

# Fizyka chmur: Awangarda meteorologii i klimatologii

**Wojciech W. Grabowski**

Mesoscale and Microscale Meteorology Laboratory,  
National Center for Atmospheric Research,  
Boulder, Colorado, USA

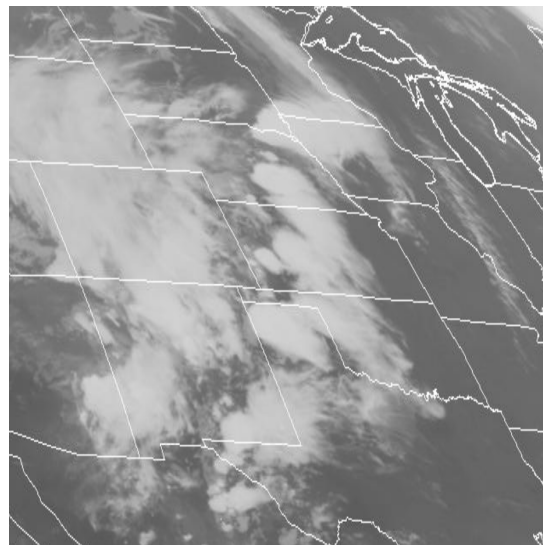
Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki,  
Uniwersytet Warszawski, Warszawa, Polska



## Ziemia w świetle widzialnym



## Mezoskalowe układy konwekcyjne (USA)

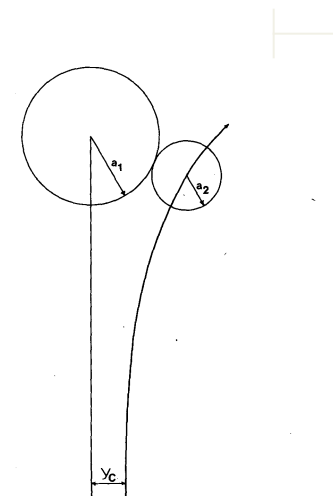
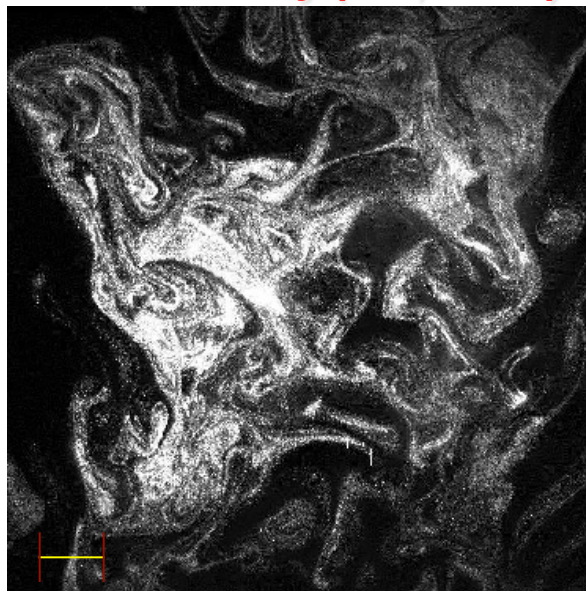


*Chmury i klimat:  
~10 rzędów  
wielkości skal  
przestrzennych...*

## Małe chmury cumulus



## Mieszanie w komorze chmurowej (IGF, FUW)

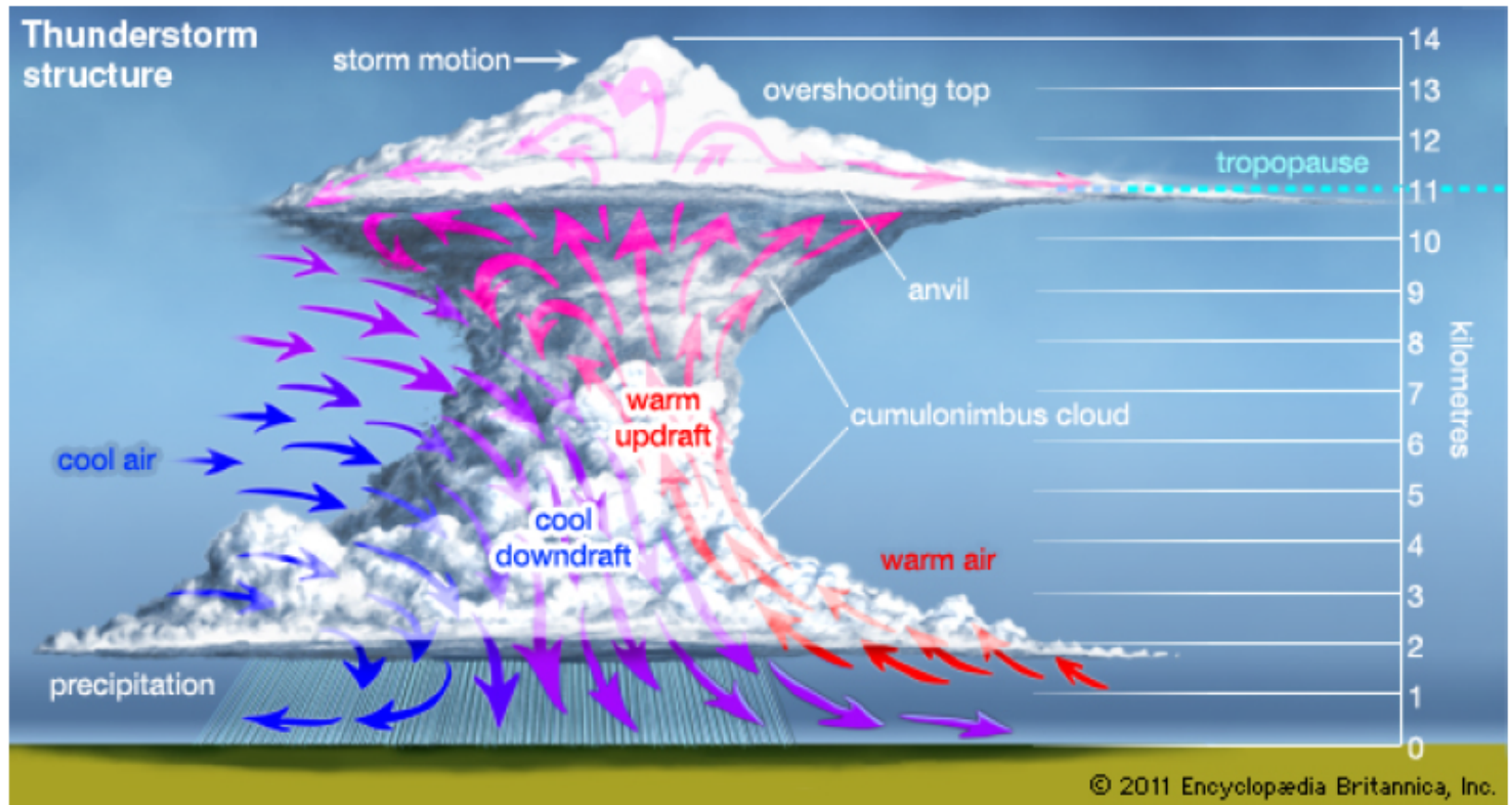


Geometria zderzenia  
kropelek chmurowych



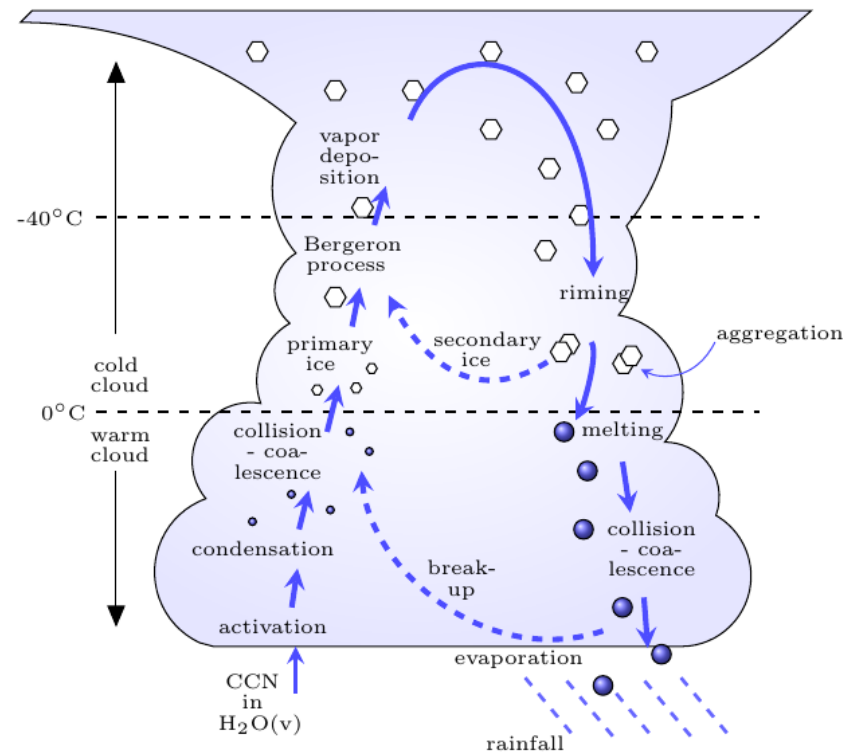
Fizyka chmur zajmuje się procesami, które prowadzą do powstawania chmur i opadów.

dynamika chmur – ruch powietrza

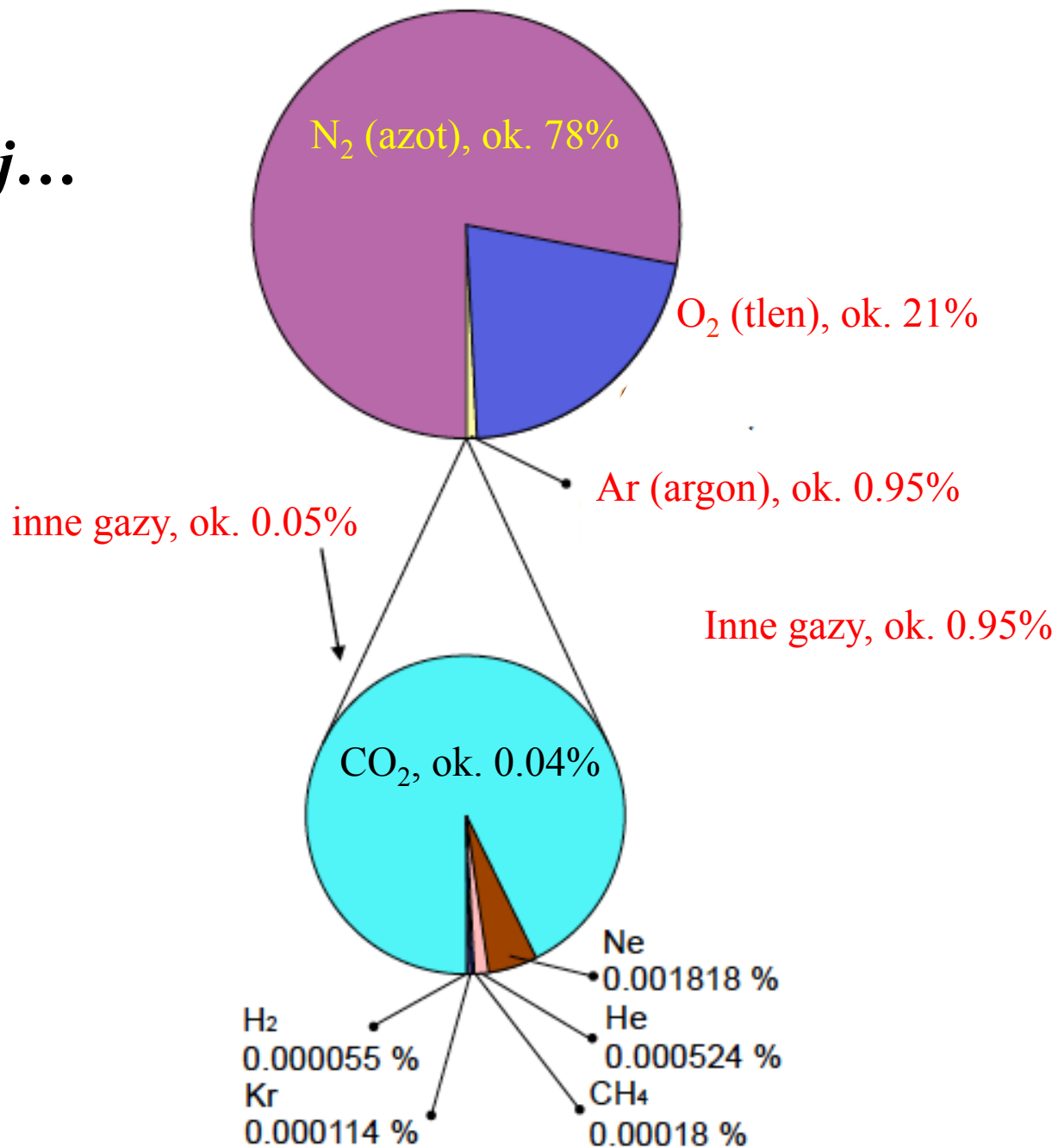


Fizyka chmur zajmuje się procesami, które prowadzą do powstawania chmur i opadów.

mikrofizyka chmur – powstawanie cząstek chmurowych i opadowych

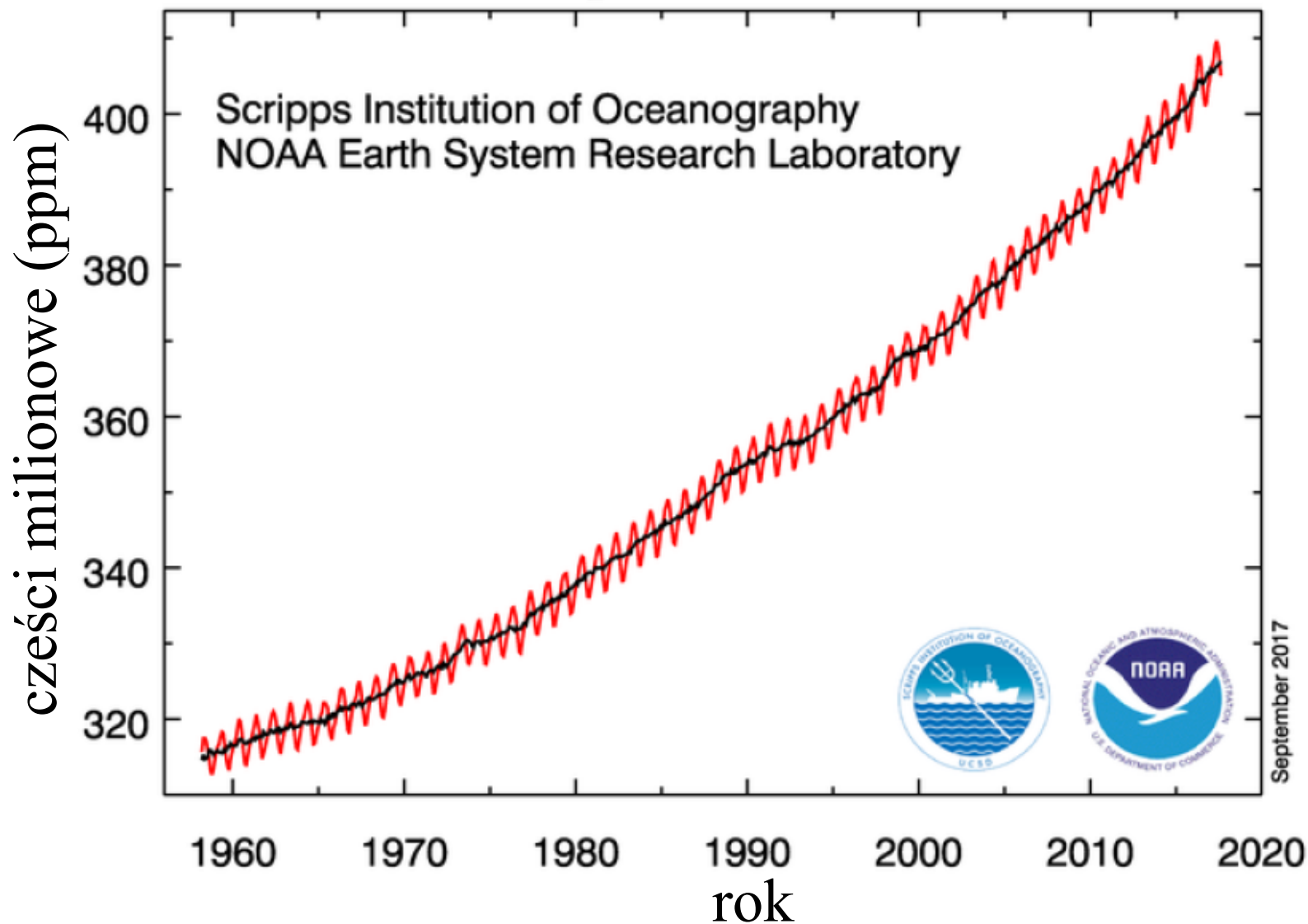


*Powietrze “suche”,  
tzn., bez pary wodnej...*





# Zawartość CO<sub>2</sub> na szczycie obserwatorium Mauna Loa (Hawaje)

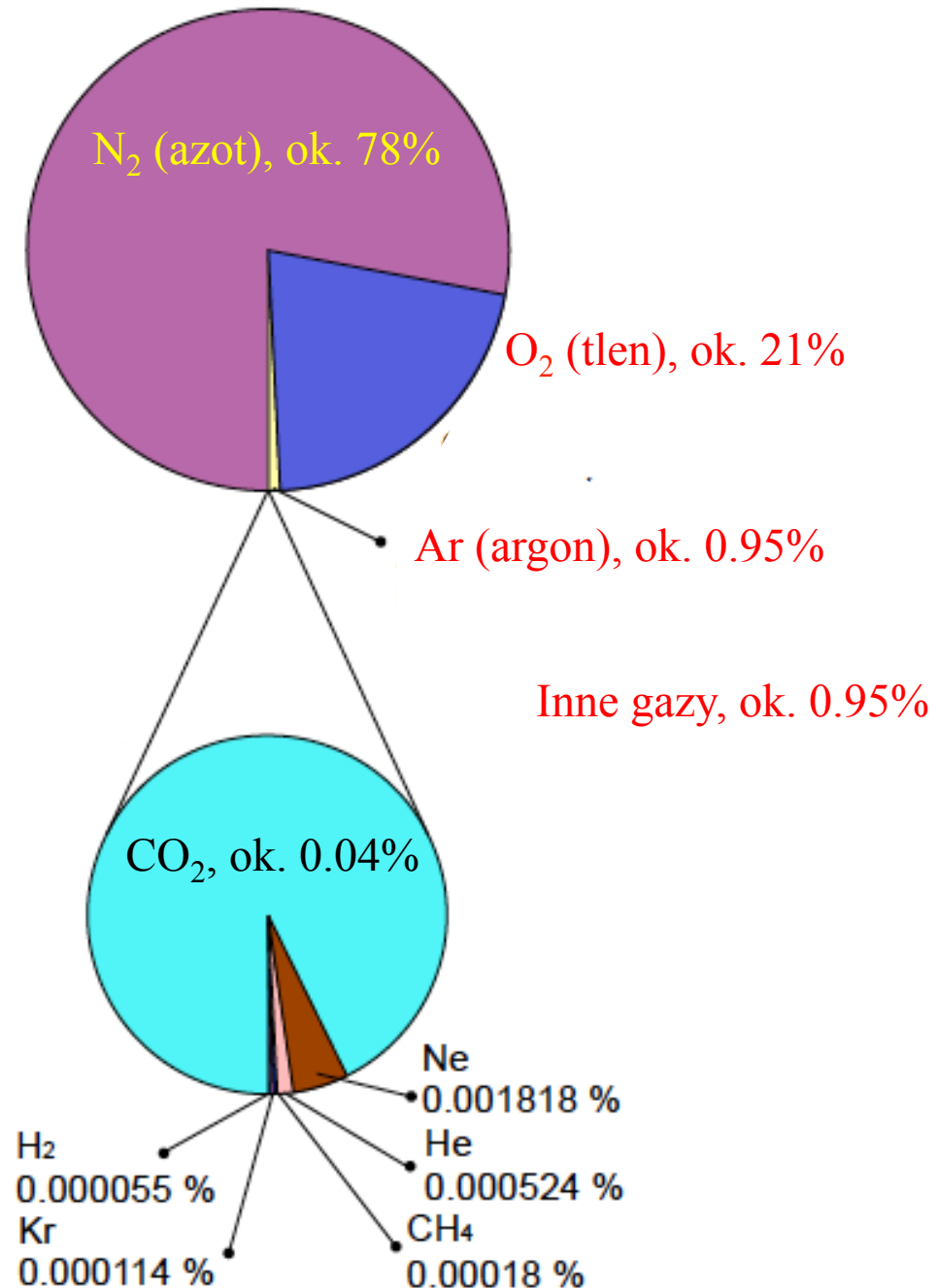


**Zawartość pary wodnej:**

**od ułamka % w bardzo niskich temperaturach**

**do max. ok. 4% dla 30°C**

**wilgotność względna:** ilość pary wodnej w stosunku do ilości maksymalnej, tzn. ilości dla stanu nasycenia



Jedno polskie słowo, dwa znaczenia!...

*pol.* “para” – *ang.* “vapor” lub “steam”

“water vapor” – “para wodna”: niewidzialny **gaz**  
(2-3% masy powietrza w tym pomieszczeniu...)

“steam” – potocznie “para”;  
mieszanina **gazu i kropelek** skondensowanej wody

*ang.* “steam engine” – *pol.* “silnik parowy”

“Nagle - gwizd!

Nagle - świst!

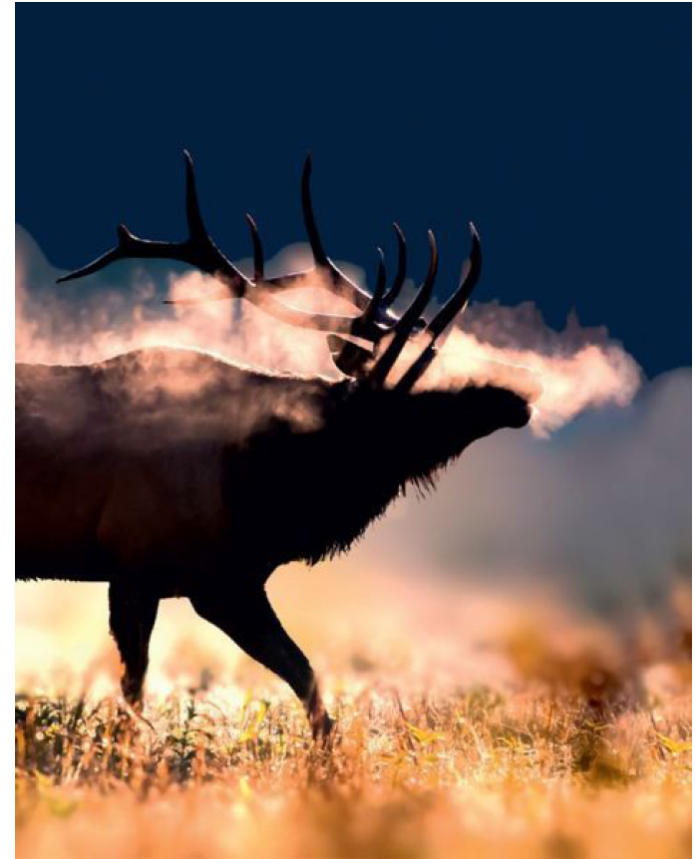
**Para** - buch!

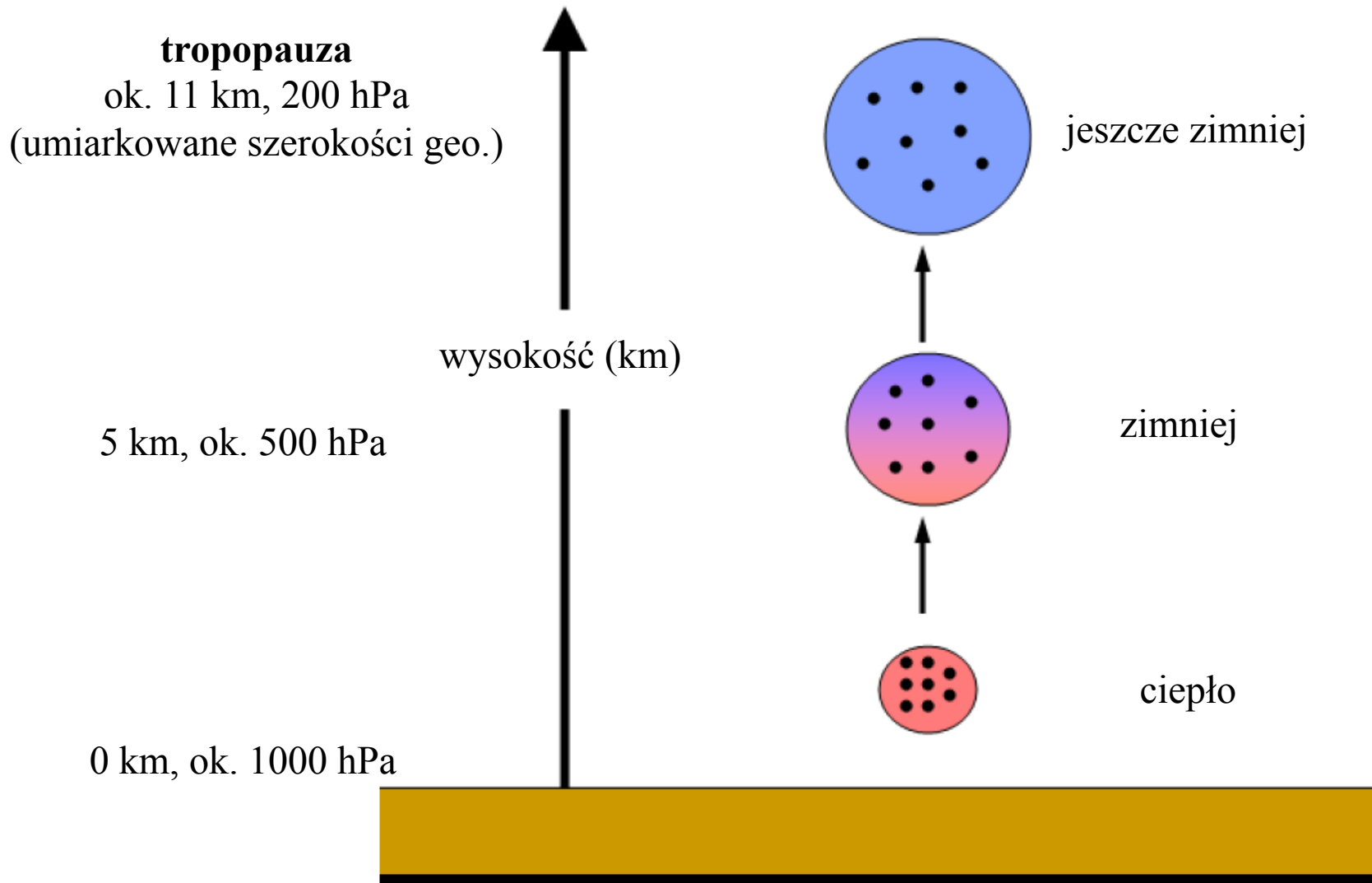
Koła - w ruch!”

Julian Tuwim, *Lokomotywa*









Cząstka powietrza wznosząca się w atmosferze...















Grabowski, J. Meteorol. Soc. Japan, 2016

**Wynik symulacji komputerowej pola chmurowego:** a) rozwiązanie równań opisujących ruch powietrza i powstawanie cząstek chmurowych i opadowych; b) zastosowanie trójwymiarowego modelu transferu radiacyjnego dla uzyskania realistycznego wyglądu chmur...

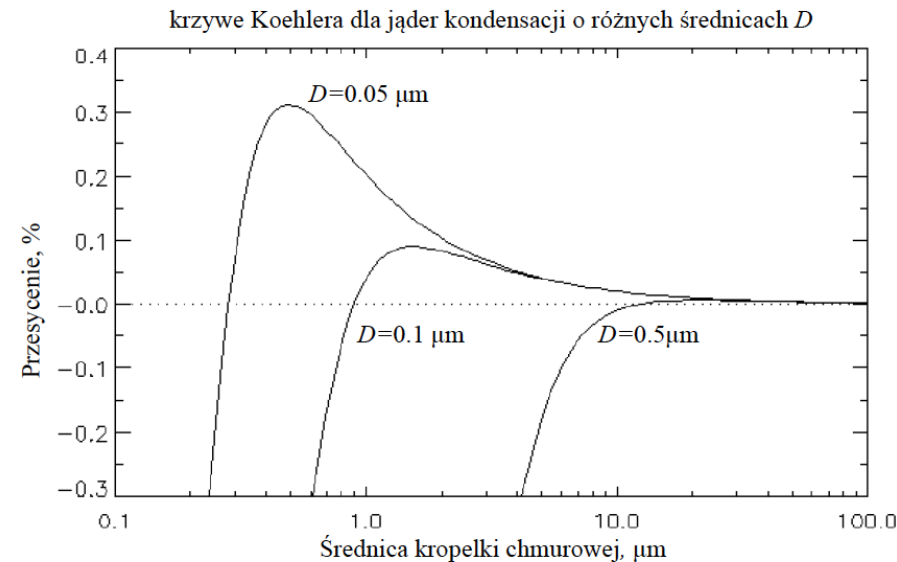
Chmury “ciepłe” – tzn. bez lodu, np. nie sięgające do 0°C (4-5 km w tropikach)



Kropelki chmurowe powstają na tzw. **jądram kondensacji** (*cloud condensation nuclei*, CCN). CCN to zazwyczaj dobrze rozpuszczalne sole [np. NaCl,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ].



Proces powstawania kropelek chmurowych nazywamy **aktywacją jąder kondensacji**. Teoria tego procesu została rozwinięta przez szwedzkiego fizyka chmur, Hilinga Koehlera (1888-1982) i jest dziś nazywaną teorią Koehlera...



# Rozmiary kropeł wody w chmurach

NB: średnica  
ludzkiego włosa  
to zazwyczaj  
kilkadziesiąt  $\mu\text{m}$

typowa kropla  
chmurowa  
10  $\mu\text{m}$



typowe jądro  
kondensacji  
0.1  $\mu\text{m}$



typowa kropla  
mżawki  
100  $\mu\text{m}$



typowa kropla  
deszczowa  
kilka mm

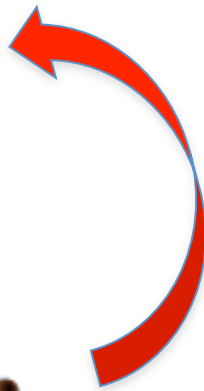


# kropelki chmurowe rosną przez dyfuzję pary wodnej

typowa kropla  
chmurowa  
10  $\mu\text{m}$



typowe jądro  
kondensacji  
0.1  $\mu\text{m}$



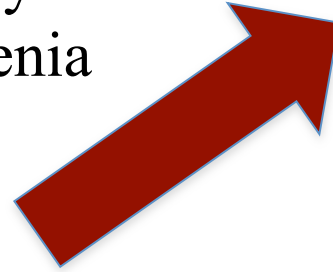
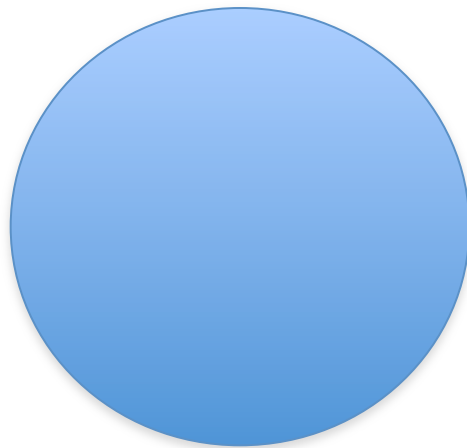
typowa kropla  
mżawki  
100  $\mu\text{m}$



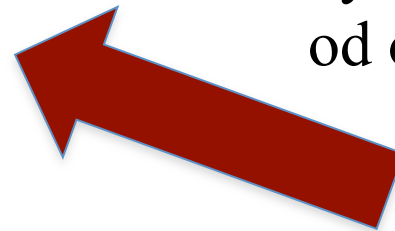
typowa kropla  
deszczowa  
kilka mm



dyfuzja temperatury  
od kropli do otoczenia



dyfuzja pary wodnej  
od otoczenia do kropli



w typowych warunkach chmurowych:

wzrost kropli od 1 do 10  $\mu\text{m}$  - ok. 1 minuty

wzrost kropli od 1 do 100  $\mu\text{m}$  - wiele godzin



# krople mżawki i deszczu powstają przez zderzenia kropeł i kropelek

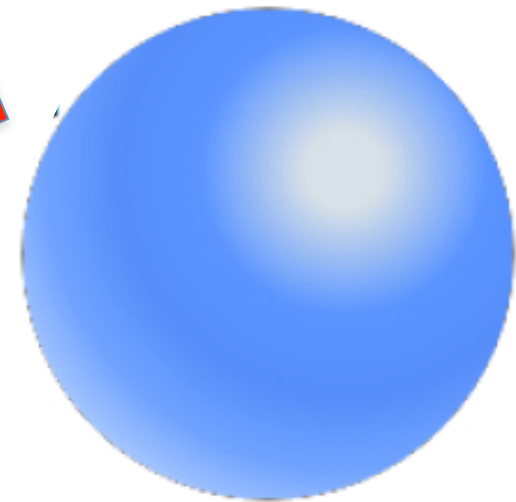
typowa kropla  
chmurowa  
10  $\mu\text{m}$



typowe jądro  
kondensacji  
0.1  $\mu\text{m}$



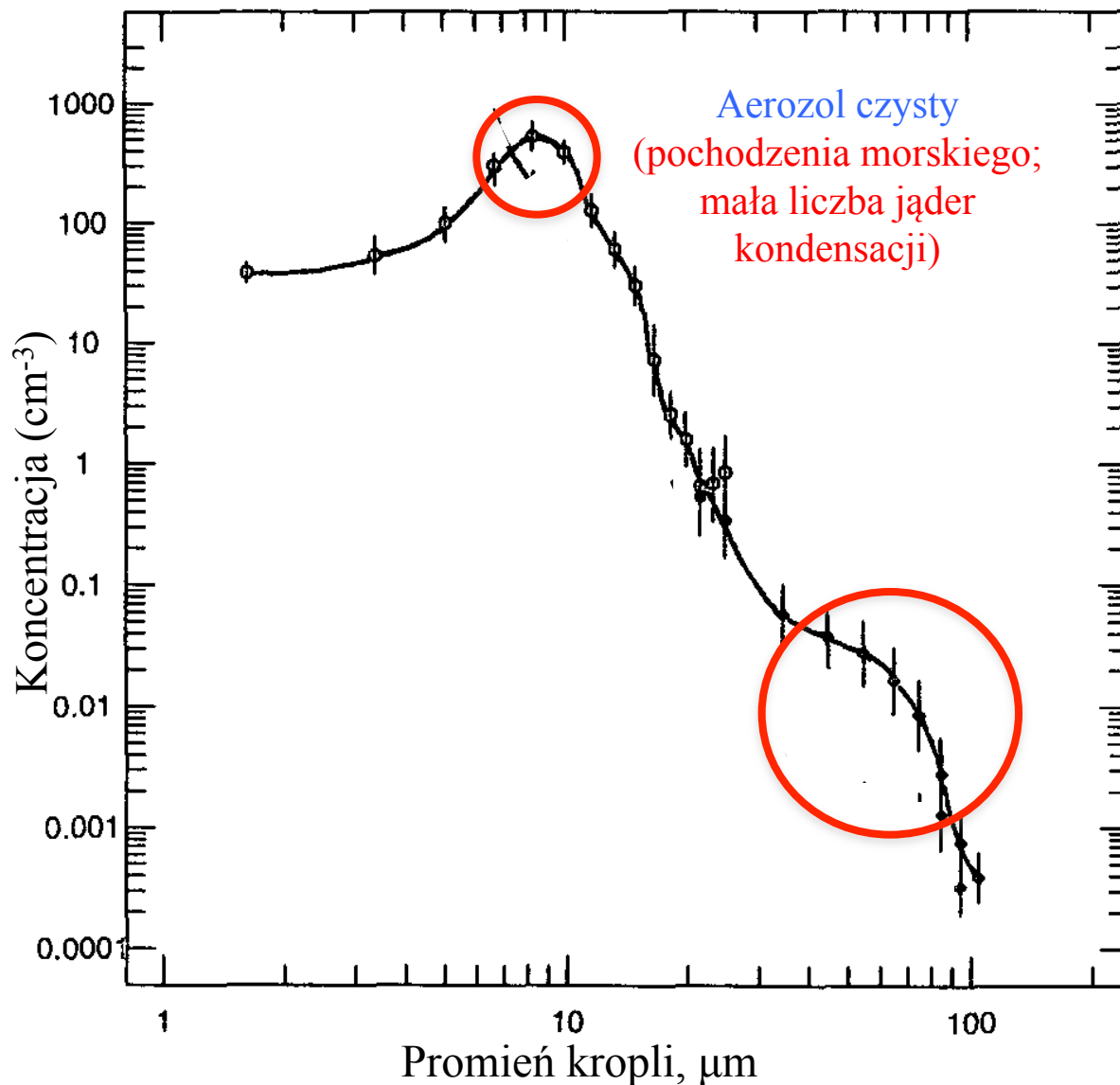
typowa kropla  
mżawki  
100  $\mu\text{m}$



typowa kropla  
deszczowa  
kilka mm



# Widma kropel w chmurze stratocumulus nad Azorami (obserwacje samolotowe)



# Widma kropel w chmurze stratocumulus nad Azorami (obserwacje samolotowe)

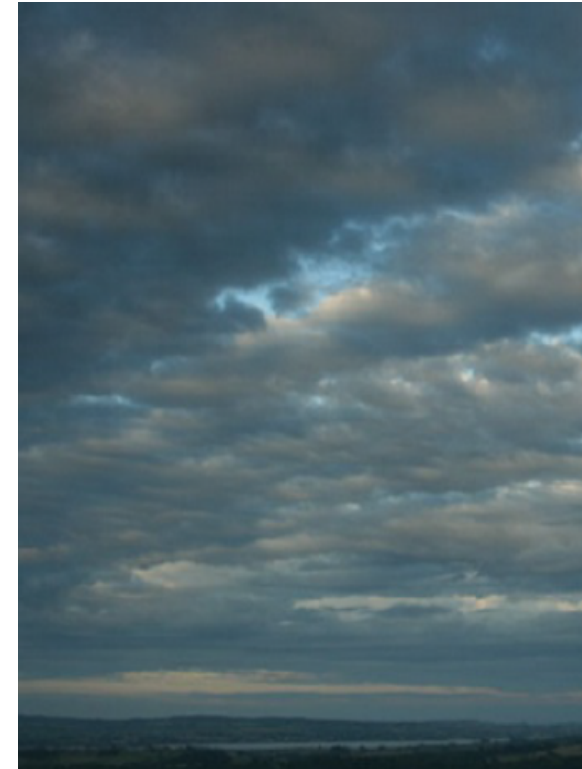
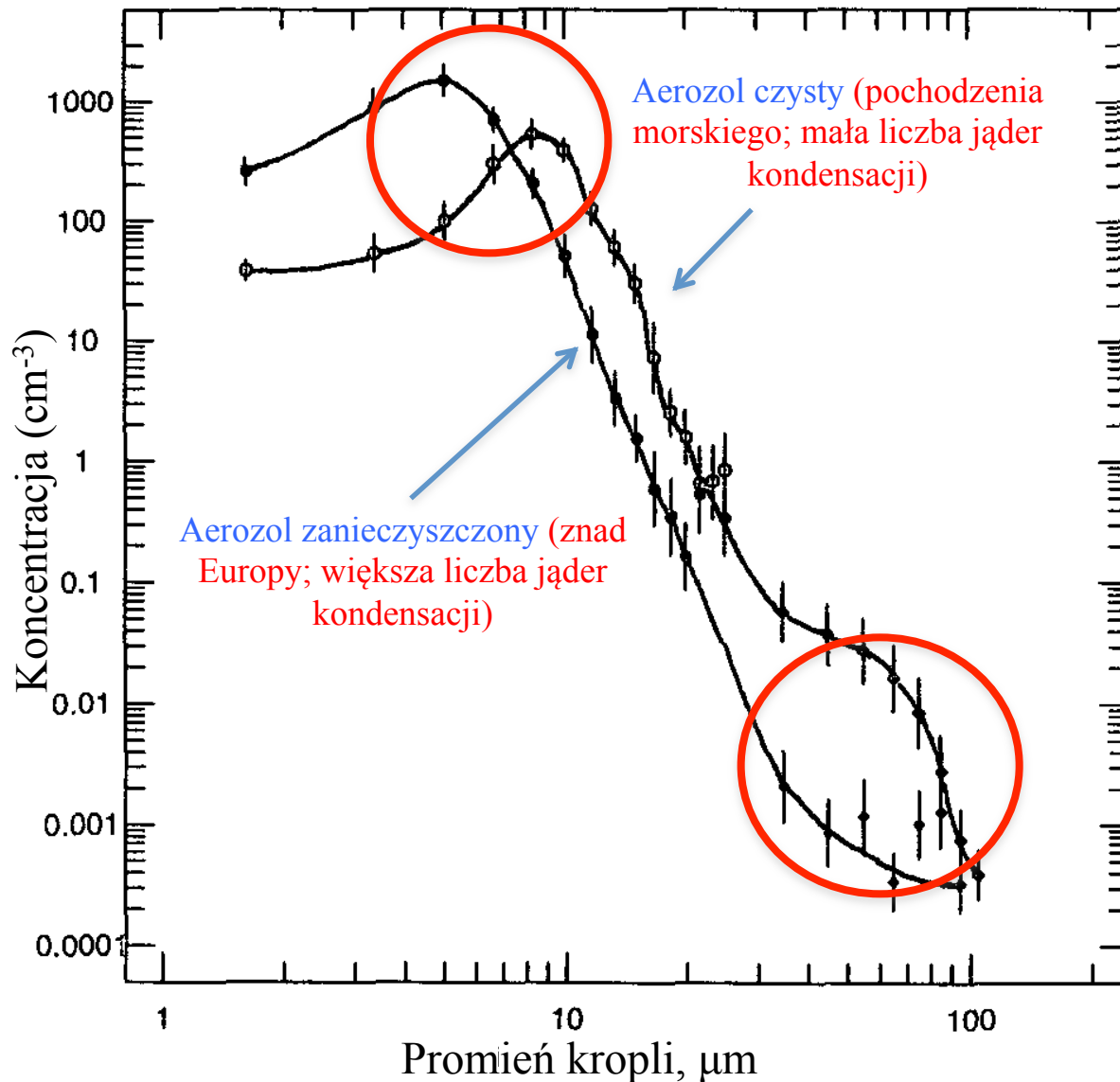


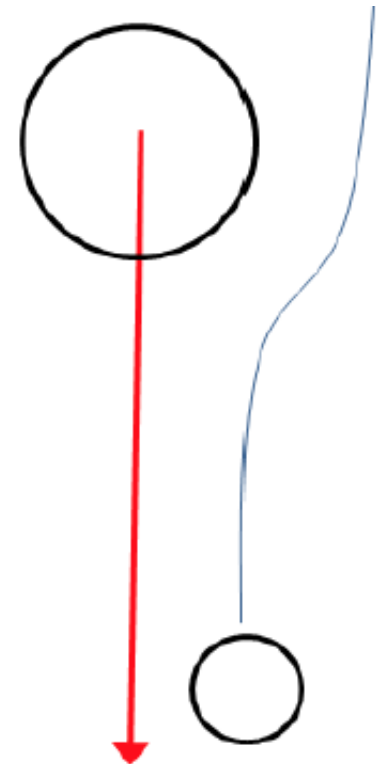


Photo: Bjorn Stevens, MPI for Meteorology, during the RICO experiment

Deszcz powstający bez udziału lodu (np. w chmurach których wierzchołki są cieplejsze niż  $0^{\circ}\text{C}$ ) nazywany “ciepłym deszczem”. Powstaje on przez zderzenia i zlewanie się kropelek chmurowych, kropli mżawki i kropli deszczowych...

prędkość opadania kropli  $V$  w funkcji jej promienia  $R$ :

$R=10\ \mu\text{m}$ :	$V \approx 1\ \text{cm/sek}$
$R=100\ \mu\text{m}$ (0.1 mm):	$V \approx 70\ \text{cm/sek}$
$R=1000\ \mu\text{m}$ (1 mm):	$V \approx 7\ \text{m/sek}$





# Marian Smoluchowski

## 1872-1917

“Fizyk, profesor Uniwersytetu Lwowskiego i rektor UJ. Był jednym z najwybitniejszych światowych fizyków początku XX w., pionierem fizyki statystycznej. Jego wyniki badań wykorzystał Albert Einstein w tworzeniu teorii o chaotycznych ruchach cząstek.

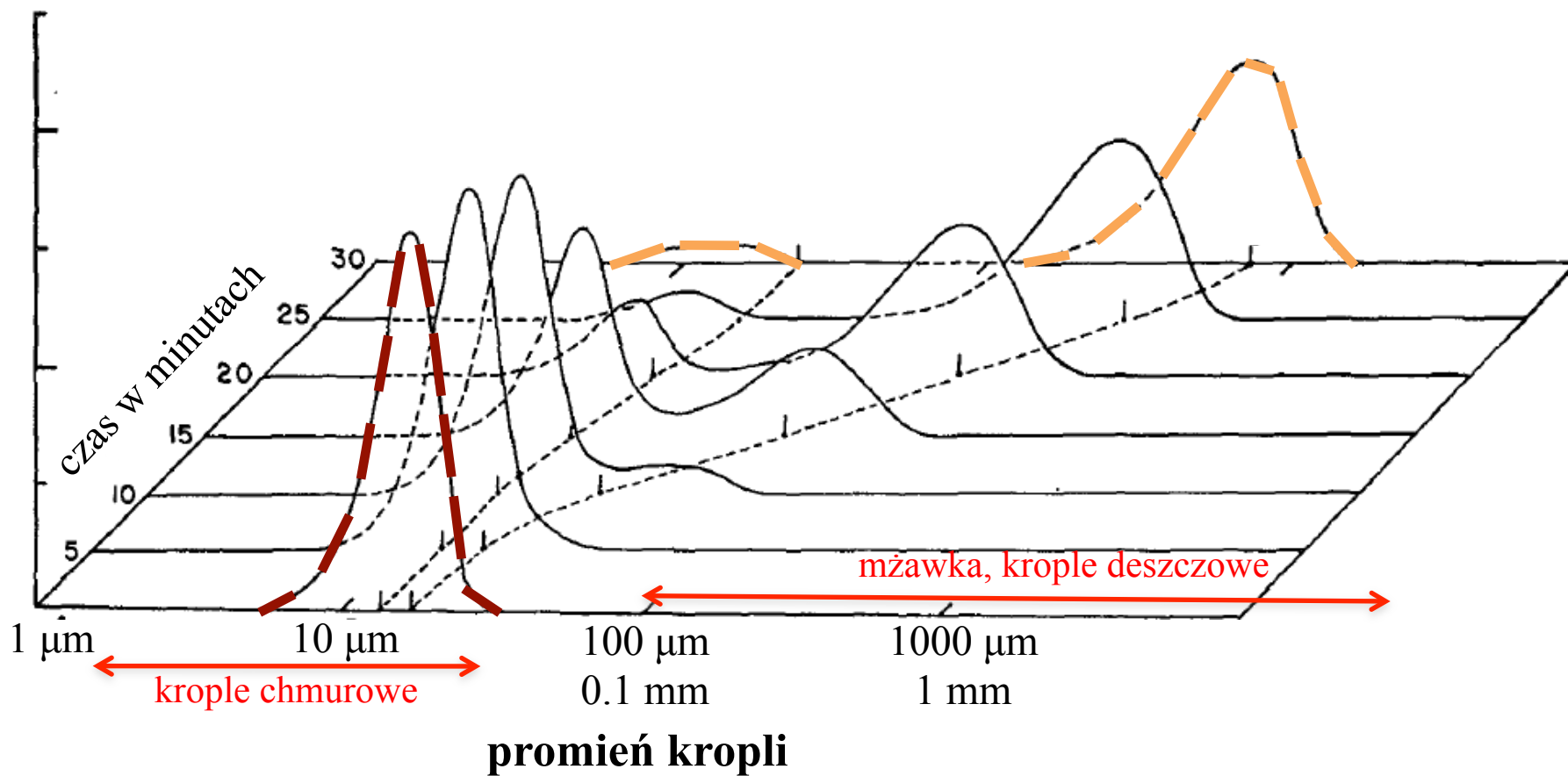
[...] Był zapanonym taternikiem i alpinistą, zobywając jako jeden z pierwszych Polaków, wiele europejskich szczytów górskich.”



Zdjęcie i tekst z galerii rektorów w ogrodzie UJ



# Przykładowe rozwiązanie równania Smoluchowskiego dla zderzeń kropeł chmurowych prowadzących do powstania kropeł deszczowych



# *Chmury z lodem...*



Łatwo jest zrobić kropelkę skondensowanej wody: niemal zawsze powietrze zawiera wystarczającą ilość jąder kondensacji...

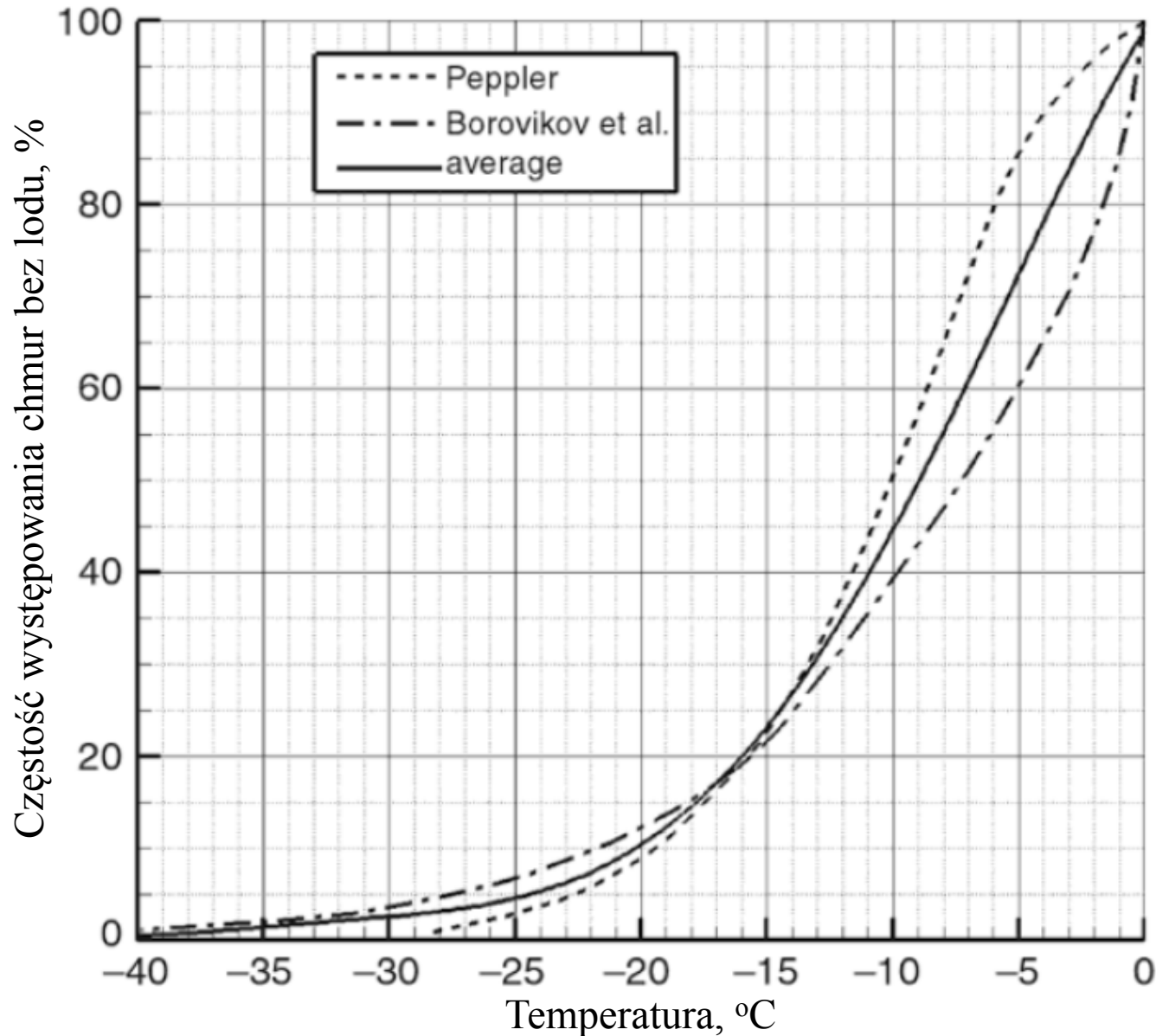
**Dużo trudniej jest zrobić kryształek lodu!**

Istnieje kilka mechanizmów powstawania kryształków lodu, ale najbardziej powszechne jest **zamrażanie kropelek wody**.

Dla **temperatur między  $0^{\circ}\text{C}$  a ok.  $-40^{\circ}\text{C}$**  potrzebny jest kontakt z tzw. jądrem zamrażania (ang. *ice forming nucleus*), zazwyczaj nierozpuszczalną cząstką aerozolu o strukturze krystalicznej zbliżonej do lodu (np. pył pustylny). Badania pokazują, że im zimniej, tym koncentracja aktywnych jąder zamrażania jest większa...

Dla **temperatur poniżej ok.  $-40^{\circ}\text{C}$**  kropelki wody zamrażają spontaniczne (ang. *homogeneous freezing*).

Szansa znalezienia chmury w której **nie ma** cząstek lodowych (przykładowe dane z obserwacji samolotowych wielu chmur)



Ale jeśli w chmurze z kropelkami wody powstanie kryształek lodu, to będzie on rósł bardzo szybko!

Jest tak dlatego, że ciśnienie pary wodnej w stanie nasycenia nad lodem jest niższe niż nad wodą: **kropelki wody parują, kryształek lodu rośnie**. Ten mechanizm nosi nazwę **mechanizmu Findeisena-Bergerona**.

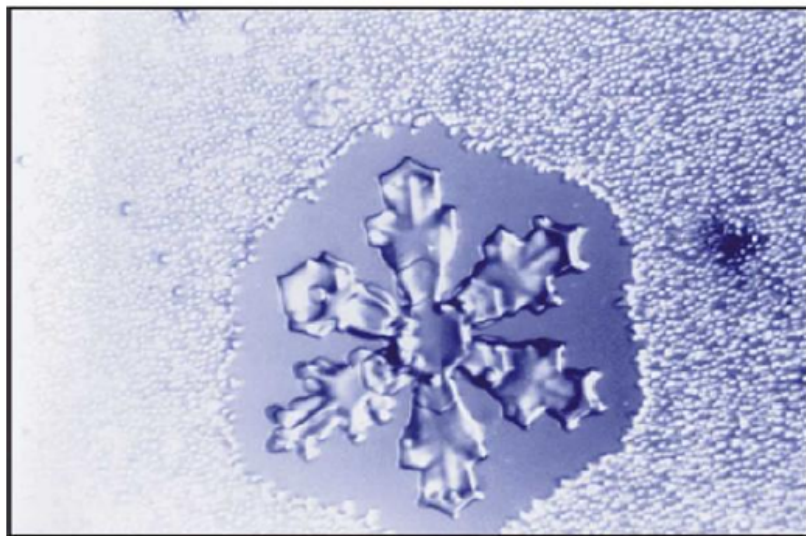


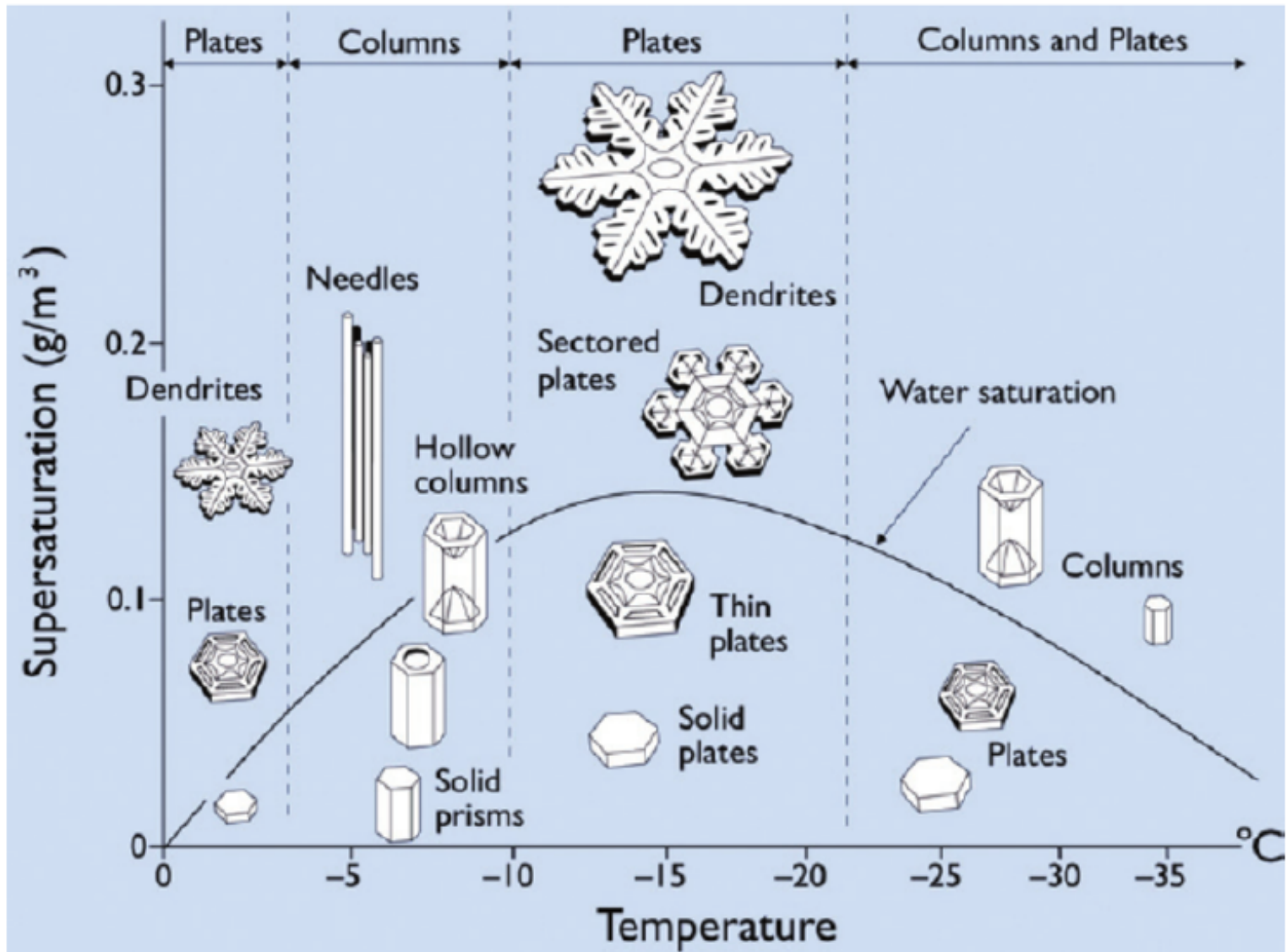
Photo by R. P. tier

Walter Findeisen (1909-1945): niemiecki meteorolog.

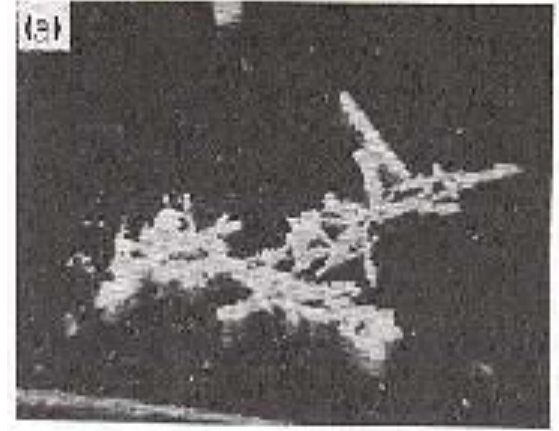
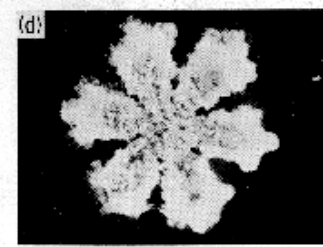
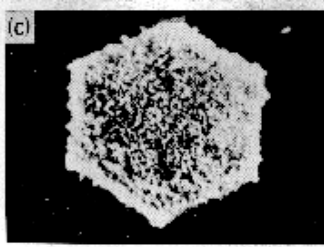
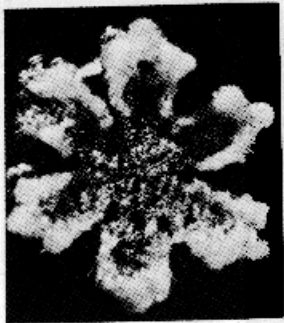
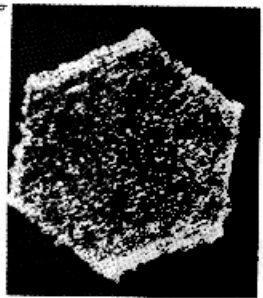
Tor Bergeron (1891-1977): szwedzki fizyk chmur i meteorolog, jeden z uczonych z tzw. Bergeńskiej szkoły meteorologii (*Bergen school of meteorology*).



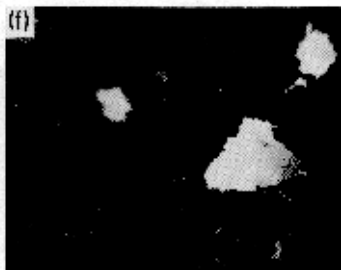
# Kształt kryształka lodu zależy od temperatury i przesylenia w otoczeniu



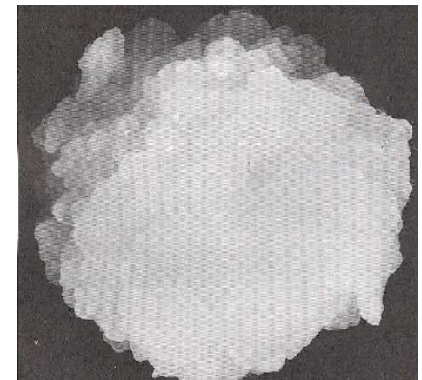
**Oszronione (ang. *rimed*) kryształki lodu (przyłączanie przechodzonych kropelek chmurowych)**

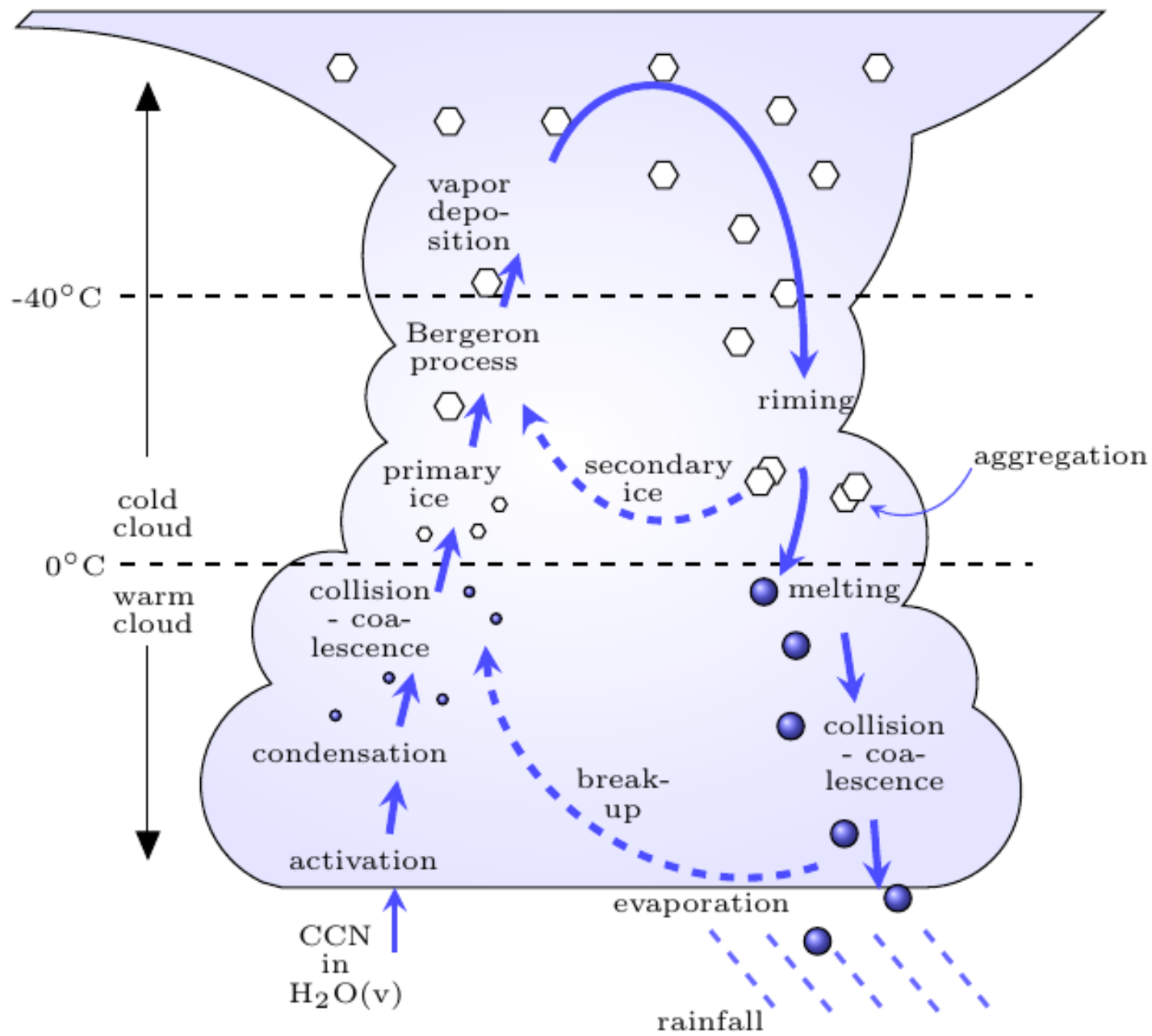


**Krupa (ang. *graupel*; *soft hail*) mocno oszronione kryształki lodu**



**Grad (ang. *hail*)**





Powyższe to bardzo ogólny przegląd zagadnień  
jakimi zajmuje się fizyka chmur...

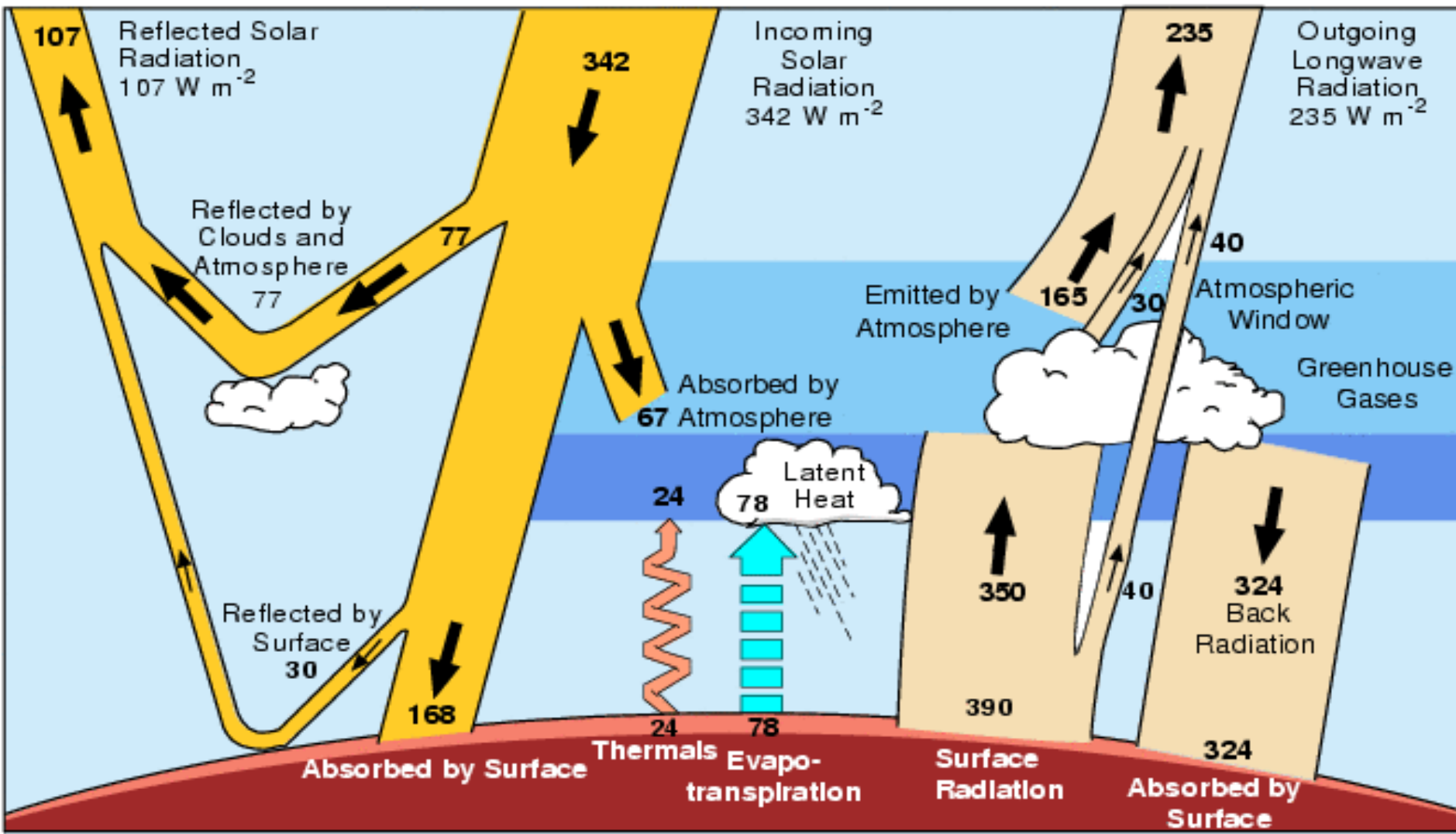
Co to ma wspólnego z meteorologią, a zwłaszcza  
z klimatologią?

Powyższe to bardzo ogólny przegląd zagadnień  
jakimi zajmuje się fizyka chmur...

Co to ma wspólnego z meteorologią, a zwłaszcza  
z klimatologią?

Aby to zrozumieć musimy zrozumieć podstawy  
bilanu energetycznego Ziemi...

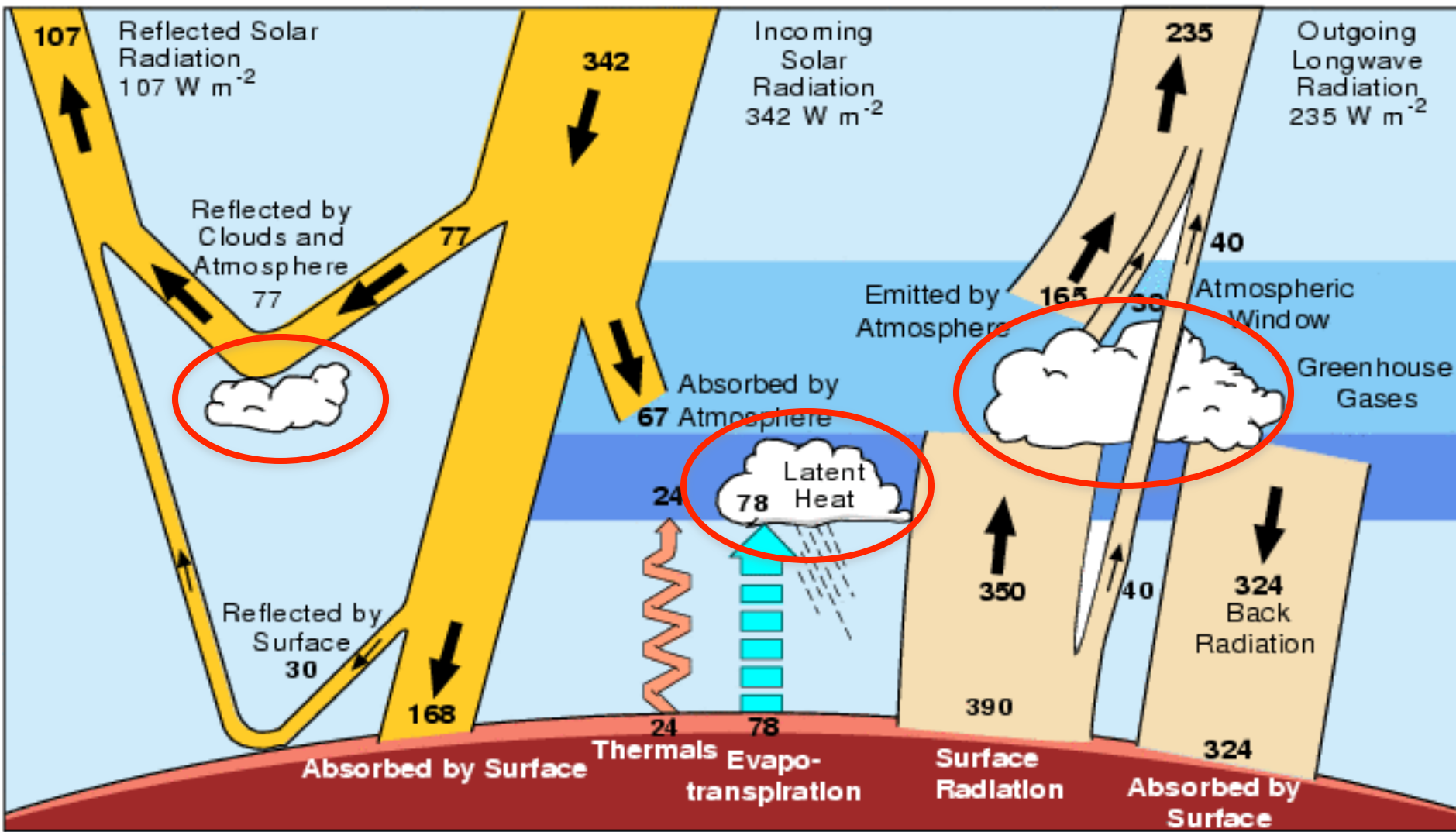




Kiehl and Trenberth 1997

## Średni bilans energii Ziemi

(uśredniony po całej planecie i po cyklu rocznym)



Kiehl and Trenberth 1997

## Średni bilans energii Ziemi

(uśredniony po całej planecie i po cyklu rocznym)

# Pośredni wpływ aerozoli na klimat

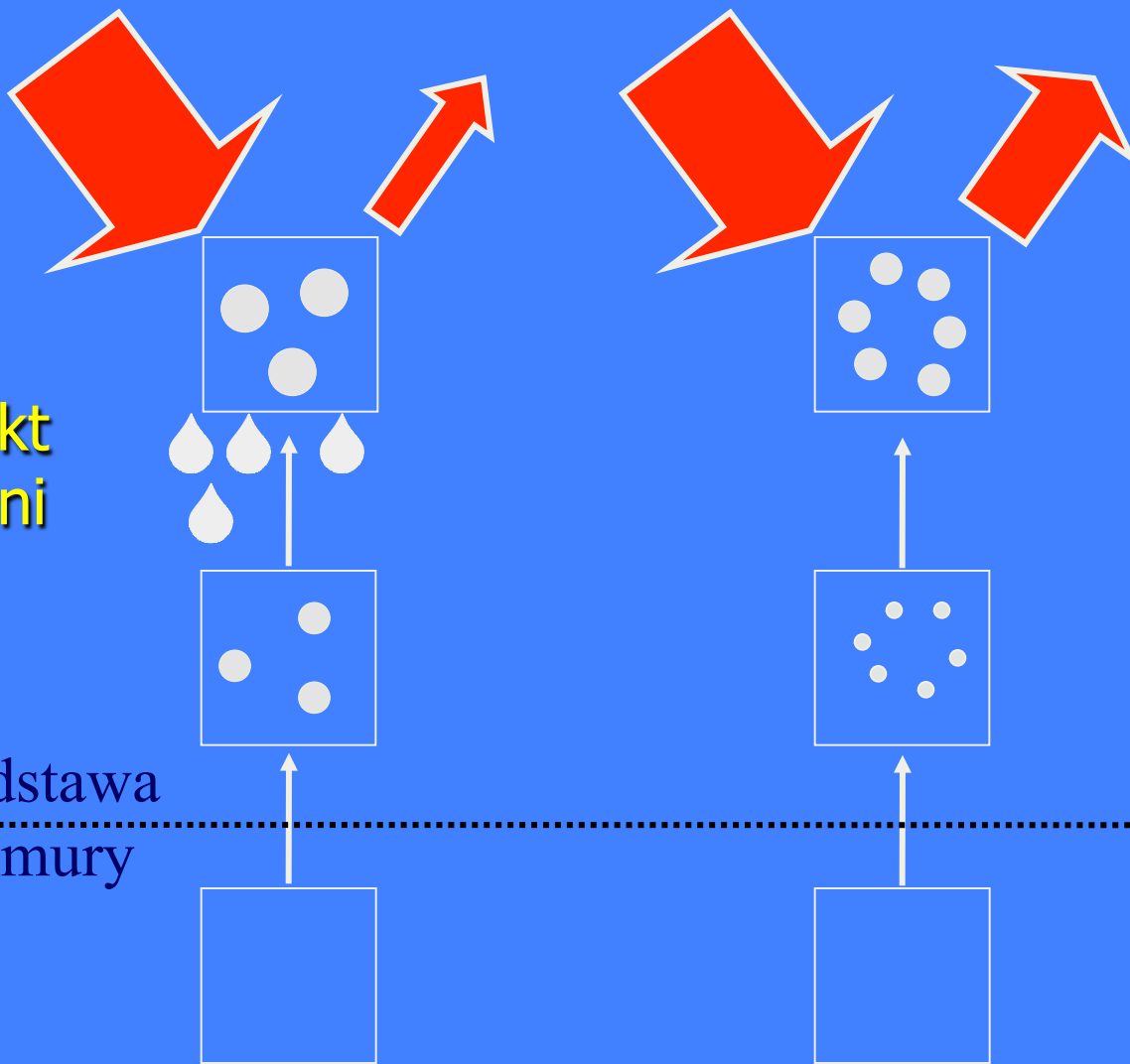
1szy efekt  
pośredni

2gi efekt  
pośredni

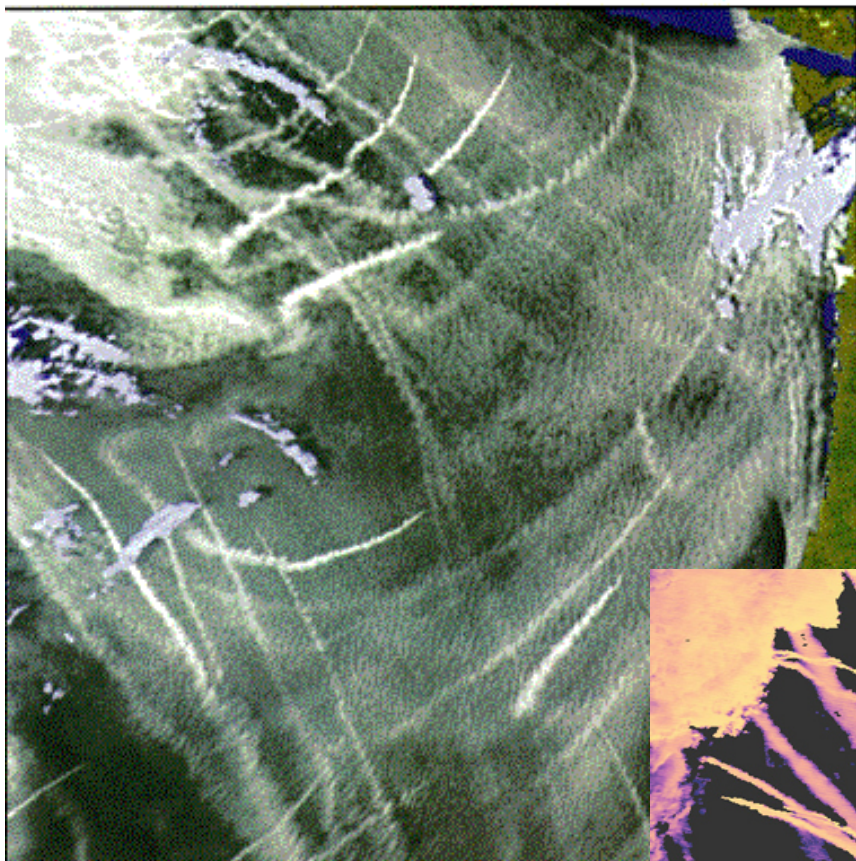
Podstawa  
chmury

czysty  
aerozol morski

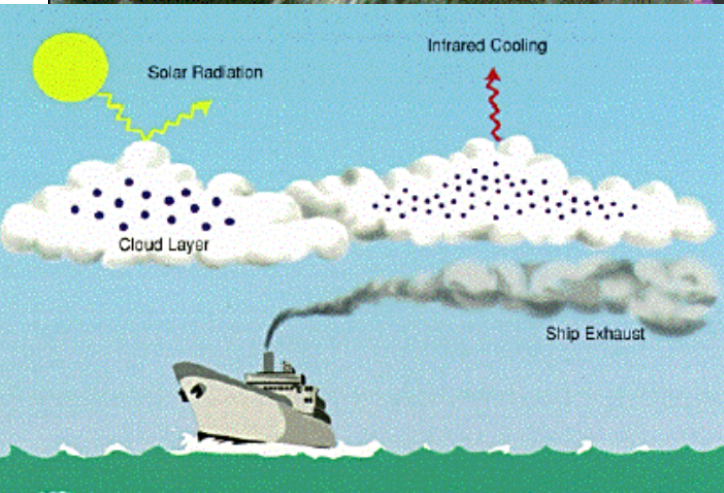
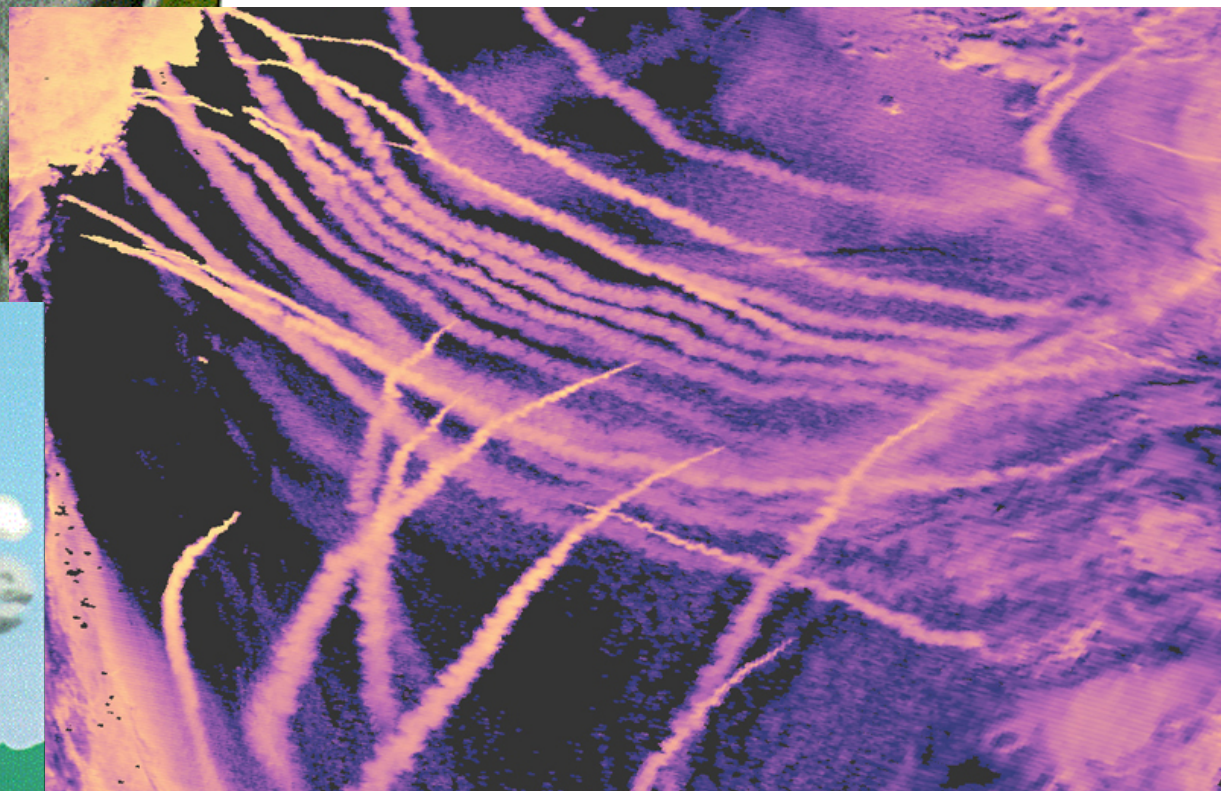
zanieczyszczony  
aerozol kontynentalny







*Ship tracks* (po polsku?):  
spektakularny przykład wpływu  
aerozoli na płytkie chmury  
warstwowe *stratocumulus* przy  
powierzchni Ziemi...



Dlaczego fizyka chmur jest awangardą  
meteorologii i klimatologii?

Bo chmury i opady stanowią kluczowy  
element pogody i klimatu...

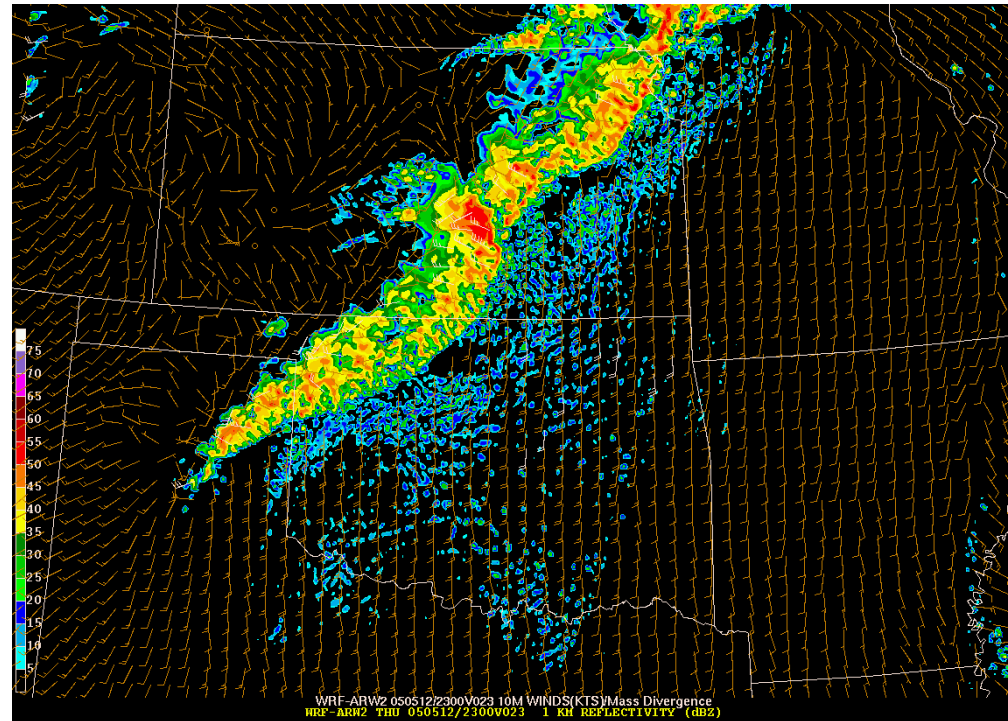
Bo modele pogody i klimatu osiągnęły już  
taki poziom zaawansowania, że chmury i  
opady są w nich reprezentowane *explicite*...





## Symulacja komputerowa pola chmurowego...

Symulacja linii szkwałowej (ang. *squal line*) modelem WRF (*Weather Research and Forecasting Model*) do przewidywania pogody. Rysunek przedstawia tzw. odbiciowość radarowa (ang. *radar reflectivity*) na wysokości 1 km nad ziemią obliczoną z danych modelu numerycznego (koncentracje i rozmiary cząstek chmurowych i opadowych).



# Czym klimat różni się od pogody?

“Klimat jest tym czego chcesz,  
pogoda jest tym co jest za oknem”

*“Climate is what you want, weather is what you get”*

Edward Lorenz (1917-2008)

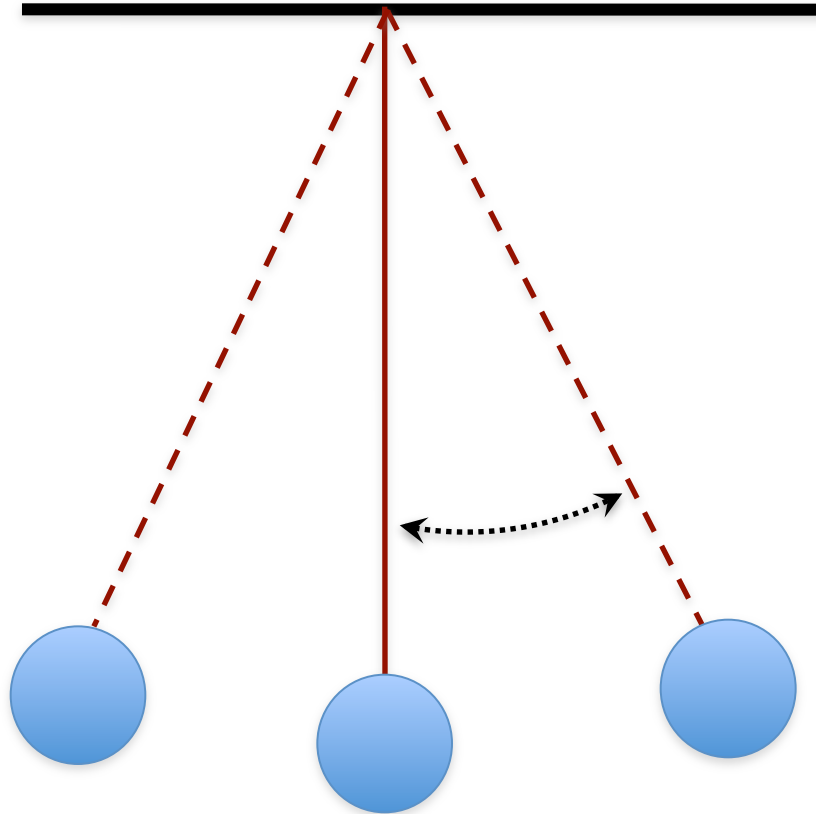
amerykański matematyk i meteorolog, pionier teorii chaosu

**Efekt motyla:** motyl machnięciem skrzydeł zmienia pogodę za kilka tygodni na drugiej stronie Ziemi...



# Pogoda a klimat

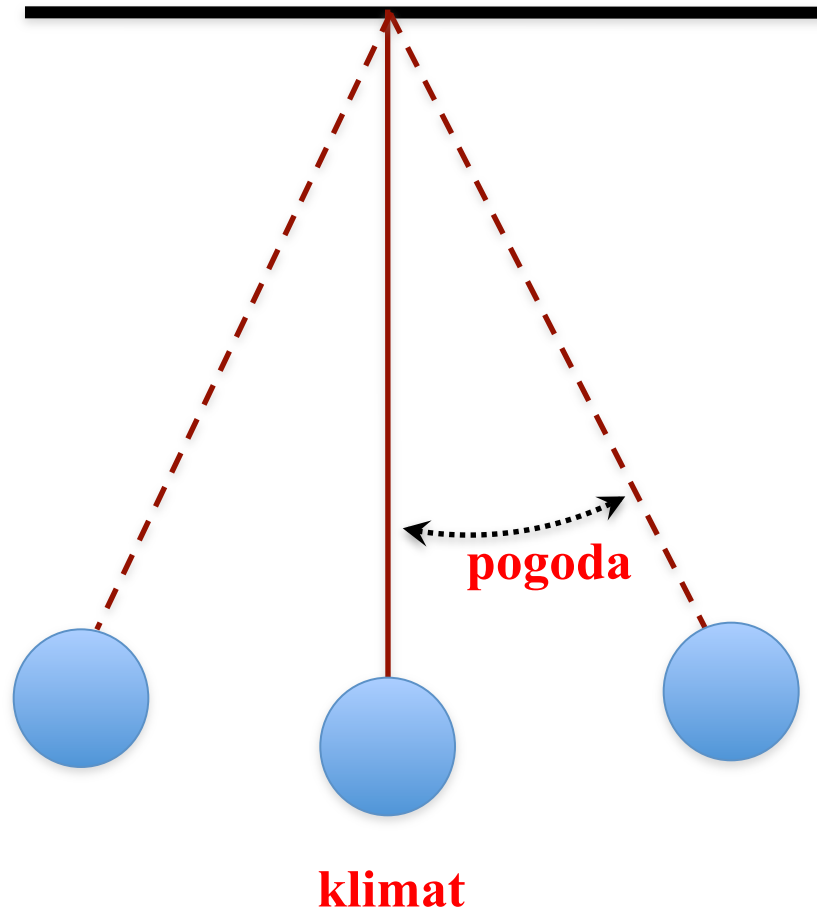
*prosty model koncepcyjny...*



Everything should be made as simple as possible, but not simpler (*Albert Einstein*)

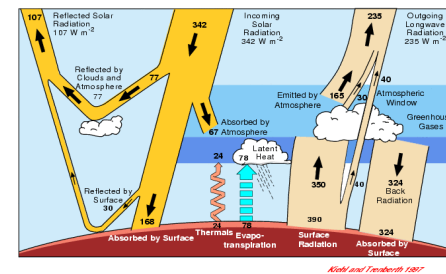
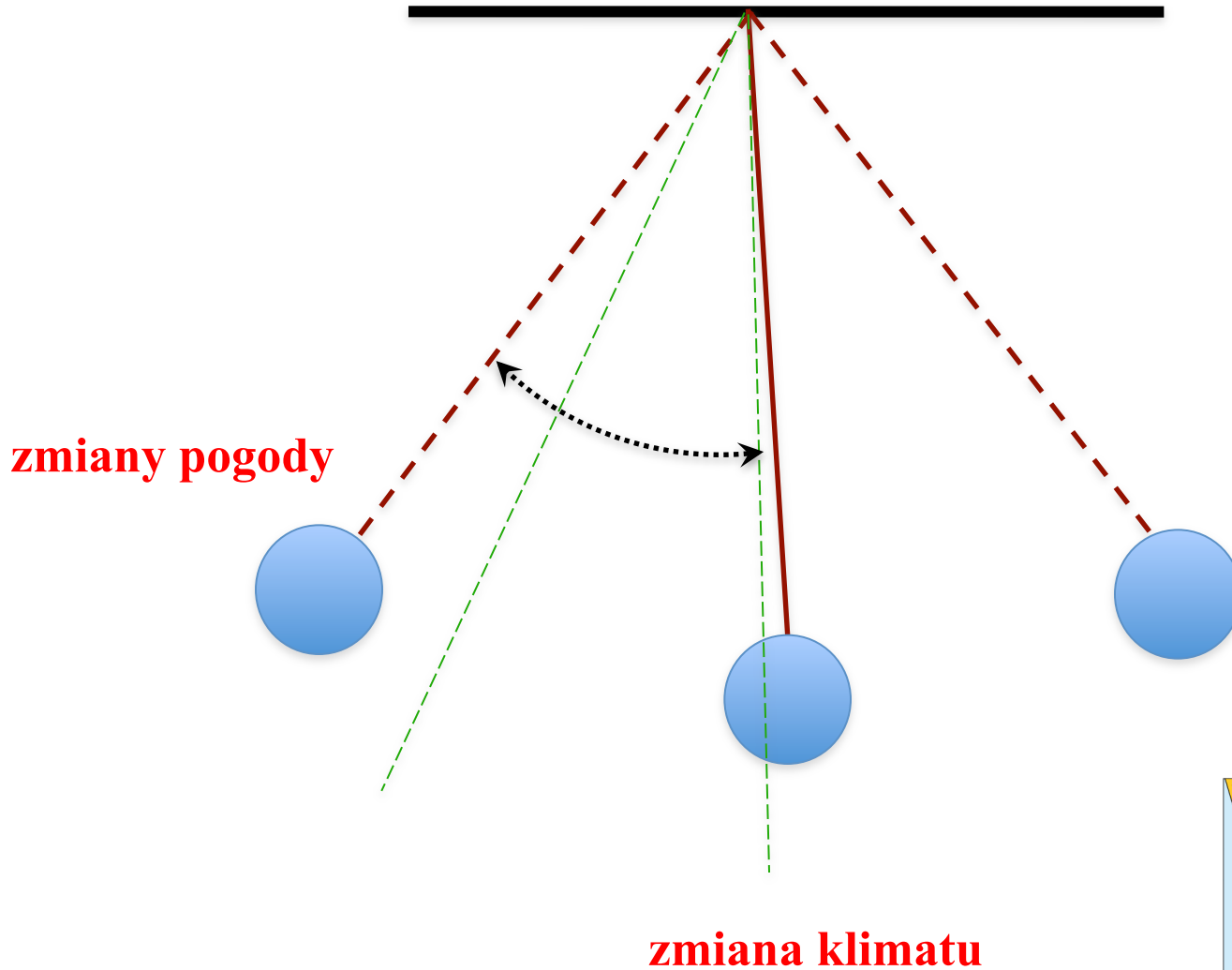
# Pogoda a klimat

*prosty model koncepcyjny...*



Everything should be made as simple as possible, but not simpler (*Albert Einstein*)

# Zmiana klimatu a zmiany pogody



Obecne zmiany klimatu to ok. 1% zmiany strumieni energii: kilka  $W m^2$  względem ok  $340 W m^2$



## **Głos sceptyka:**

**“Modele nie potrafią przewidzieć pogody na kilka dni do przodu, jak więc mogą one przewidzieć co dzieje się z klimatem?”**

# Pogoda i klimat to dwie różne rzeczy!!!



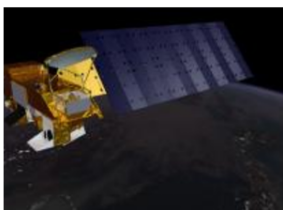
**Pogoda: rzut kostką**  
*nie do przewidzenia*

**Klimat: wynik wielu rzutów**  
*wiadomo jaki będzie wynik*



## Czy i dlaczego klimat Ziemi się zmienia?

Czy i dlaczego klimat Ziemi się zmienia? Jakie są najnowsze wyniki badań klimatycznych? Tymi zagadnieniami zajmować się będzie nasz nowy serwis, Nauka o klimacie.



## Mit: Nie ma empirycznych dowodów na antropogeniczność globalnego ocieplenia

W nauce istnieje tylko jedna rzecz lepsza niż wynik pomiaru – zgodne wyniki wielu niezależnych pomiarów wykonanych różnymi metodami. W przypadku globalnego ocieplenia takie właśnie istnieją.



## Efekt cieplarniany - jak to działa

Średnią temperaturą atmosfery rządzi jej bilans energetyczny, w którym istotną rolę odgrywa promieniowanie podczerwone oraz, oczywiście, efekt cieplarniany.



## Mit: Nauka nie jest zgodna w temacie globalnego ocieplenia

97% naukowców zajmujących się klimatem nie ma wątpliwości - to człowiek ma kluczowy wpływ na trwające globalne ocieplenie.

## DANE I SYMULACJE



## NAJPOPULARNIEJSZE MITY

**Mit** Nie ma empirycznych dowodów na antropogeniczność globalnego ocieplenia

**Mit** Dwutlenek węgla emitowany przez człowieka nie ma znaczenia

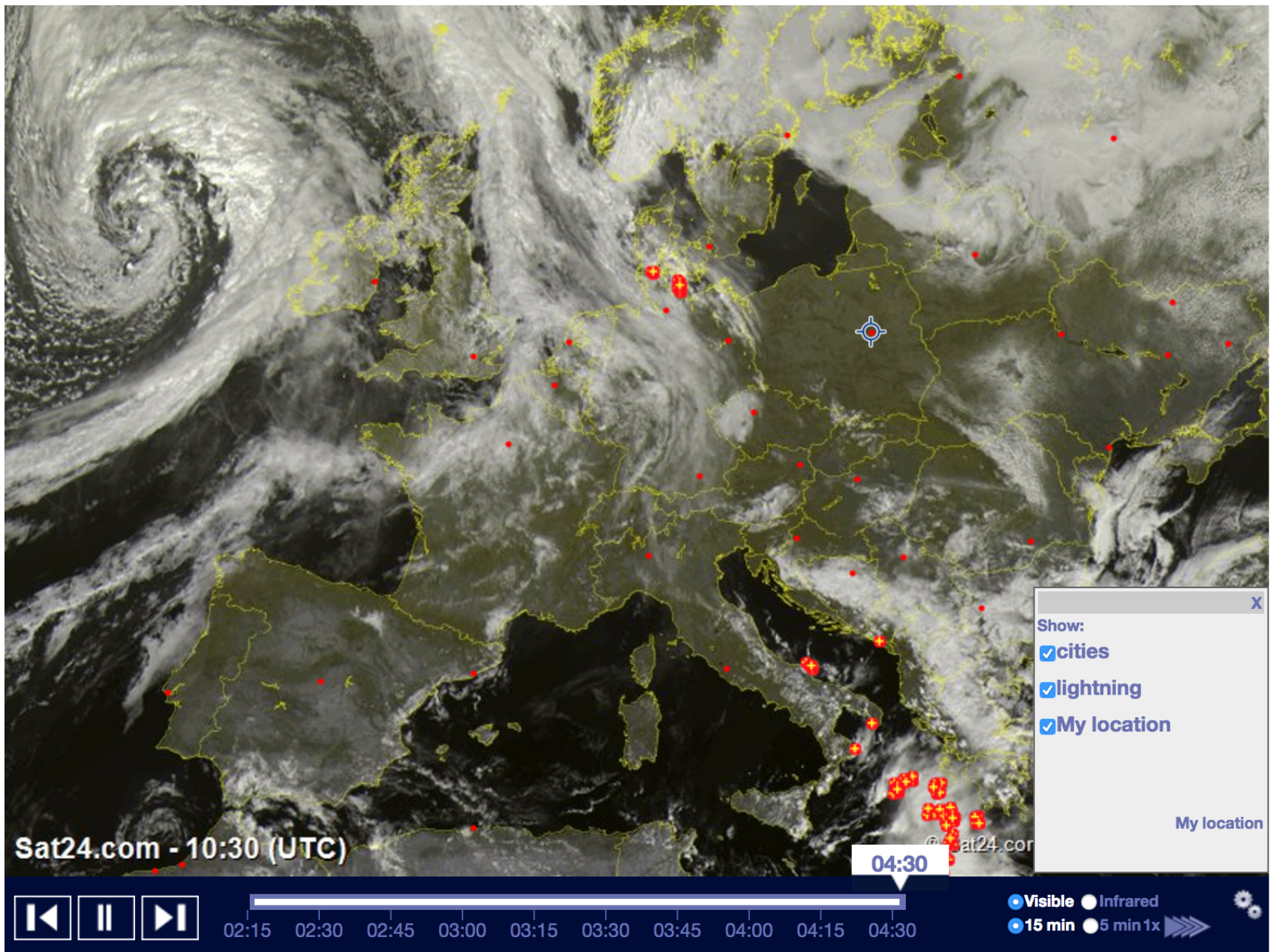
**Mit** Rząd Światowy kontroluje klimat za pomocą chemtrails

**Mit** Nawet stopienie całego lodu na Ziemi nie podniesie poziomu morza

**Mit** Wulkany emitują więcej dwutlenku węgla niż człowiek

[więcej »](#)

*Skąd biorą się lepsze prognozy pogody?*



Chmury widziane przez satelitę dziś koło południa...

sat24.com



Dobre prognozy pogody wymagają wielkiego potencjału ludzkiego i olbrzymich mocy obliczeniowych. To zadanie z wielkim sukcesem realizuje od kilkadziesiąt lat Europejskie Centrum Średnioterminowych Prognoz Pogody (*European Centre for Mediumrange Weather Forecasts*), mające swoją siedzibę w Reading, Anglia. Jest to ponadnarodowe konsorcjum finansowane ze składek krajów członkowskich.

## Who we are

[Governance](#)[Member States](#)[History](#)[Official documents](#)[Representatives](#)

[www.ecmwf.int](http://www.ecmwf.int)

Read some of our [key facts and figures](#)

Read our [newsletters](#), [corporate brochures](#) and [annual reports](#)



ECMWF holds ISO9001:2015 certification and, wherever practical, requires that its suppliers also hold such certification.



Kraje członkowskie (ciemny) i stowarzyszone (jasny) ECMWF.

*Jak poprawić symulacje klimatu, a w szczególności reprezentację chmur?*

*Jak poprawić symulacje klimatu, a w szczególności reprezentację chmur?*

*Używając modelu w którym chmury są symulowane *explicite!*...*

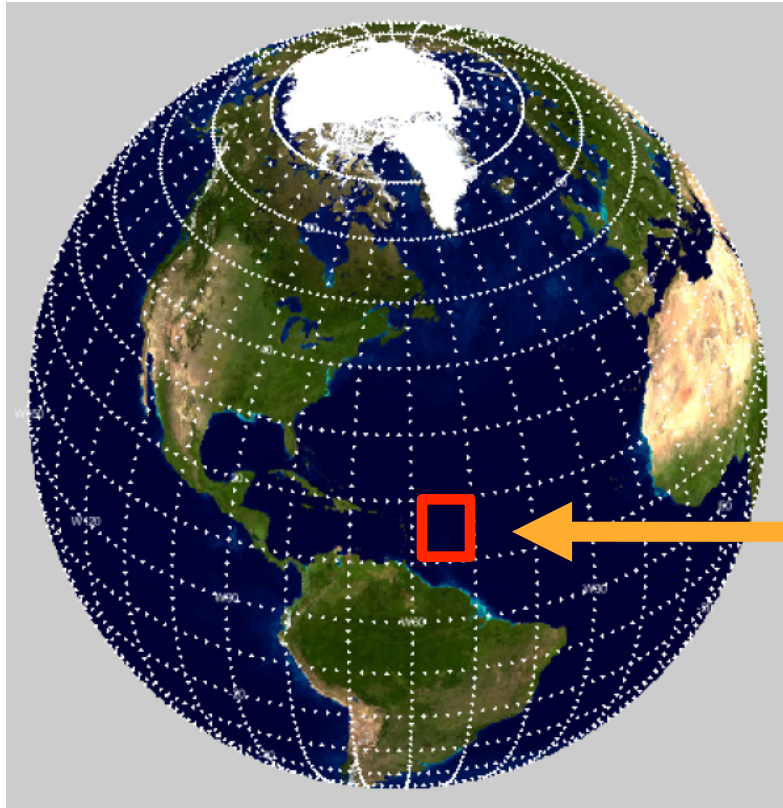


Modelowanie klimatu wymaga gigantycznych mocy obliczeniowych, głównie ze względu na długość symulowanego okresu czasu (setki i tysiące lat).

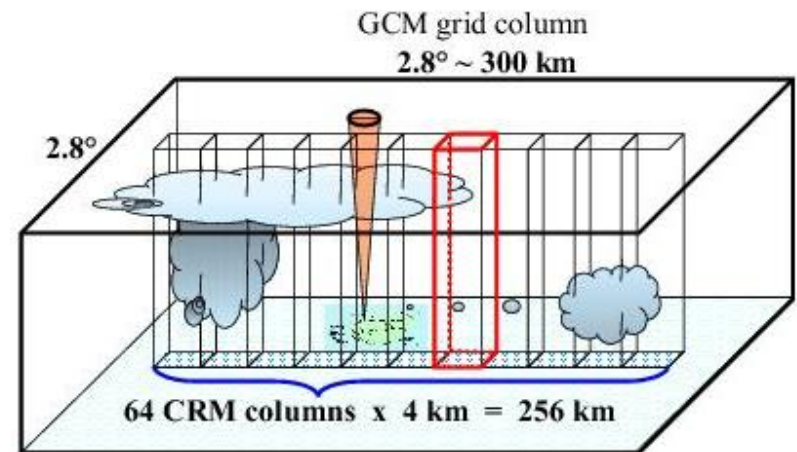
Rozwiązanie które zaproponowałem 20 lat temu, znane jako “**super-parametryzacja**” pchnęło modelowanie klimatu na nowe tory...



logo supermena



### Super-Parameterization



“Multi-scale modeling framework”

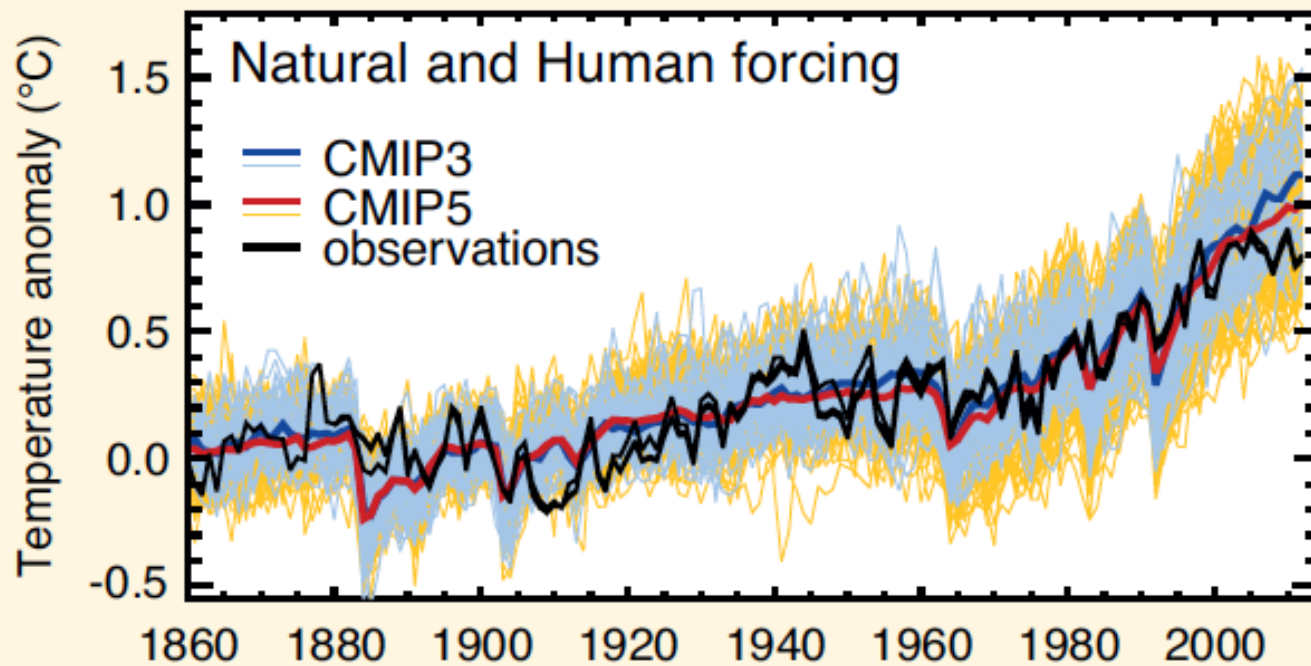
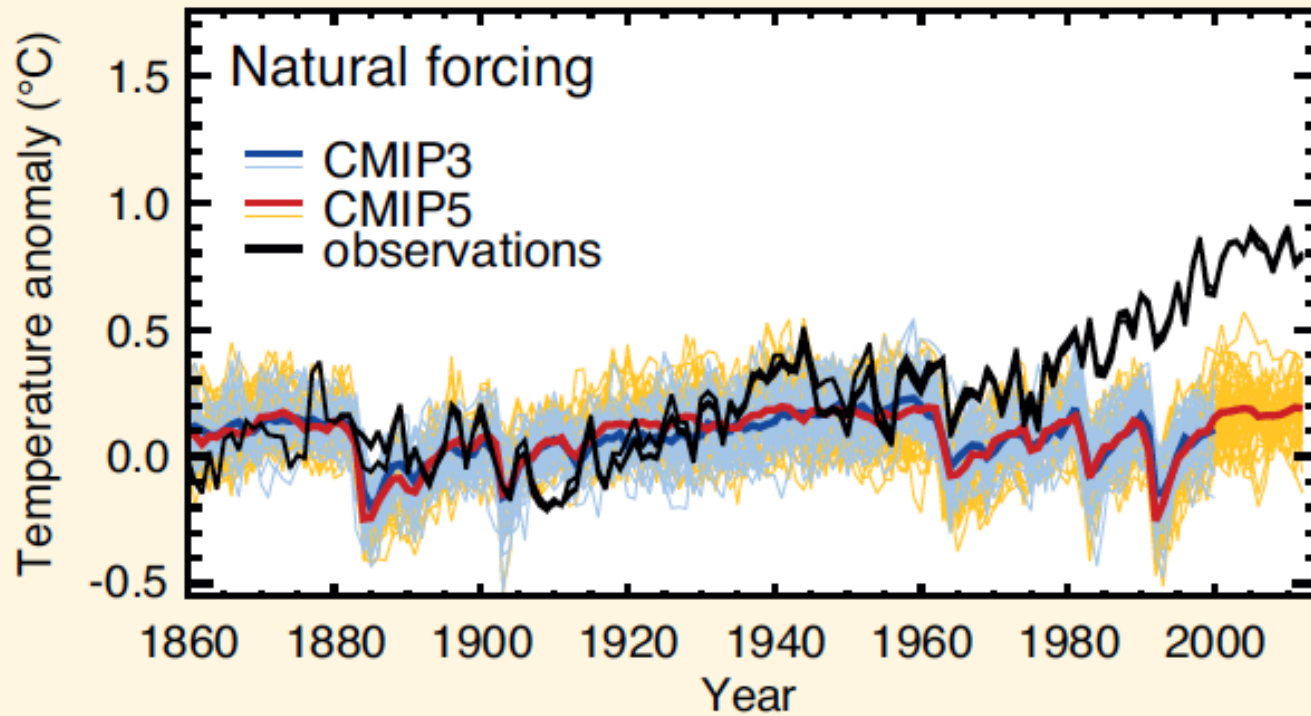


## Podsumowanie:

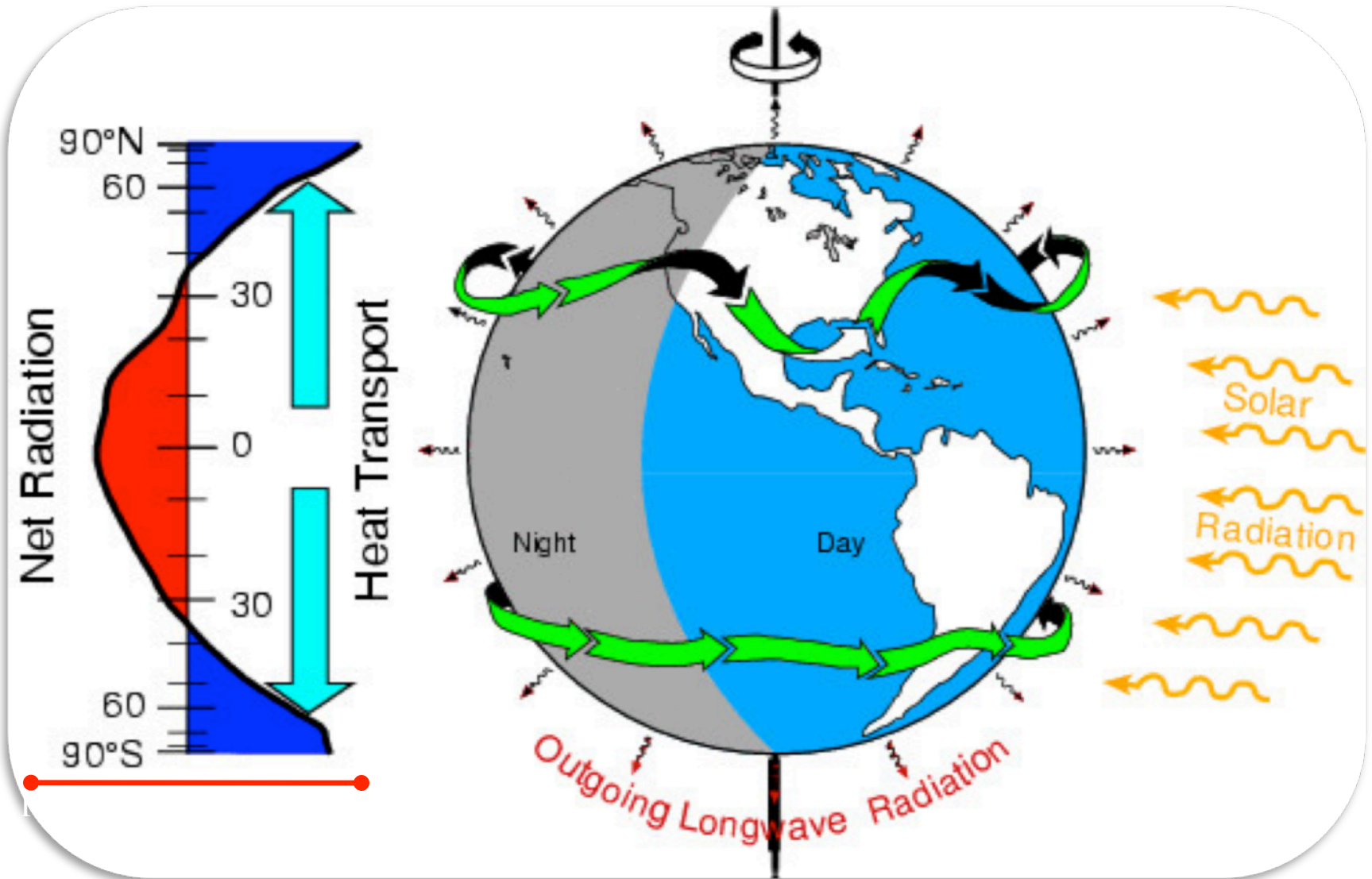
**Fizyka chmur przeszła w ostatnich dziesięcioleciach olbrzymią transformację: od pobocznej (niechcianej?) gałęzi fizyki do awangardy fizyki pogody i klimatu.**

**Obserwacje chmur (samoloty, satelity, etc), badania laboratoryjne (np. komory chmurowe), teoria oraz modelowanie numeryczne pozwalają na głębsze zrozumienie roli chmur w procesach pogodowych i wpływu chmur na klimat i jego zmiany.**

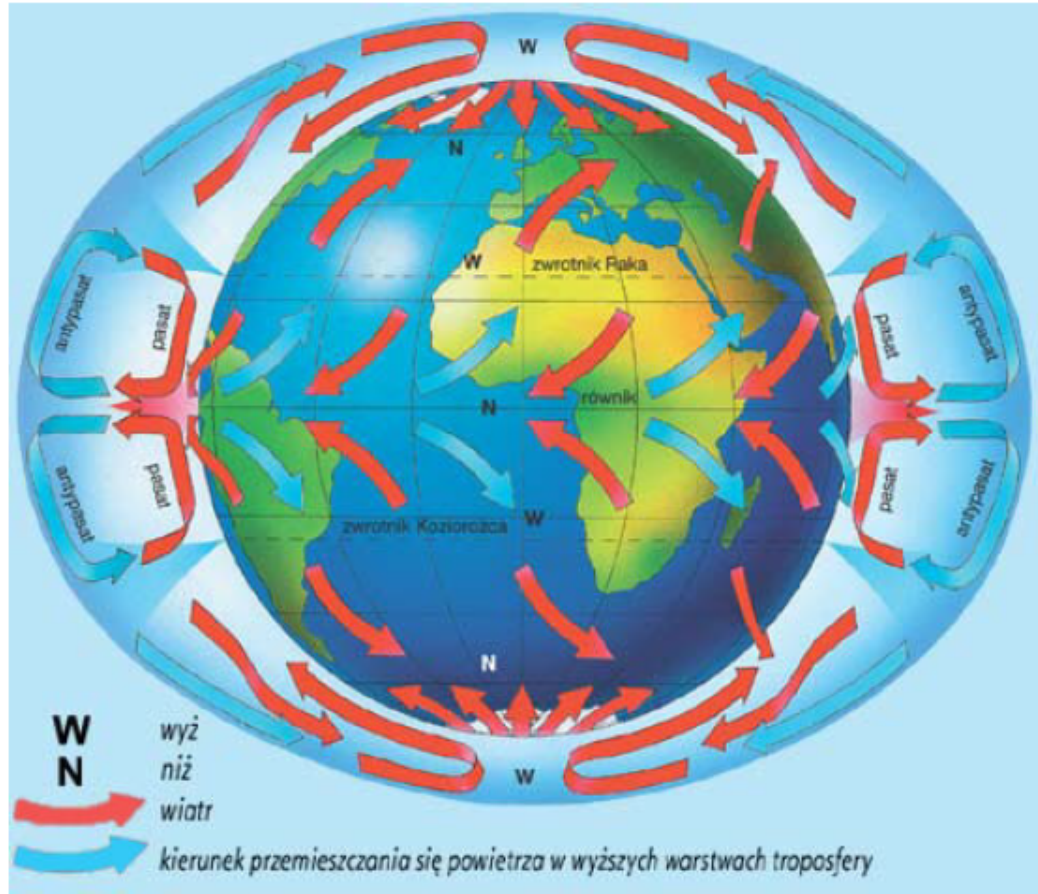
**To wyzwanie dla naukowców, ale i możliwość prowadzenia badań o kluczowym znaczeniu dla przyszłych pokoleń.**



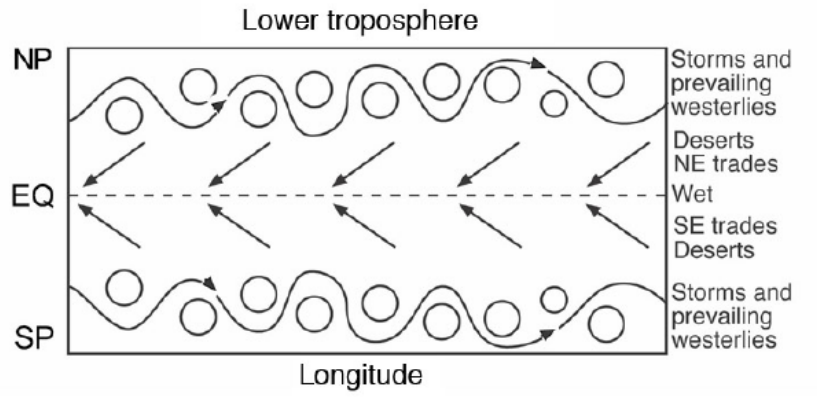
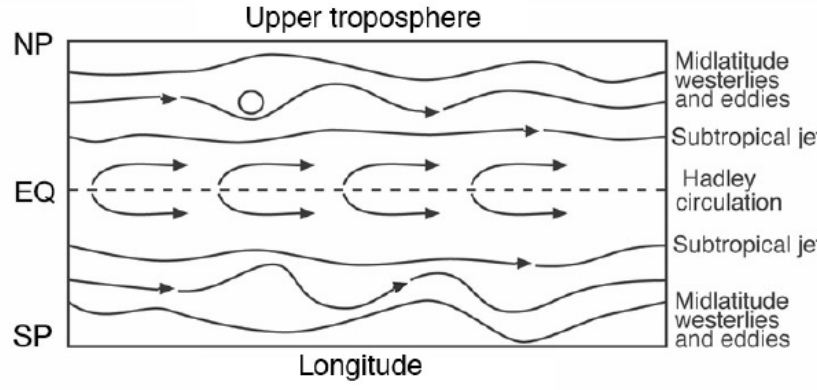
# Top-of-atmosphere net (solar minus Earth longwave) radiative flux



**SCHEMAT OGÓLNEJ CYRKULACJI ATMOSFERY**



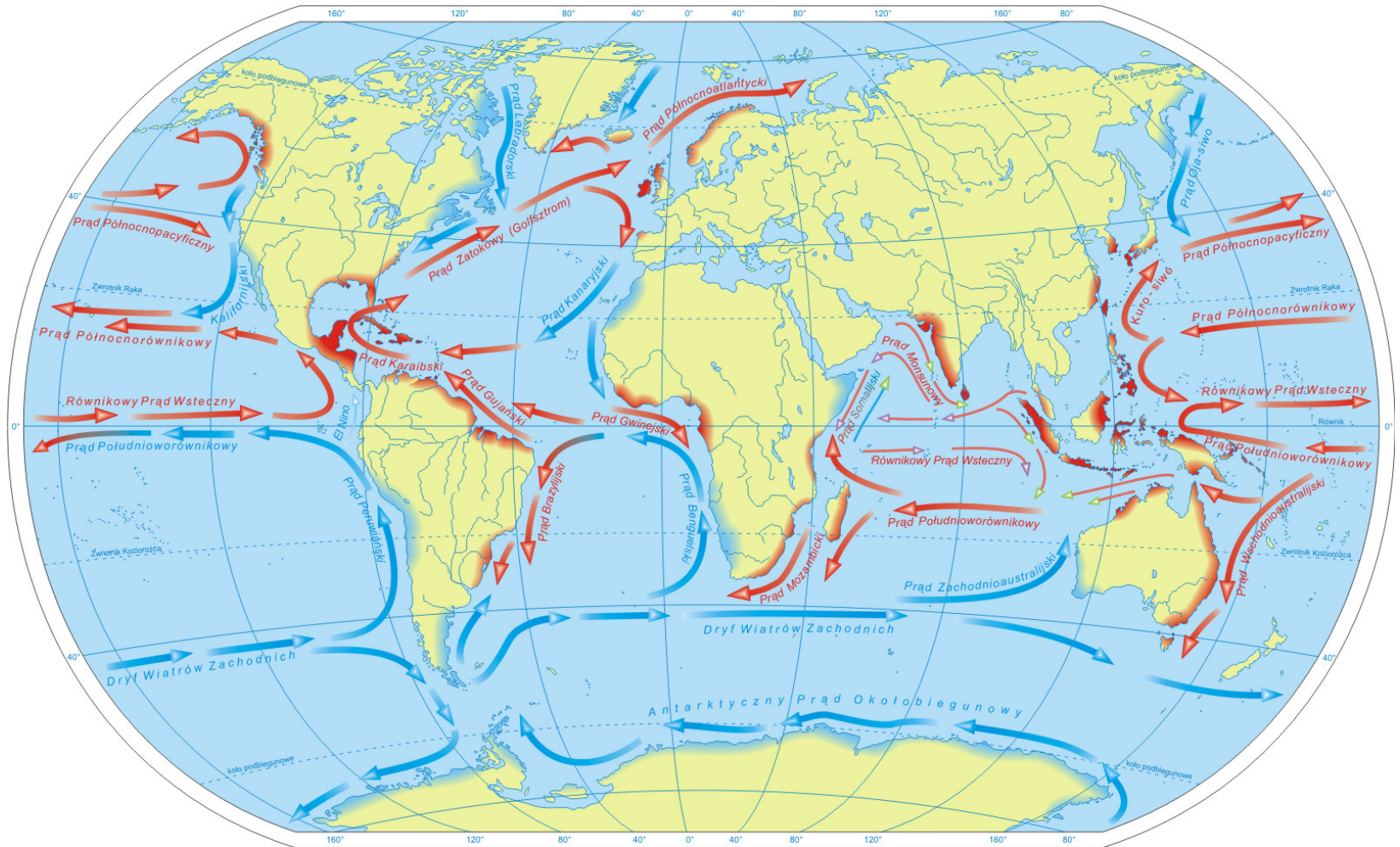
[http://www.wiking.edu.pl/article\\_print.php?id=898](http://www.wiking.edu.pl/article_print.php?id=898)



Ogólna cyrkulacja atmosfery: transport energii od równika w kierunku biegunów...



# Prądy oceaniczne



<http://scholaris.pl/resources/run/id/60822>

Znacząca część transportu energii od równika do biegunów odbywa się poprzez cyrkulację oceanu...  
(pojemność cieplna całej atmosfery odpowiada kilku metrom wody)