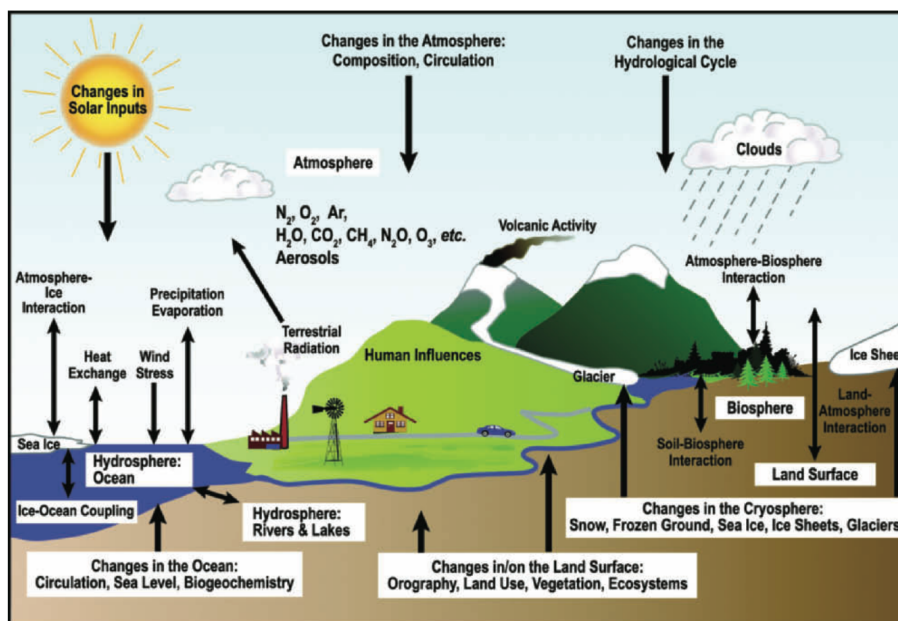


# 1 Co to jest klimat?

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

Przykładowe czynniki: temperatura, opady, zachmurzenie, wilgotność. Modele klimatu są uproszczonym opisem skomplikowanych procesów. Klimat dzielimy na pięć części:

- **Atmosfera** Gazowa część ponad powierzchnią ziemi.
- **Hydrosfera** Wszystkie formy wody nad i pod powierzchnią ziemi.
- **Kriosfera** Wszystkie formy wody w postaci lodu.
- **Powierzchnia lądowa**
- **Biosfera** Organizmy żyjące w hydrosferze oraz na powierzchni lądowej.



Rysunek 1: Czynniki definiujące i wpływające na klimat

Na klimat najbardziej wpływają czynniki:

- **Zmiany w promieniowaniu słonecznym** - "Changes in Solar inputs"
- **Promieniowanie ziemskie** - naturalne promieniowanie ziemskie
- **Zmiany w składzie gazowym atmosfery** -  $N_2, O_2, CO_2$  itp. + aerozole.

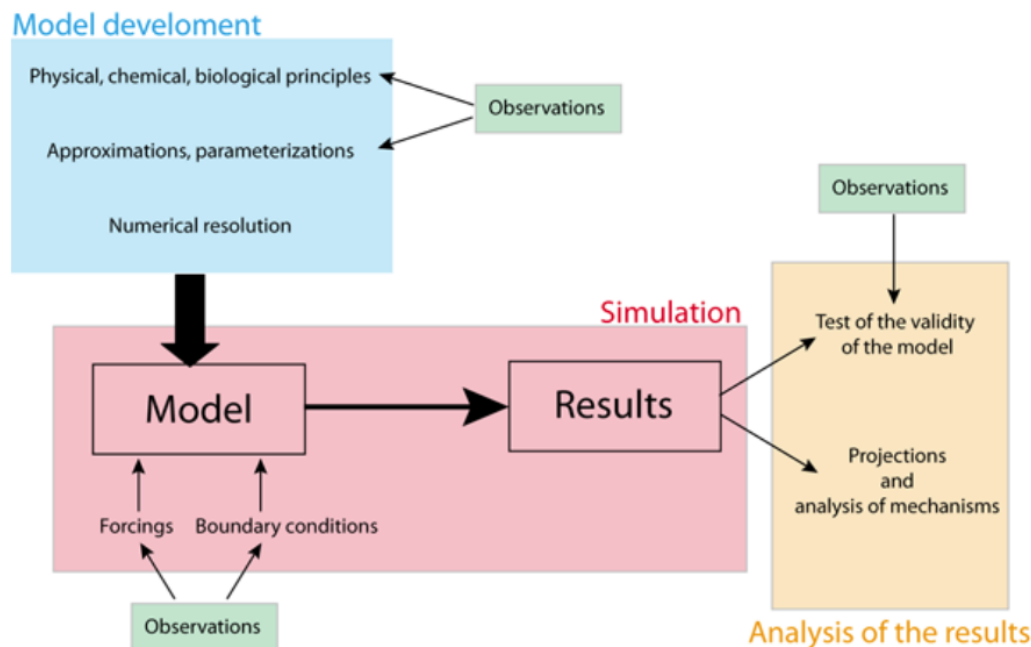
Powyższe występują głównie w atmosferze. Ich zmiany prowadzą do zmiany klimatu. Nierównomiernie padające promieniowanie słoneczne oraz rotacja i pofałdowana powierzchnia lądów i oceanów powoduje poziomy transport energii przez wodę i powietrze. Obecnie obserwowana zmiana klimatu jest połączeniem naturalnej wariacji oraz wpływu człowieka.

**Ciekawostka 1.** Naturalne zmiany klimatu można obserwować poprzez analizę okresu sprzed rewolucji przemysłowej (1750). - brak wpływu człowieka.

**Ciekawostka 2.** IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change* - organizacja założona w 1988 przez dwie organizacje Narodów Zjednoczonych – Światową Organizację Meteorologiczną (WMO) oraz Program Środowiskowy Organizacji Narodów Zjednoczonych (UNEP) w celu oceny ryzyka związanego z wpływem człowieka na zmianę klimatu.

## 1.1 Model klimatu

Ogólnie model klimatu jest zdefiniowany jako matematyczna reprezentacja klimatu oparta na fizycznych, biologicznych i chemicznych zasadach. Dane dostarczone są tak złożone, że muszą być rozwiązane numerycznie. Konsekwencją tego faktu jest dyskretyzacja przestrzeni i czasu. (Modele odnoszą się do danego regionu, którego rozmiar zależy od rozdzielczości).



Rysunek 2: Proces tworzenia i weryfikowania modelu klimatu

## 2 Pionowa struktura atmosfery

Rozciąga się na całym obwodzie Ziemi (40000 km) i 100 km w górę.

**Ciekawostka 3.** Temperatura powyżej 80km rośnie, ponieważ  $O_2$  fotodysocjuje w  $O$ , które silnie pochłania promieniowania o  $\lambda \in (100, 200)$  nm.

## 3 Modelowanie Atmosfery

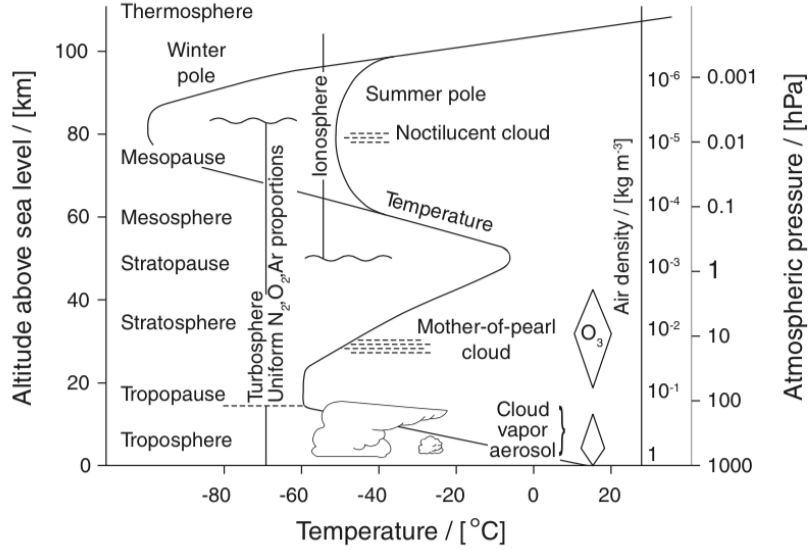
AGCMs - (atmospheric) General Circulation Model - **Model ogólnej cyrkulacji** Rozwiązanie tych równań daje:

- ciśnienie atmosferyczne
- prędkość i kierunek wiatru
- temperaturę i wilgotność na różnych poziomach

Atmosferę opisuje siedem zmiennych opisanych za pomocą siedmiu równań. ( $\vec{v} = (u, v, w)$ , ciśnienie -  $p$ , temperatura  $T$ , wilgotność  $q$ , gęstość -  $\rho$ ).

Zachowanie pędu (z II zasady dynamiki Newtona):

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}p - \vec{g} + \vec{F}_{tarcia} - 2\vec{\Omega} \times \vec{v} \quad (1)$$



Rysunek 3: Pionowa struktura atmosfery

$\Omega$  - prędkość kątowna wektora Ziemi - siła Coriolisa.  $F$  - siła tarcia

Zasada zachowania masa:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\vec{\nabla}(\rho \vec{v}) \quad (2)$$

Zasada zachowania masy wody:

$$\frac{D\rho q}{Dt} = -\vec{\nabla}(\rho \cdot \vec{v} \cdot q) + \rho(E - C) \quad (3)$$

Gdzie  $E$  - parowaniem, a  $C$  - kondensacja.

Pierwsza zasada termodynamiki:

$$Q = c_p \frac{dT}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} \quad (4)$$

$Q$  - ciepło na jednostkę masy,  $c_p$  - ciepło właściwe.

Uproszczenia:

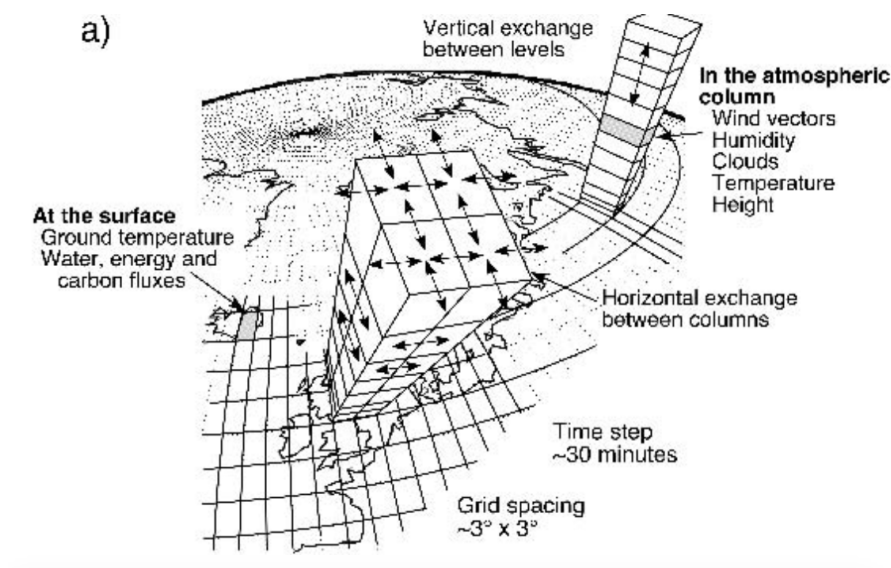
- Równowaga hydrostatyczna -  $\frac{\partial p}{\partial z} = \rho g$   
Siła grawitacyjna jest równoważona przez gradient ciśnienia. Znacząco upraszcza równania ruchu pionowego.
- Dodaje się równanie na siłę tarcia
- To jest tylko dynamiczna część atmosfery. Do pełnych obliczeń trzeba dodać jeszcze równania na wymianę ciepła powiązaną z parowaniem i kondensacją.
- Problemy, które nie uwzględniają równania muszą zostać zparametryzowane dodając nowe człony do równań (2),(3),(4).
- Warunki początkowe (brzegowe) opisują interakcje pomiędzy atmosferą, a innymi składnikami klimatu.
- 

$q$  - wilgotność jest zdefiniowana jako stosunek masy pary wodnej do masy 'suchego' powietrza w jednostce objętości

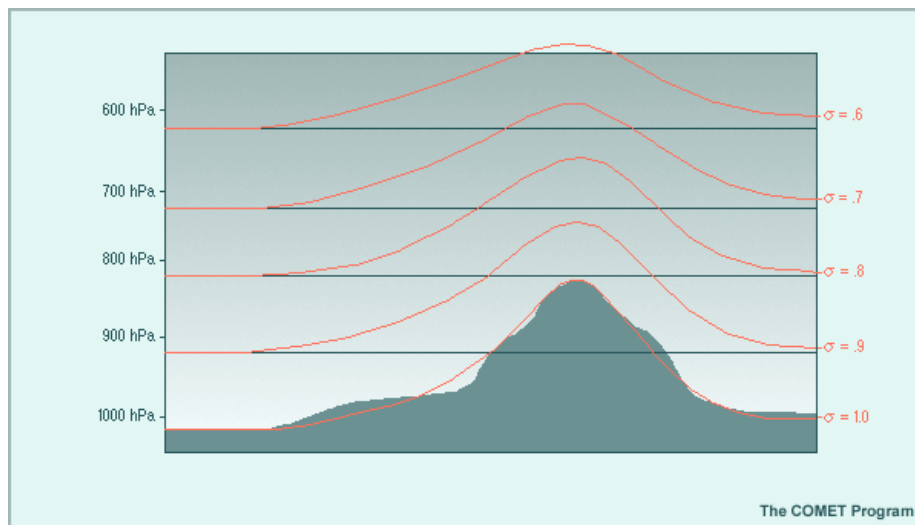
### 3.1 Skończona siatka

Nie można dokładnie (analitycznie) rozwiązać równań ruchu powietrza w ogólnym przypadku. Numeryczne (komputerowe) rozwiązania wymagają dyskretyzacji za pomocą różnych przybliżeń numerycznych, np różnic skończonych, metod spektralnych lub elementów skończonych. Typowa rozdzielczość AGCM to 1-5 stopnia szerokości i

długości geograficznej, czyli co około 100-500 km. Symulowanie za pomocą pudeł jest jedną z najprostszych metod. Atmosfera zostaje zredukowana do pewnych zbiorów zmiennych równo rozmieszczonych w danych pudełach. Każda kolumna jest podzielona na rzędy(layers). Kolejne rzędy mają kształt terenu, na którym stoi kolumna(współrzędne sigma)



Rysunek 4: Konstrukcja siatki AGCM



Rysunek 5: Współrzędne sigma

**Ciekawostka 4.** Ostatnio w modelowaniu zamiast sześcianów zaczęto używać 20-stościanów.

Odstępy czasu w takim modelowaniu muszą być wystarczająco krótkie, tak aby z jednego do drugiego pudeła nie przechodziły informacje:

$$\Delta t \leq \Delta x / c \quad (5)$$

Gdzie  $\Delta x$  jest szerokością pudeła. Taki model jest używany zazwyczaj w OGCM, ale pierwszy model atmosfery był wykonany w ten sposób. Powszechnie używa się modeli spektralnych.

## 3.2 Modele spektralne

Znajdują zastosowanie w modelowaniu atmosfery, ponieważ przyjmuje ona kształt okrągłej powłoki powietrza, co sugeruje użycie współrzędnych sferycznych. Atmosfera jest podzielona na kawałki manipulowane jako fale. Co przyspiesza i ułatwia obliczenia. Taki sposób jest wykorzystywany tylko przy wymianie poziomej. Przy pionowej nadal wygodnie jest używać siatki.

## 3.3 Opis równań

- Równanie gazu doskonałego
- Zasada zachowania masy  
Materia nie może zostać

## 4 Modelowanie oceanu

Ocean jest 'sterowany' przez:

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

Prąd(pływ oceanu) jest wynikiem powyższych oraz ruchu obrotowego Ziemi.(Silny na zachodnie stronie basenów oceanu). Temperatura, zasolenie mają swoje maksima właśnie w centrum tych prądów. Modele oceanu: dwuwymiarowe, trójwymiarowe.

Równania te same co do atmosfery, tylko bez wzoru na wilgotność. Wprowadzamy nowe równanie na zasolenie:

$$\frac{dT}{dt} = F_{solar} + F_{diff} \quad (6)$$

$F_{solar}$  - absorbcja promieniowania w oceanie.  $F_{diff}$  - obrazuje małe procesy, których model nie uwzględnia. Łatwiej przyjąć czasem inne współrzędne, używając izopyknów. (powierzchni o stałej gęstości).

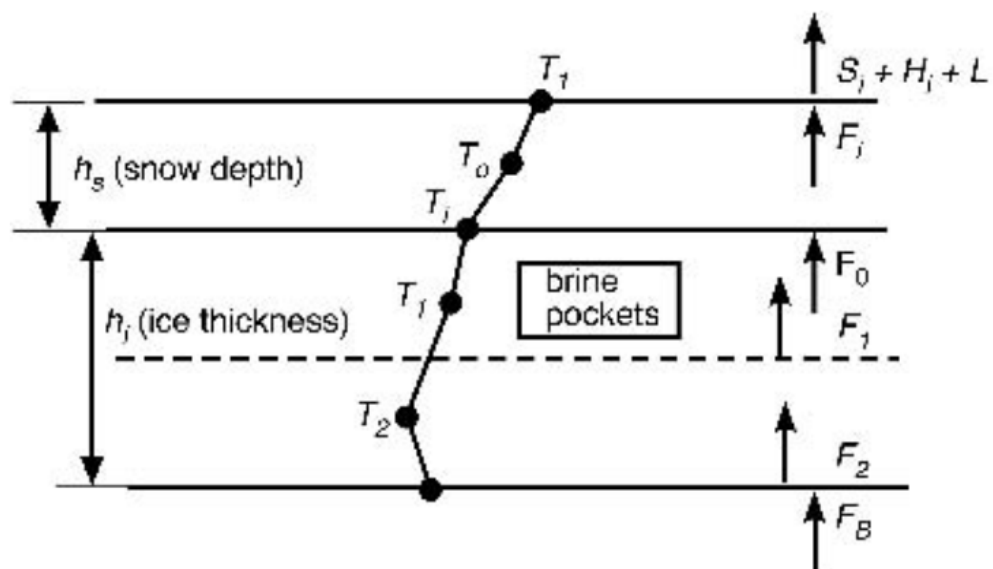
## 5 Modelowanie Kriosfery

Najbardziej dynamicznym elementem są polarne lodowce. Taki model musi uwzględniać, pokrywę śnieżną, lodowce i lądolody. Słaba dokładność: procesy trwają kilkaset lat. Własności kriosfery:

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

Przewiduje dwie temperatury lodu, temperaturę śniegu, natomiast temperatura oceanu pozostaje stała.

### 5.1 Modelowanie powierzchni lądowej



Rysunek 6: Najprostszy model to trójwarstwowy model termodynamiczny