (1 - a) \frac{S}{4}$$

# Przykłady zjawisk wpływających na globalne ocieplenie

## Zjawiska mogące wzmacniać globalne ocieplenie:

- 1 Topienie się lodów i śniegów.
- 2 Zwiększenie ilości pary wodnej w powietrzu. ( $t'_a \nearrow$ ;  $a'_a \searrow$ ).
- 3 Wzrost zachmurzenia.
- 4 Wzrost  $CO_2$  (mniejsza absorpcja przez oceany, szybszy rozkład materii).
- 5 Szybszy wzrost roślin i zmiana albedo.



# Przykłady zjawisk wpływających na globalne ocieplenie

## Zjawiska mogące osłabiać globalne ocieplenie:

- 1 Wzrost zawartości pary wodnej (średni spadek temperatury z wysokością maleje).
- 2 Wzmożony rozwój alg we wszystkich wodach (użycie  $CO_2$  do fotosyntezy).

# Opóźnienie czasowe ze względu na obecność oceanów

- Wysoka pojemność cieplna wody.
- Duża powierzchnia wód na Ziemi.
- Powolne zmiany temperatury.

Zmiana temperatury w wyniku wymuszenia radiacyjnego

$$\Delta T_s(t) = G_f \Delta I$$

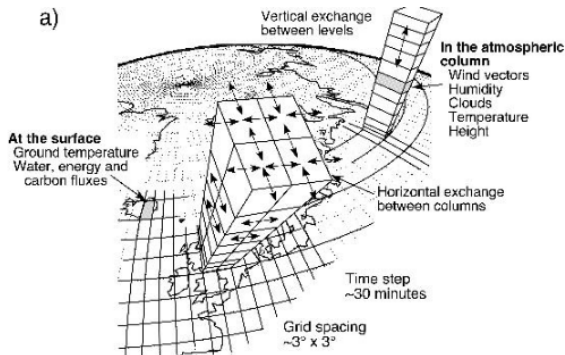
Ta sama zmiana po uwzględnieniu opóźnienia czasowego

$$\Delta T_s(t) = G_f \Delta I (1 - \exp^{-t/\tau_e})$$

$$\tau_e \approx 50 - 100 \text{ lat}$$

# Implementacja

W celu implementacji naszych równań musimy im nadać wartości dyskretne. Modelujemy atmosferę, dzieląc ją na pudła.



Rysunek: Model podziału atmosfery na pudła.

# Modele klimatu

Ogólnie możemy podzielić na modele:

- zerowymiarowe
- 1-wymiarowe
- 2-wymiarowe
- 3-wymiarowe

Spośród powyższych najdokładniejsze są modele 3-wymiarowe, z których należy wyróżnić

- GCM (general circulation model), AGCM, OGCM, CGCM lub AOGCM
- RCM (regional climate model)

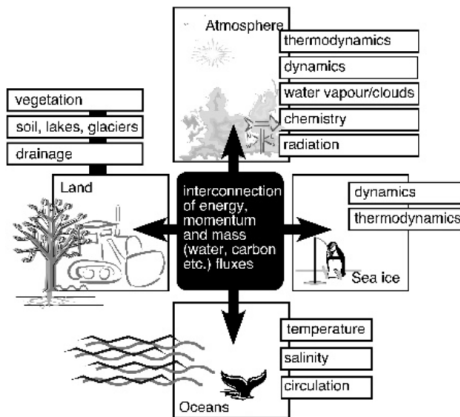
# TODO

- Zmienne w modelach
- Opisać modele 0/1/2/3 wymiarowe
- Problemy i sprzężenia zwrotne
- Modelowanie atmosfery, oceanu, lądu, innych

# Plan prezentacji

- ❶ Co to jest klimat.
- ❷ Ważne pojęcia.
- ❸ Model zerowymiarowy - rozgrzewka (???).
- ❹ Modelowane zjawiska fizyczne (atmosfera, ocean ...).
- ❺ Sprzężenia zwrotne i parametryzacja.
- ❻ Rodzaje modeli + streszczenie.
- ❼ Implementacja GCM.

# Trójwymiarowy model klimatu



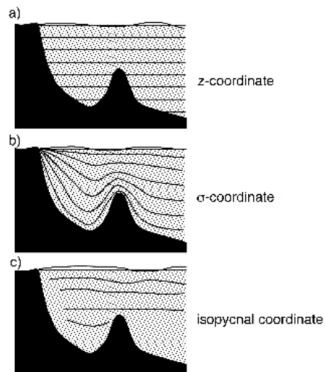
Rysunek: Wymiana wielkości fizycznych pomiędzy składowymi modelu

# Modelowanie oceanu

Na ocean wpływa:

- Siła mechaniczna wiatru
- Wypadkowy efekt gęstości i zasolenia wody
- Wymiana ciepła z atmosferą
- Wilgotność

Skutkiem ruchu obrotowego są prądy (pływy) oceanu.



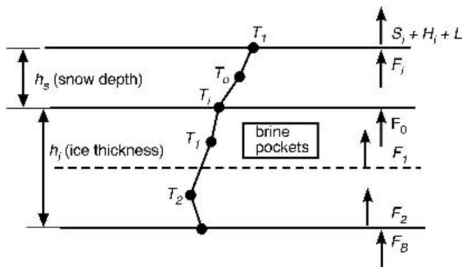
Rysunek: Opis



# Modelowanie kriosfery

Własności kriosfery:

- Śnieg i lód mają wysokie albedo - są istotne w globalnym bilansie ciepła.
- Zwiększają wymianę ciepła i gazów pomiędzy oceanami a atmosferą.



Rysunek: Najprostszy model to trójwarstwowy model termodynamiczny

# Modelowanie powierzchni ziemi

TODO

# Modelowanie zjawisk chemicznych w atmosferze

TODO

# Modelowanie atmosfery

Prawo zachowania pędu

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} - \rho^{-1}\nabla p + \mathbf{g} + \mathbf{F}$$

Prawo zachowania masy

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho\nabla \cdot \mathbf{v} + C - E$$

Prawo zachowania energii

$$\frac{DI}{Dt} = -p\frac{D\rho^{-1}}{Dt} + Q$$

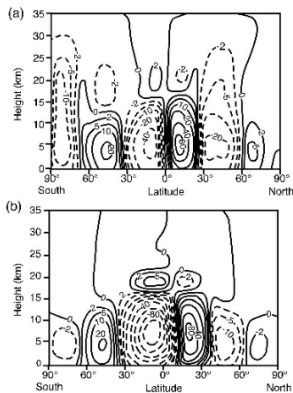
Równanie stanu gazu doskonałego

$$p = \rho RT$$

# Modele 1D/2D/3D

- ① Model 1D:
  - Model RC (radiative-convective model).
  - One-dimensional EBM (energy balance model).
- ② Model 2D:
  - Two-dimensional SD (statistical dynamical) climate model.
- ③ Model 3D:
  - GCM (general circulation model)

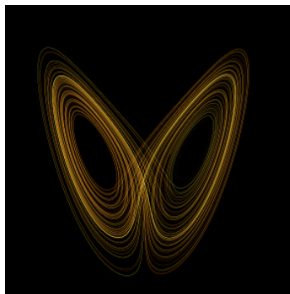
# Przykład modelowania 2D



**Rysunek:** Rysunek przedstawia średni roczny przepływ masy. a) obserwowany, b) przewidziany modelem

# Teoria Chaosu na przykładzie układu Lorentza

$$\begin{cases} \dot{x} = \sigma(y - x) \\ \dot{y} = x(\rho - z) - y \\ \dot{z} = xy - \beta z \end{cases}$$



Rysunek: Trajektoria układu Lorentza

# References



K.McGuffie, A. Henderson-Sellers  
A Climate Modelling Primer



The End