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

The National Center for Atmospheric Research
NCAR
managed by UCAR to serve the community
sponsored by NSF

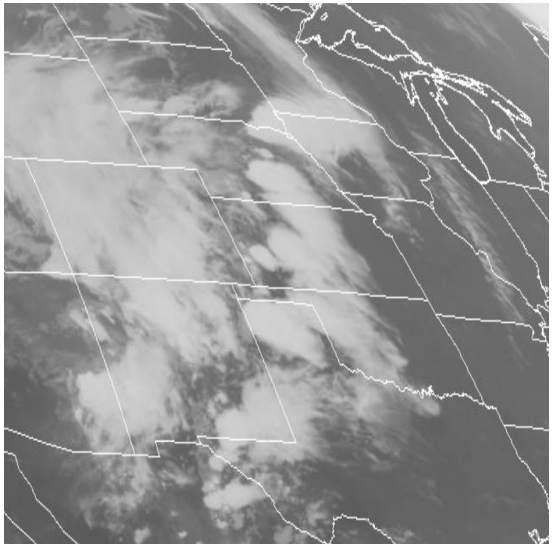
NARODOWE CENTRUM NAUKI

UNIVERSITY OF WARSAW

Ziemia w świetle widzialnym



Mezoskalowe układy konwekcyjne (USA)

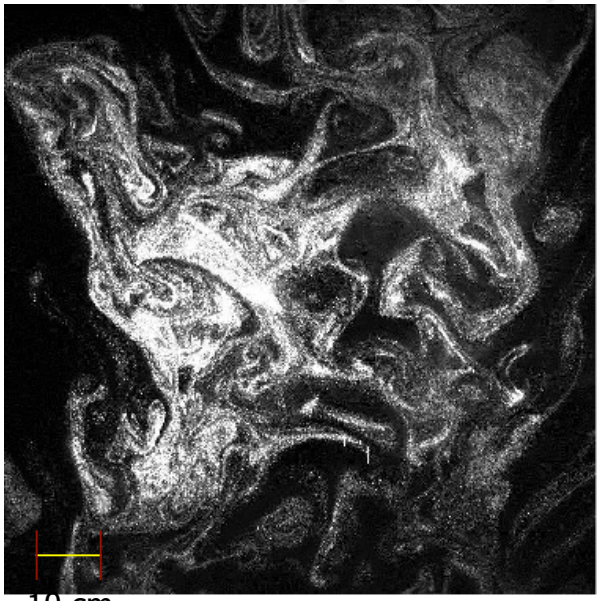


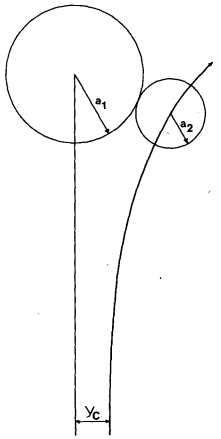
Chmury i klimat: ~10 rzędów wielkości skal przestrzennych…

Małe chmury cumulus



Mieszanie w komorze chmurowej (IGF, FUW)

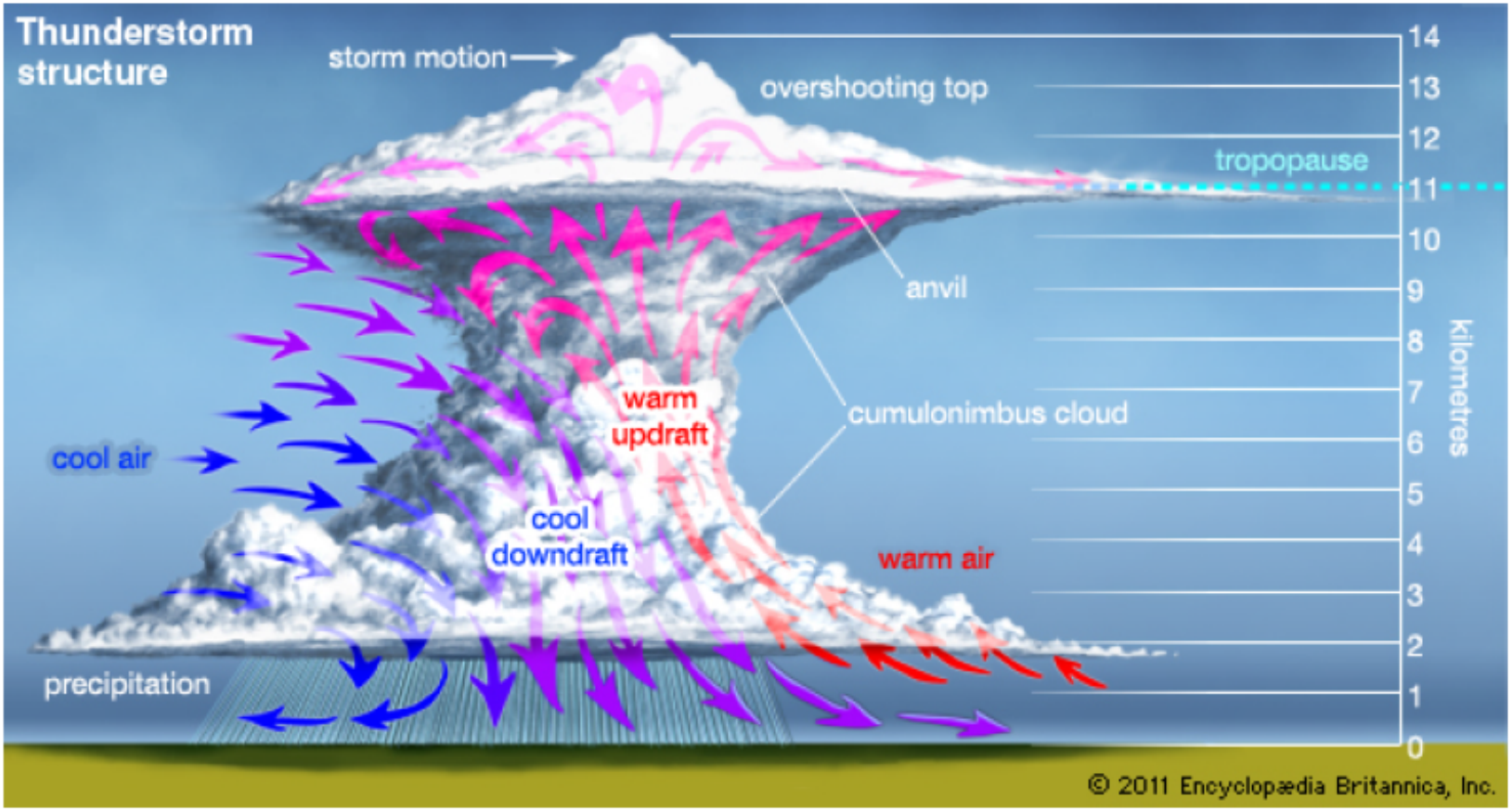




Geometria zderzenia kropelek chmurowych

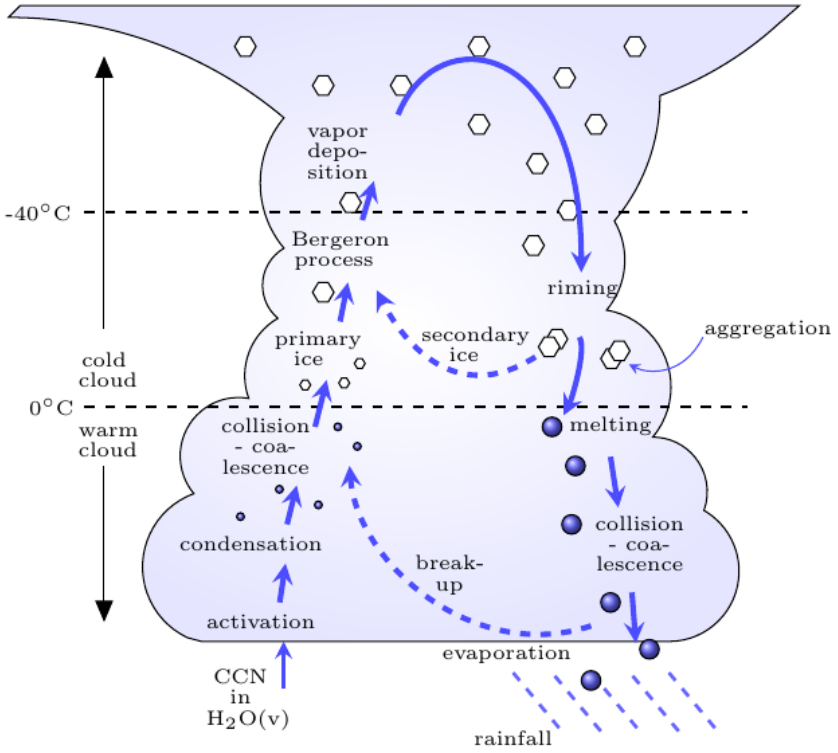
Fizyka chmur zajmuje sie procesami, które prowadzą do powstawania chmur i opadów.

dynamika chmur – ruch powietrza

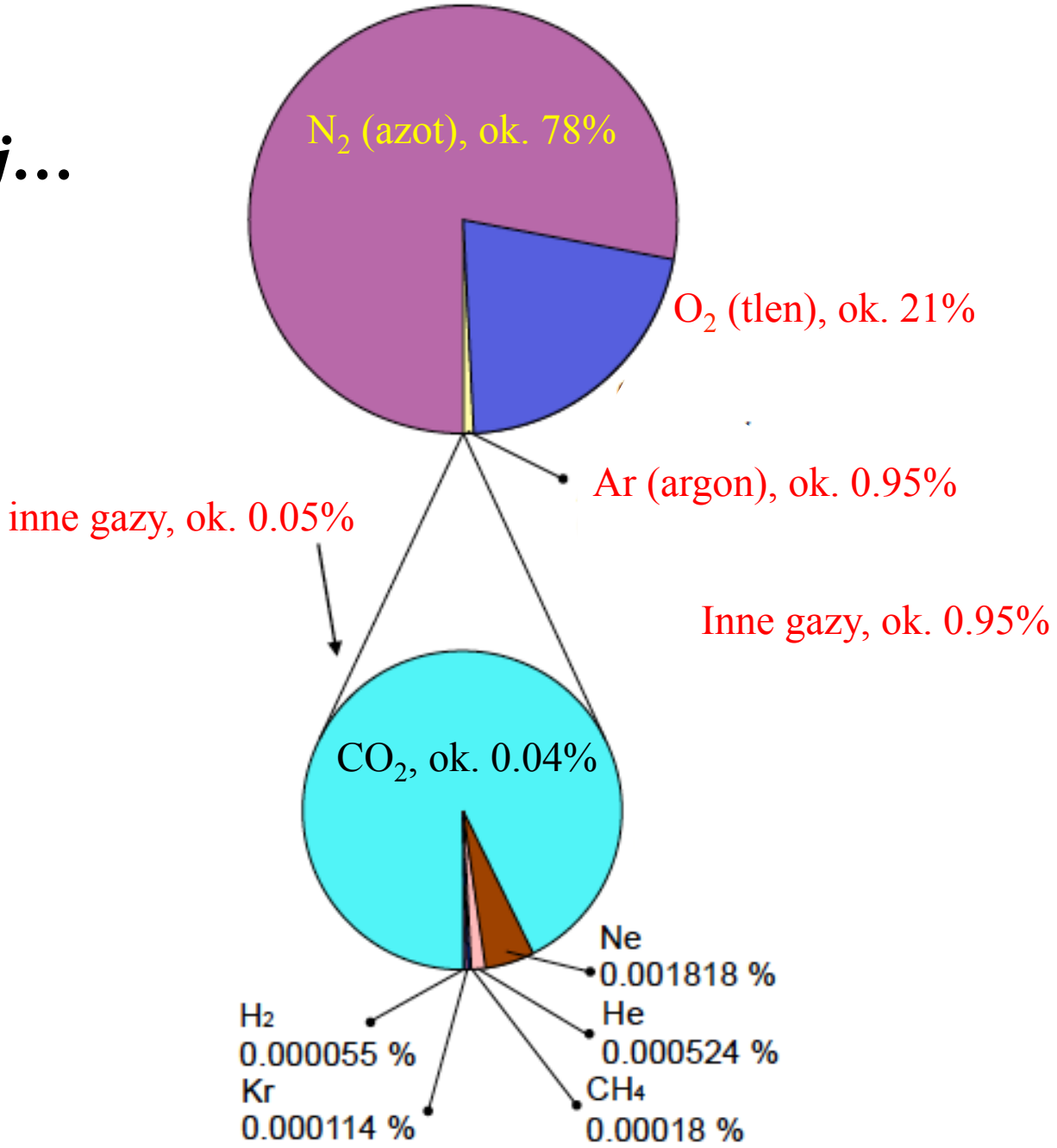


Fizyka chmur zajmuje sie procesami, które prowadzą do powstawania chmur i opadów.

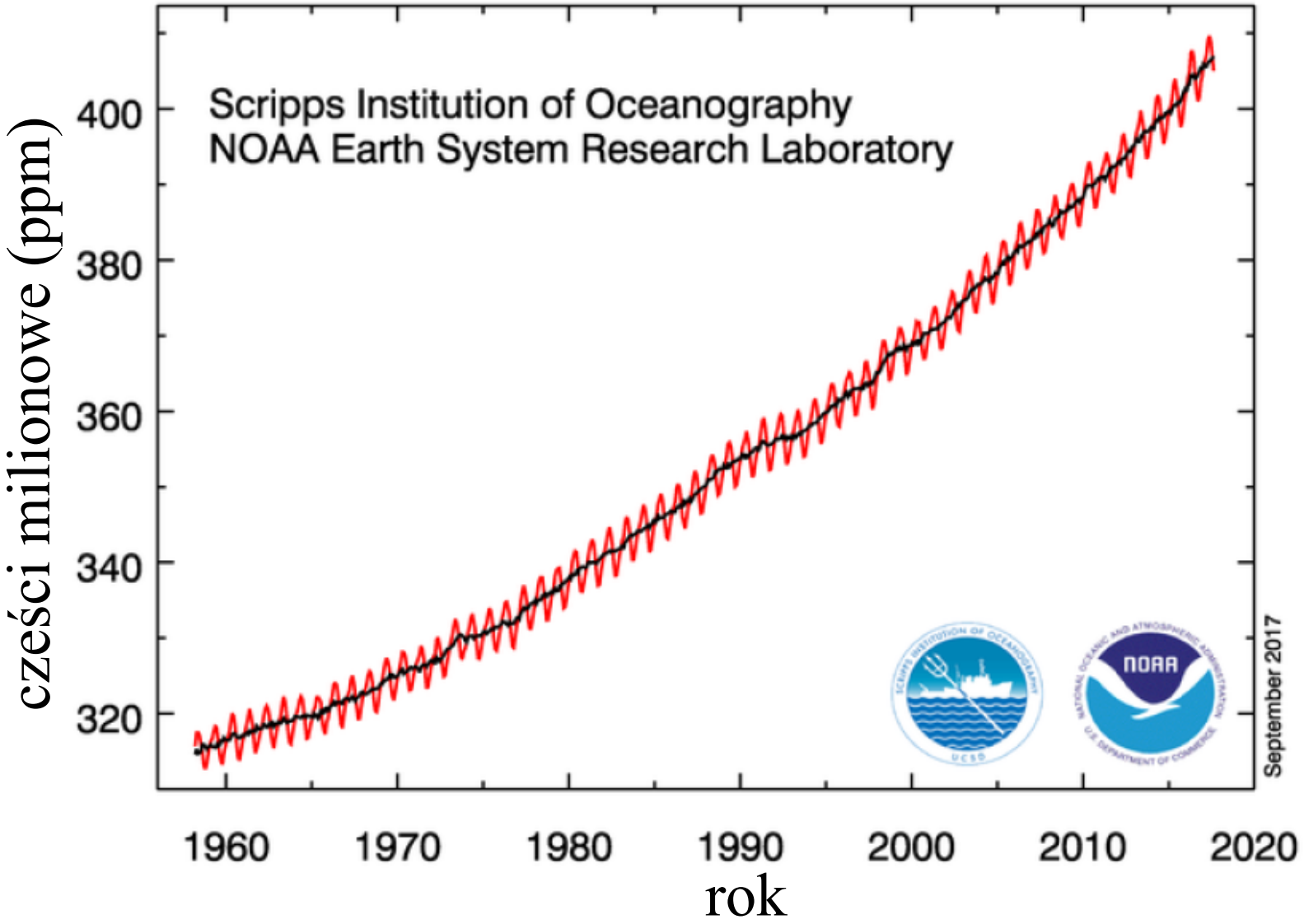
mikrofizyka chmur – powstawanie cząstek chmurowych i opadowych



Powietrze "suche",
tzn., bez pary wodnej…



Zawartość CO_2 na szczycie obserwatorium Mauna Loa (Hawaje)



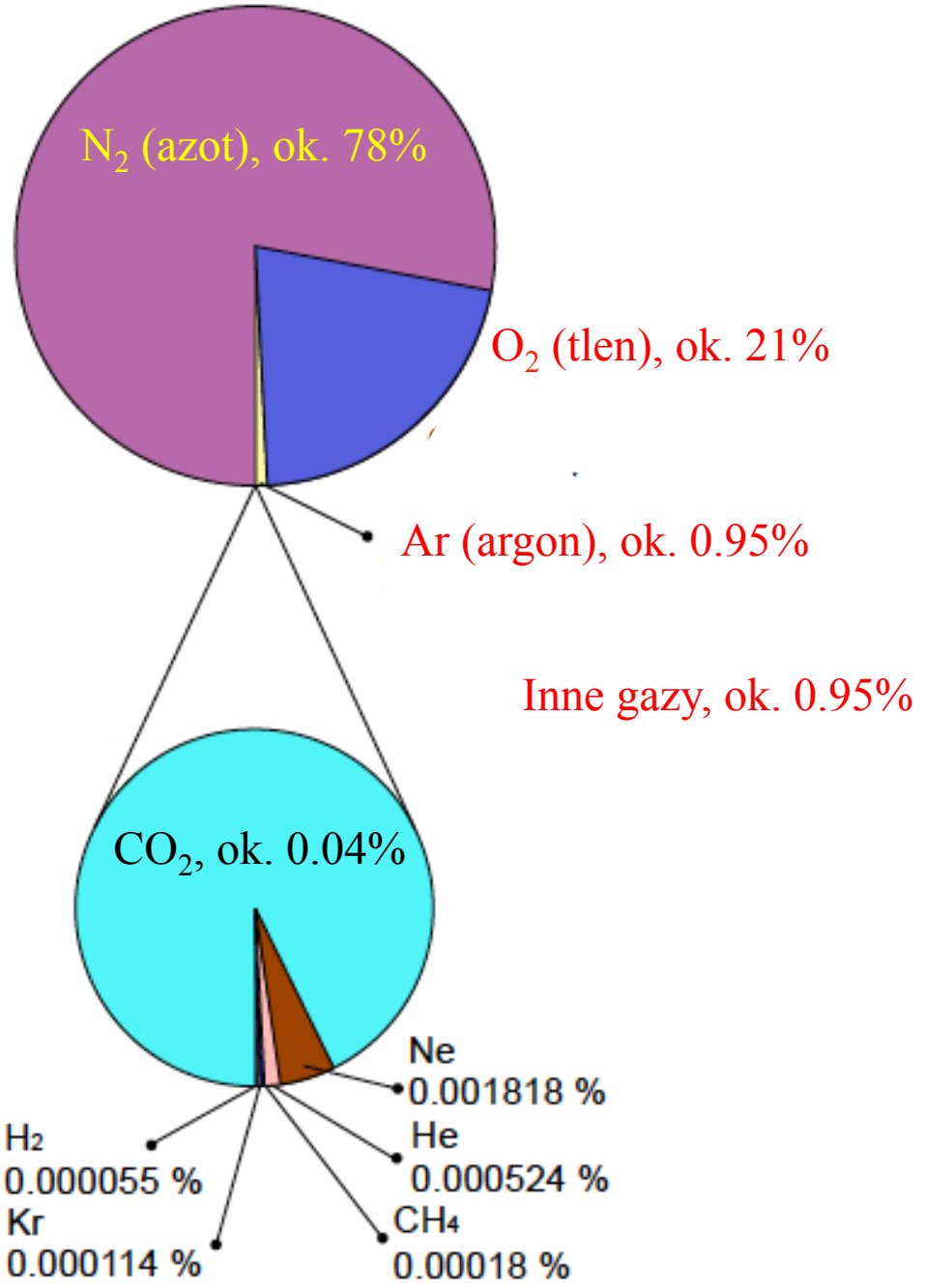
https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/full.html

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** skondensowanei wody

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

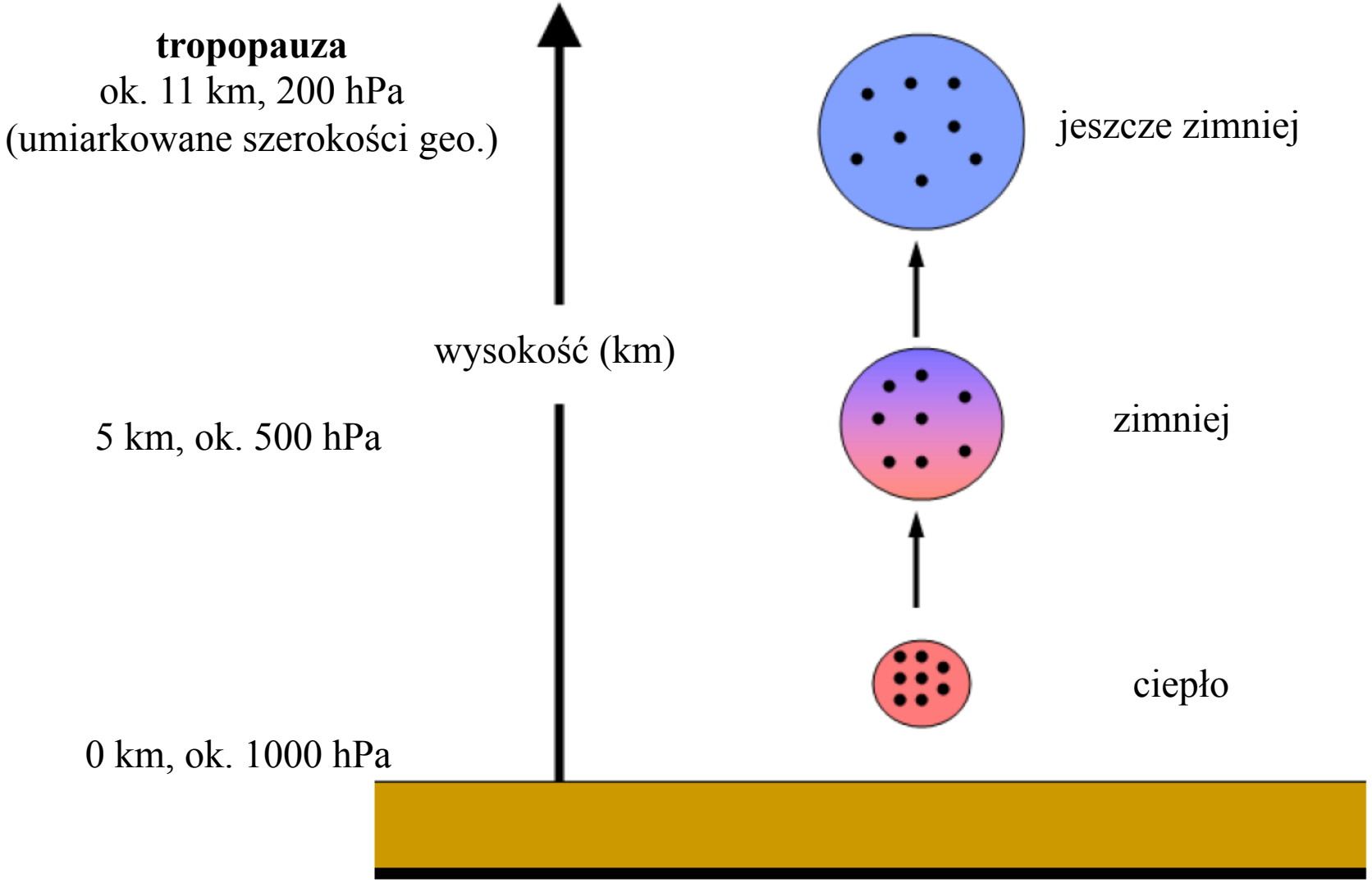
“Nagle - gwizd!
Nagle - świst!
Para - buch!
Koła - w ruch!”
Julian Tuwim, *Lokomotywa*











Cząstka powietrza wznosząca się w atmosferze…











Grabowski, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 2016

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

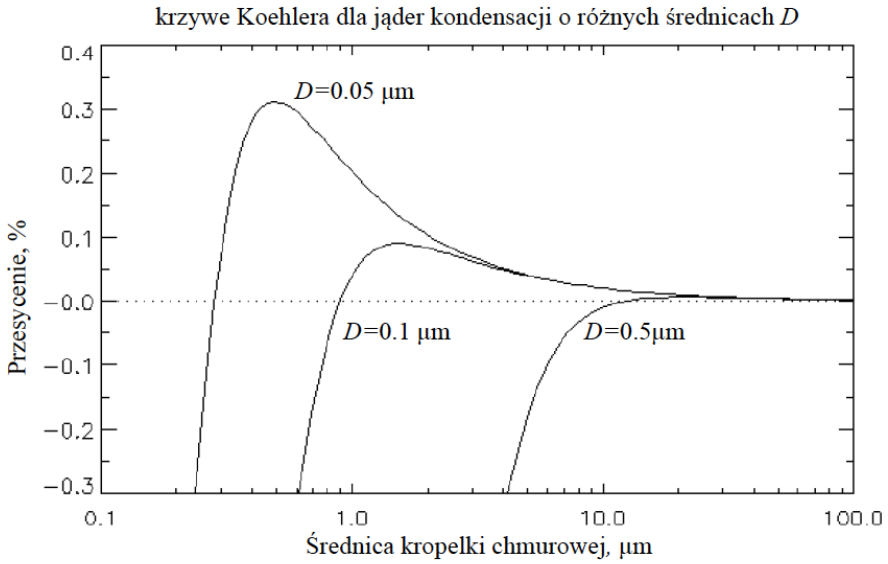
Chmury “ciepłe” – tzn. bez lodu, np. nie siegajace do 0^{o}C (4-5 km w tropikach)



Kropelki chmurowe powstają na tzw. jądrach kondensacji (*cloud condensation nuclei*, CCN). CCN to zazwyczaj dobrze rozpuszczalne sole [np. NaCl, $(NH_4)_2SO_4$].



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



Rozmiary kropel wody w chmurach

NB: średnica ludzkiego włosa to zazwyczaj kilkadziesiąt μm

typowa kropla chmurowa 10 μm



typowe jądro kondensacji 0.1 μm



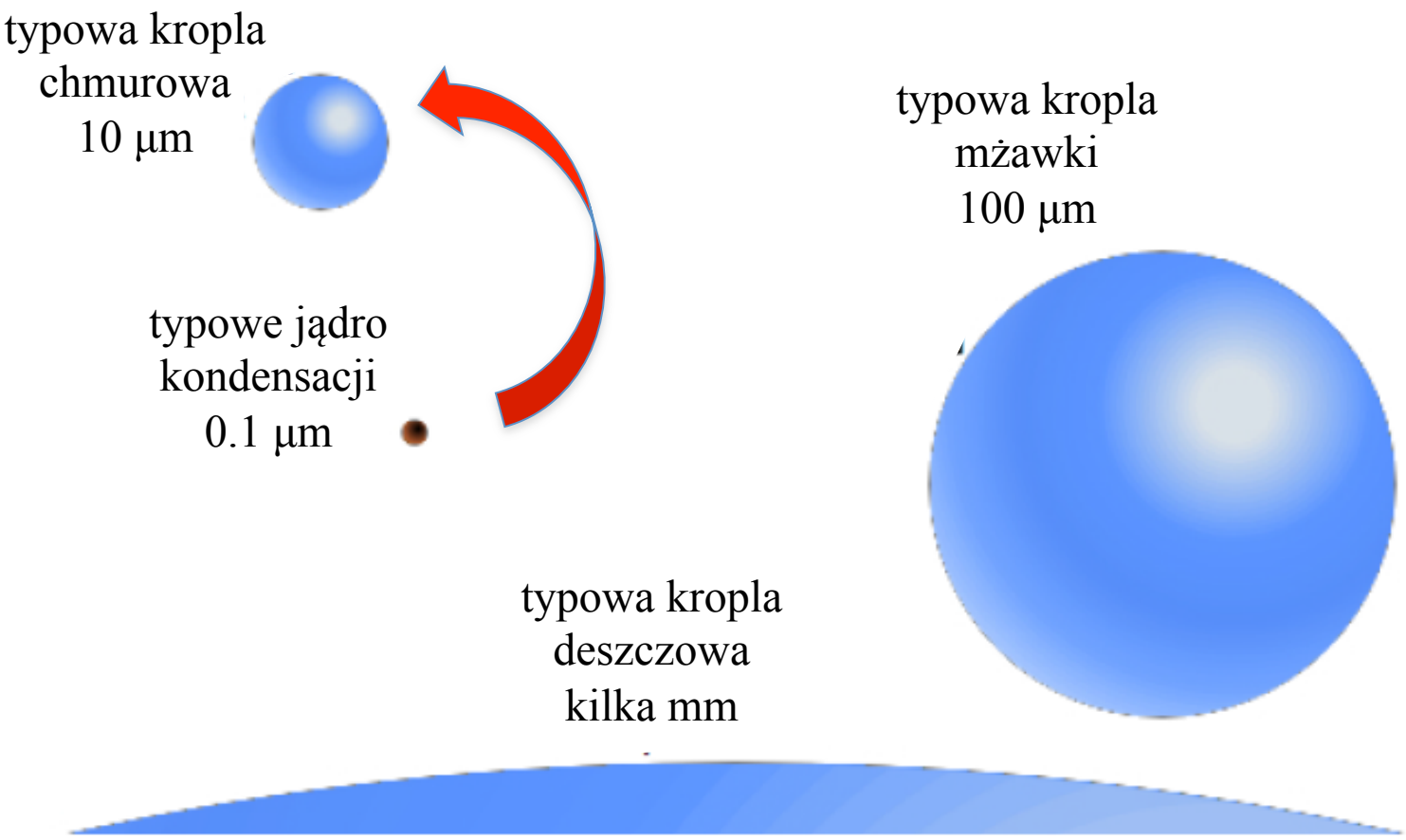
typowa kropla mżawki 100 μm

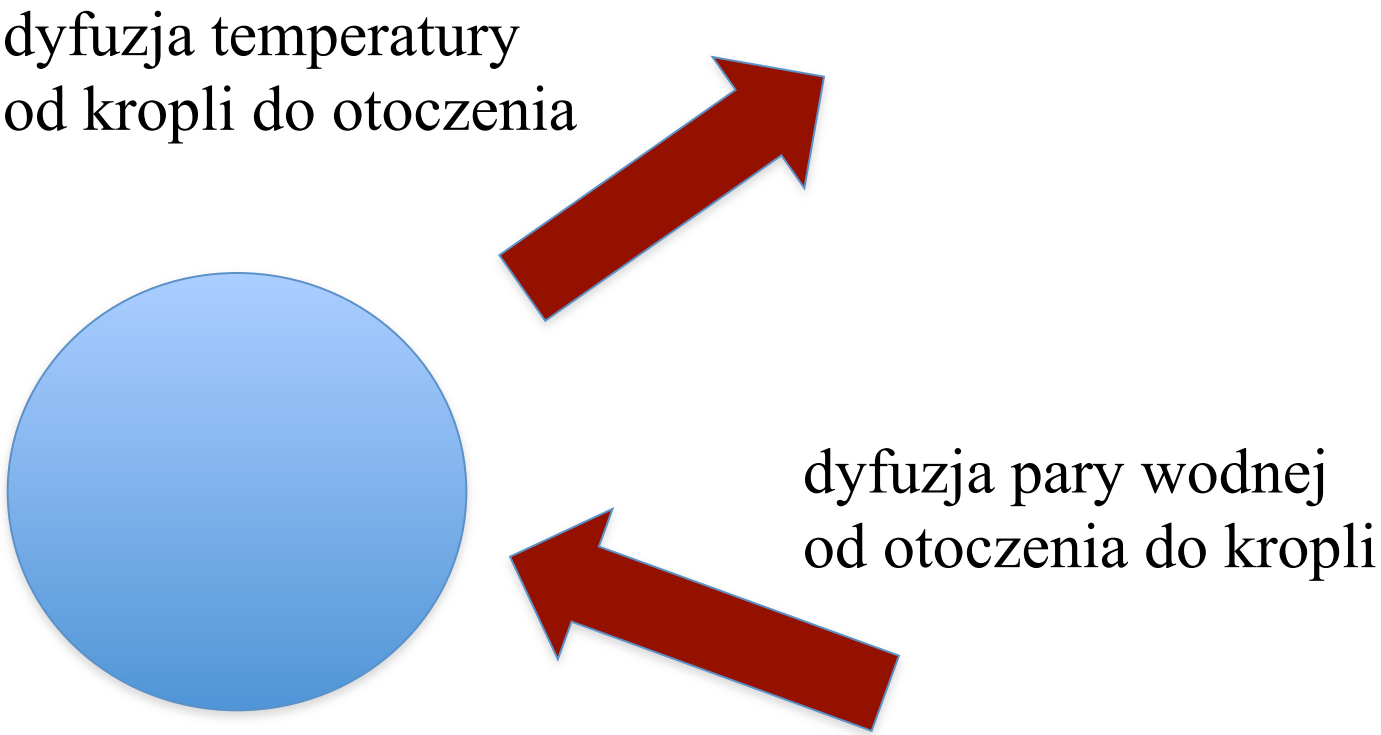


typowa kropla deszczowa kilka mm



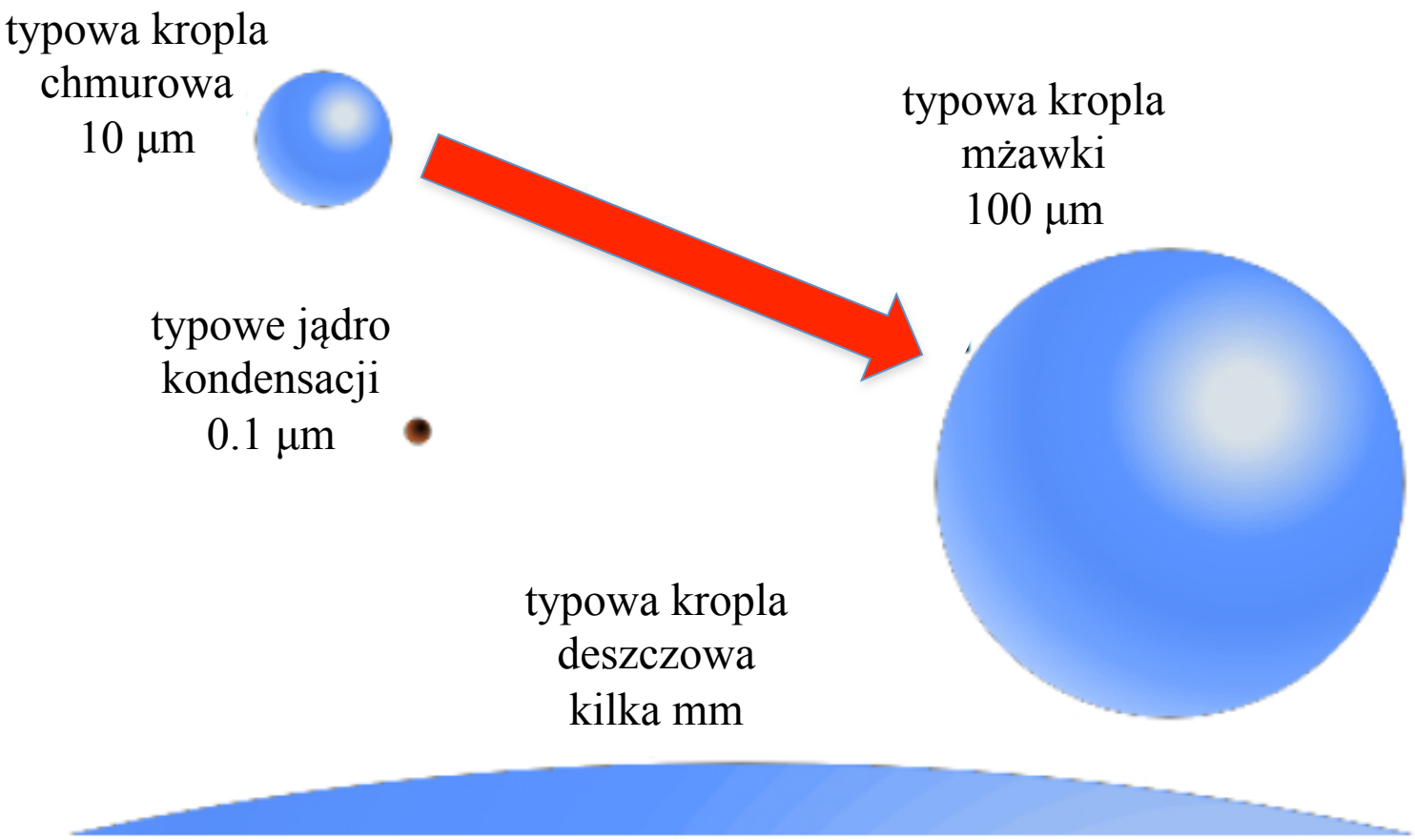
kropelki chmurowe rosną przez dyfuzję pary wodnej



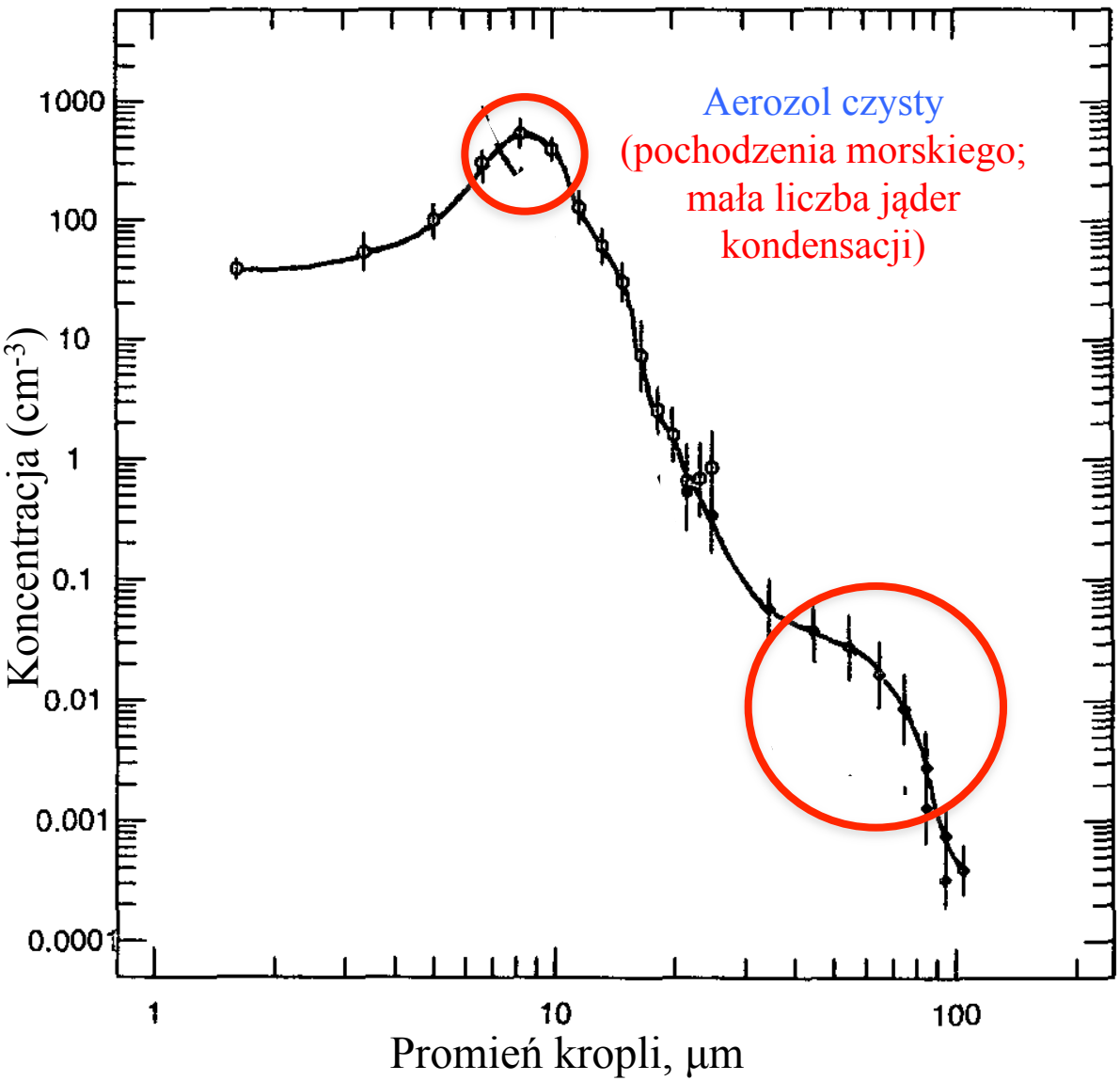


w typowych warunkach chmurowych:
wzrost kropli od 1 do 10 μm - ok. 1 minuty
wzrost kropli od 1 do 100 μm - wiele godzin

krople mżawki i deszczu powstaja prze zderzenia kropel i kropelek



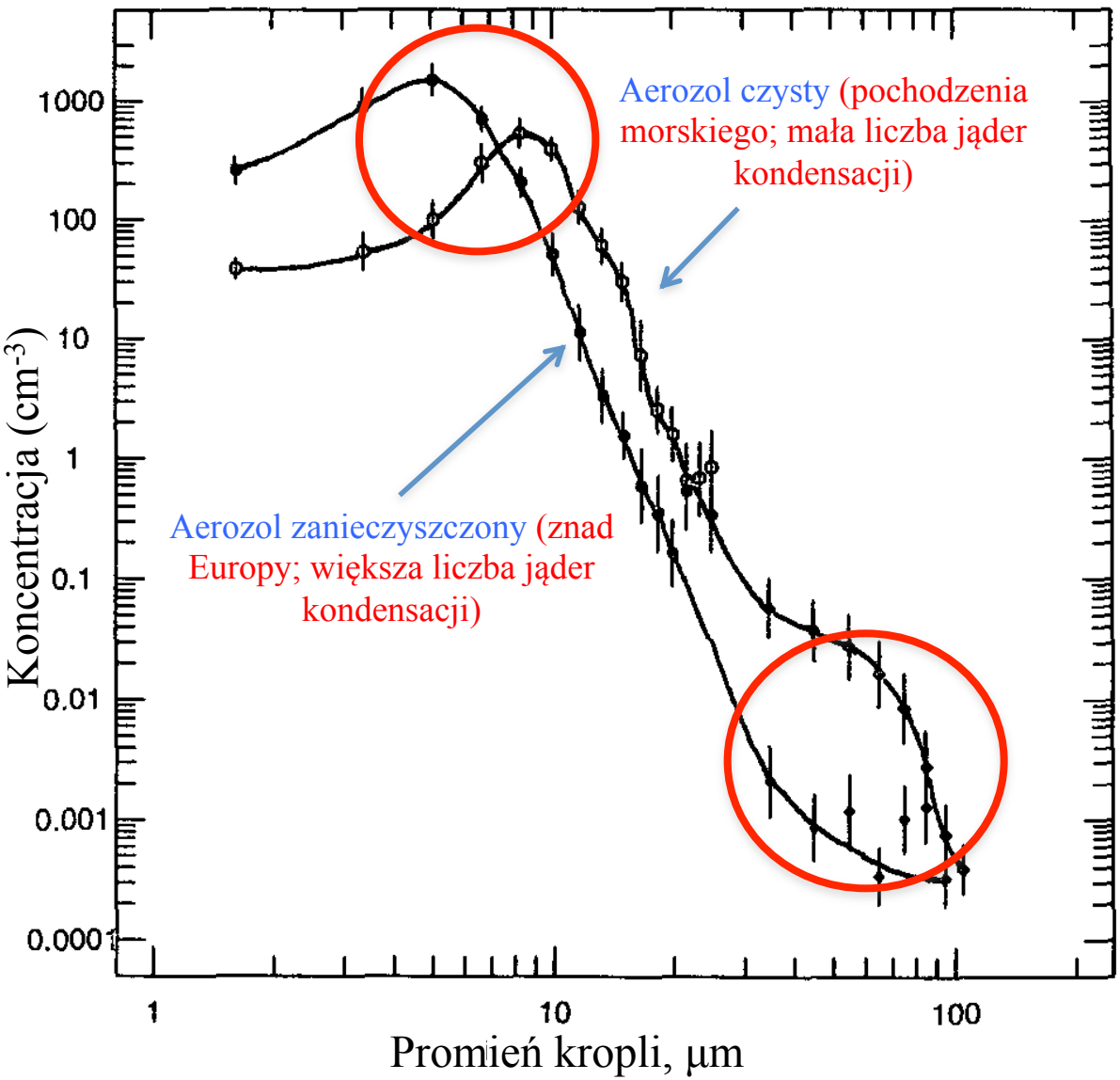
Widma kropel w chmurze stratocumulus nad Azorami
(obserwacje samolotowe)





Garret and Hobbs, *J. Atmos. Sci.* 1995

Widma kropel w chmurze stratocumulus nad Azorami
(obserwacje samolotowe)



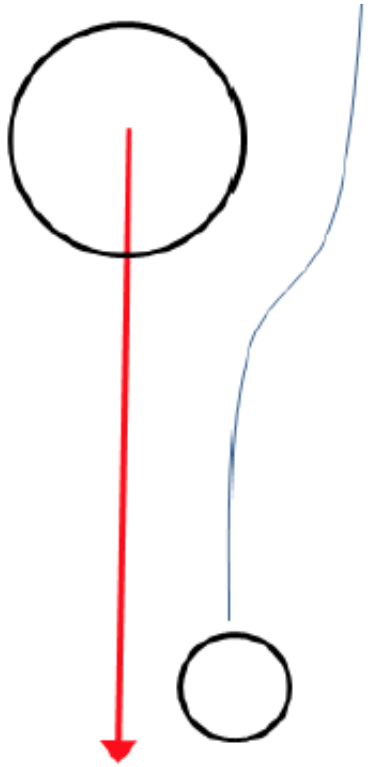


Garret and Hobbs, *J. Atmos. Sci.* 1995



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

Deszcz powstający bez udzialu lodu (np. w chmurach których wierzchołki są cieplejsze niż 0^{o}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 μm: V ≈ 1 cm/sek
R=100 μm (0.1 mm): V ≈ 70 cm/sek
R=1000 μm (1 mm): V ≈ 7 m/sek

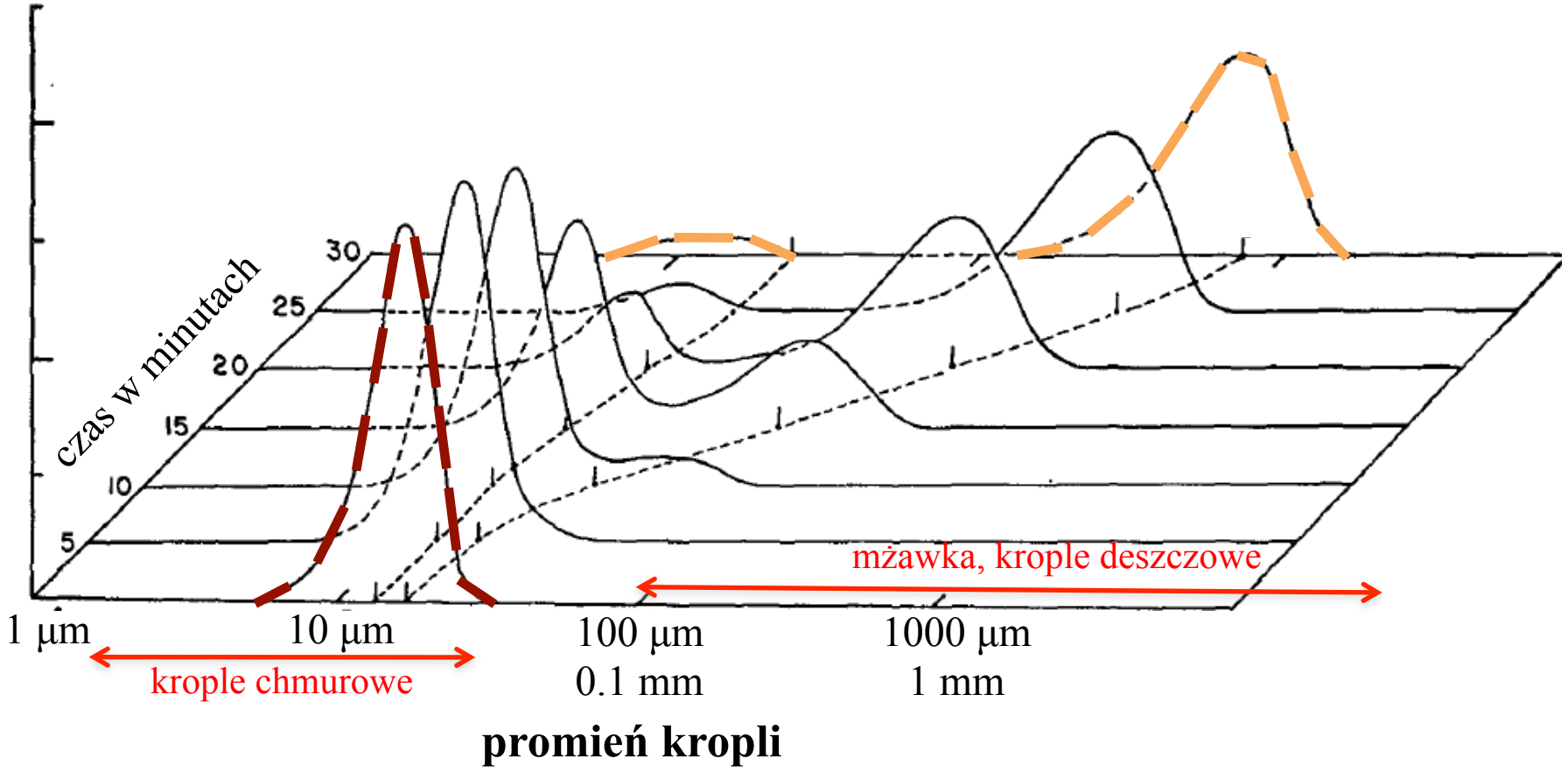
Marian Smoluchowski
1872-1917

“Fizyk, profesor Uniwersytetu Lwowskiego i rektor UJ. Był jednym z najwybitniejszych światowych fizyków poczatku 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 kropel chmurowych prowadzących do powstania kropel deszczowych



Berry and Reinhard *J. Atmos. Sci.* 1974

Chmury z lodem…



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

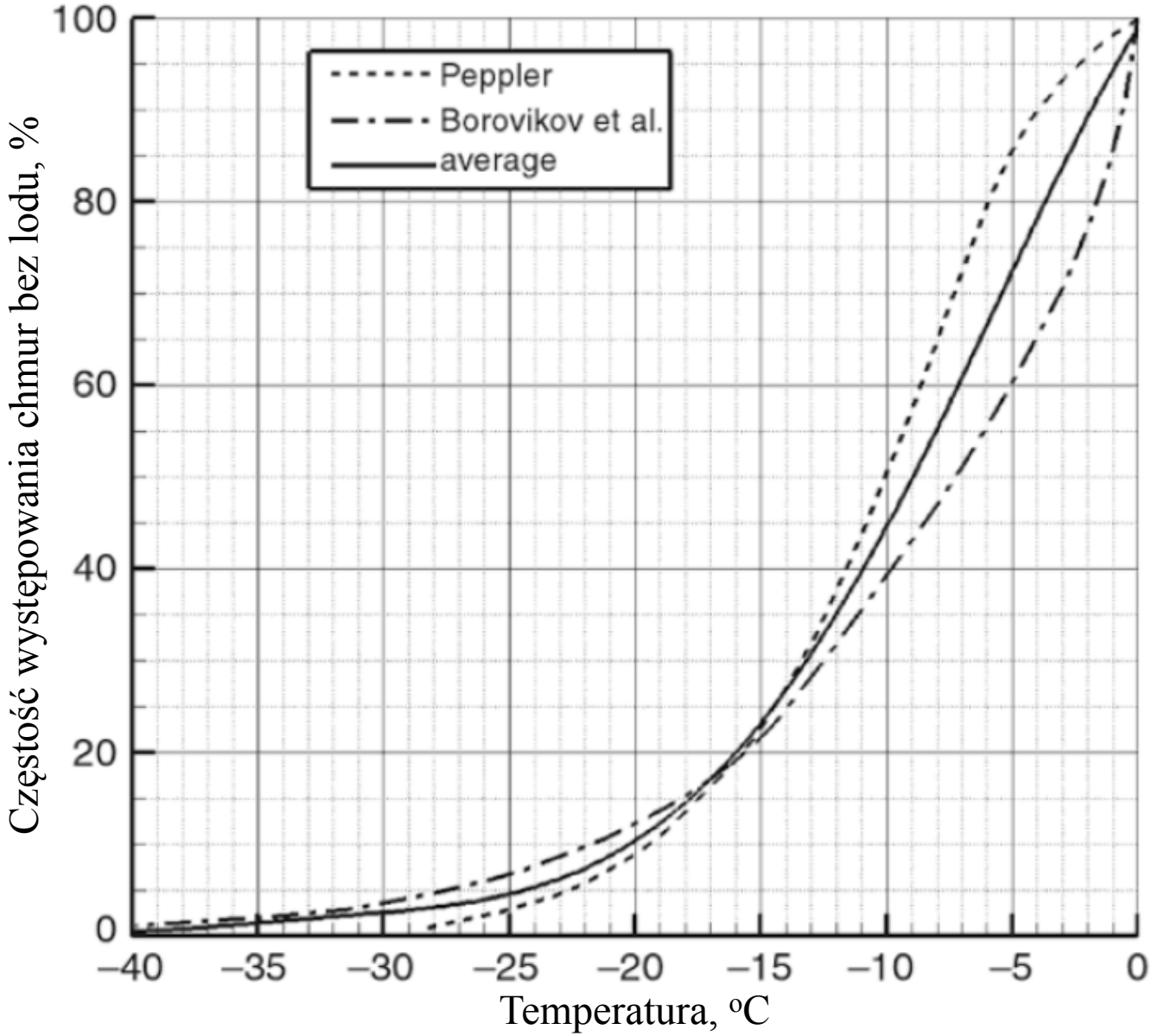
Dużo trudniej jest zrobic kryształek lodu!

Istnieje kilka mechanizmów powstawania krysztalków lodu, ale najbardziej powszechne jest zamarzanie kropelek wody.

Dla temperatur między 0^{o}C a ok. -40^{o}C potrzebny jest kontakt z tzw. jądrem zamarzania (ang. *ice forming nucleus*), zazwyczaj nierozpuszczalną cząstką aerozolu o strukurze krystalicznej zblizonej do lodu (np. pył pustynny). Badania pokazują, że im zimniej, tym koncentracja aktywnych jąder zamarzania jest większa…

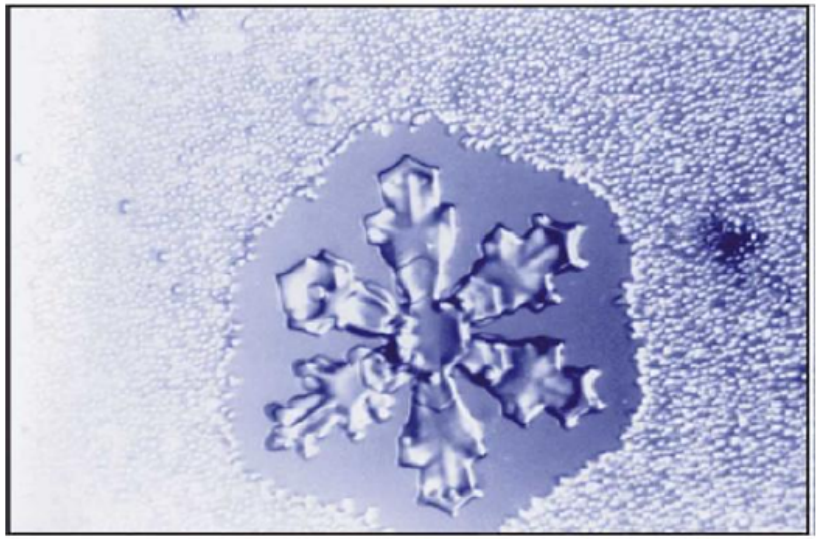
Dla temperatur poniżej ok. -40^{o}C kropelki wody zamarzają spontaniczne (ang. *homogeneous freezing*).

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!

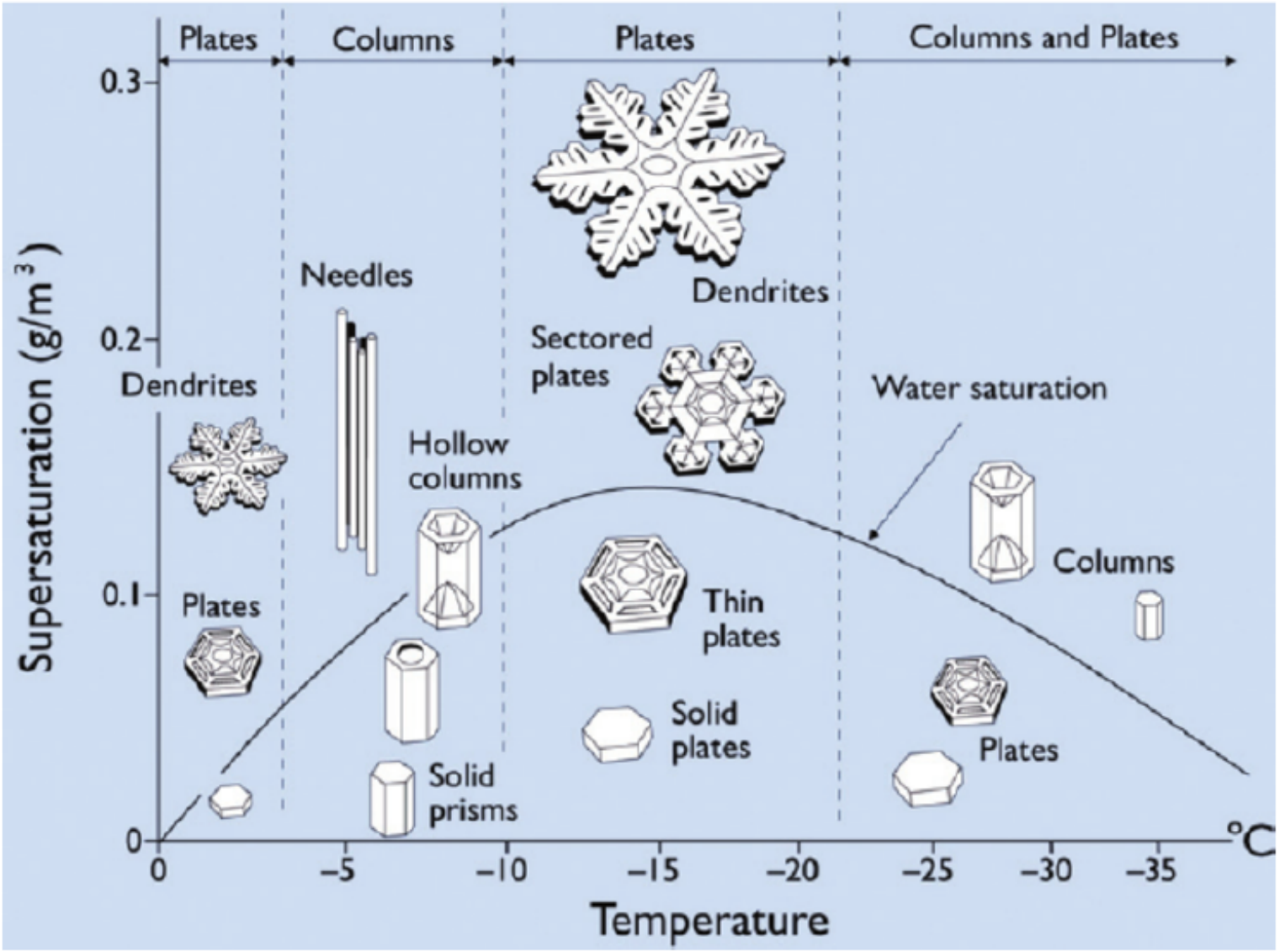
Jest tak dlatego, że ciśnienie pary wodnej w stanie nasycenia nad lodem jest niższe niż nad wodą: kropelki wody parują, krysztalek lodu rośnie. Ten mechanizm nosi nazwę mechanizmu Findeisena-Bergerona.



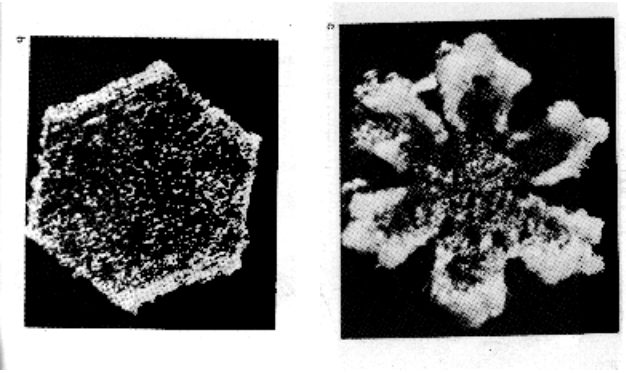
Walter Findeisen (1909-1945): niemiecki meteorolog.

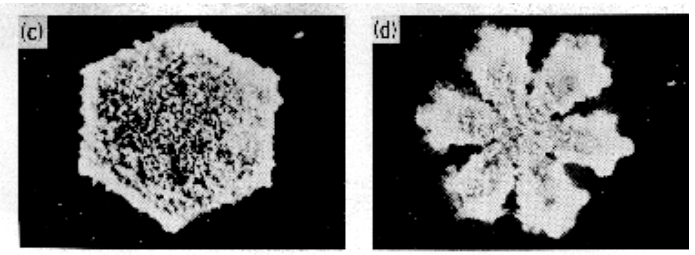
Tor Bergeron (1891-1977): szwedzki fizyk chmur i meteorolog, jeden z uczonych z tzw. Bergeńskiej szkoły meteorologii (*Bergen school of meteorology*).

Kształt kryształka lodu zależy od temperatury i przesycenia w otoczeniu

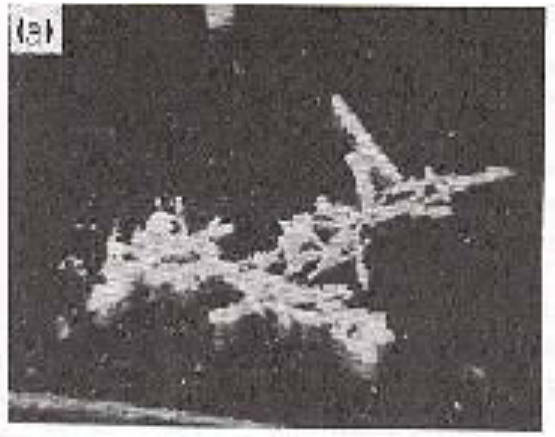


Oszronione (ang. *rimed*) kryształki lodu (przyłączanie przechodzonych kropelek chmurowych)

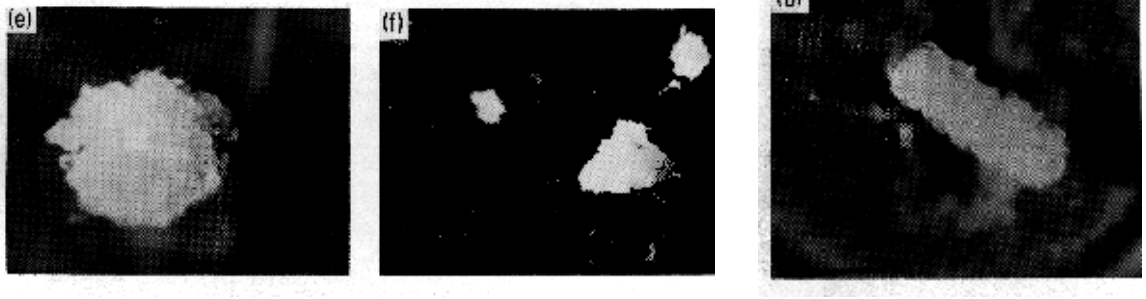




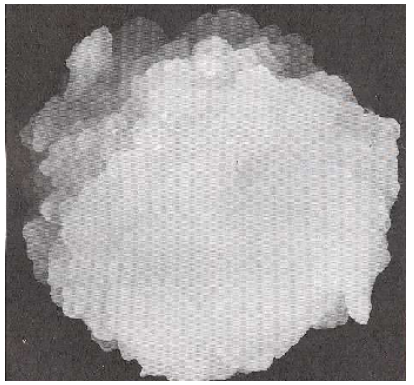


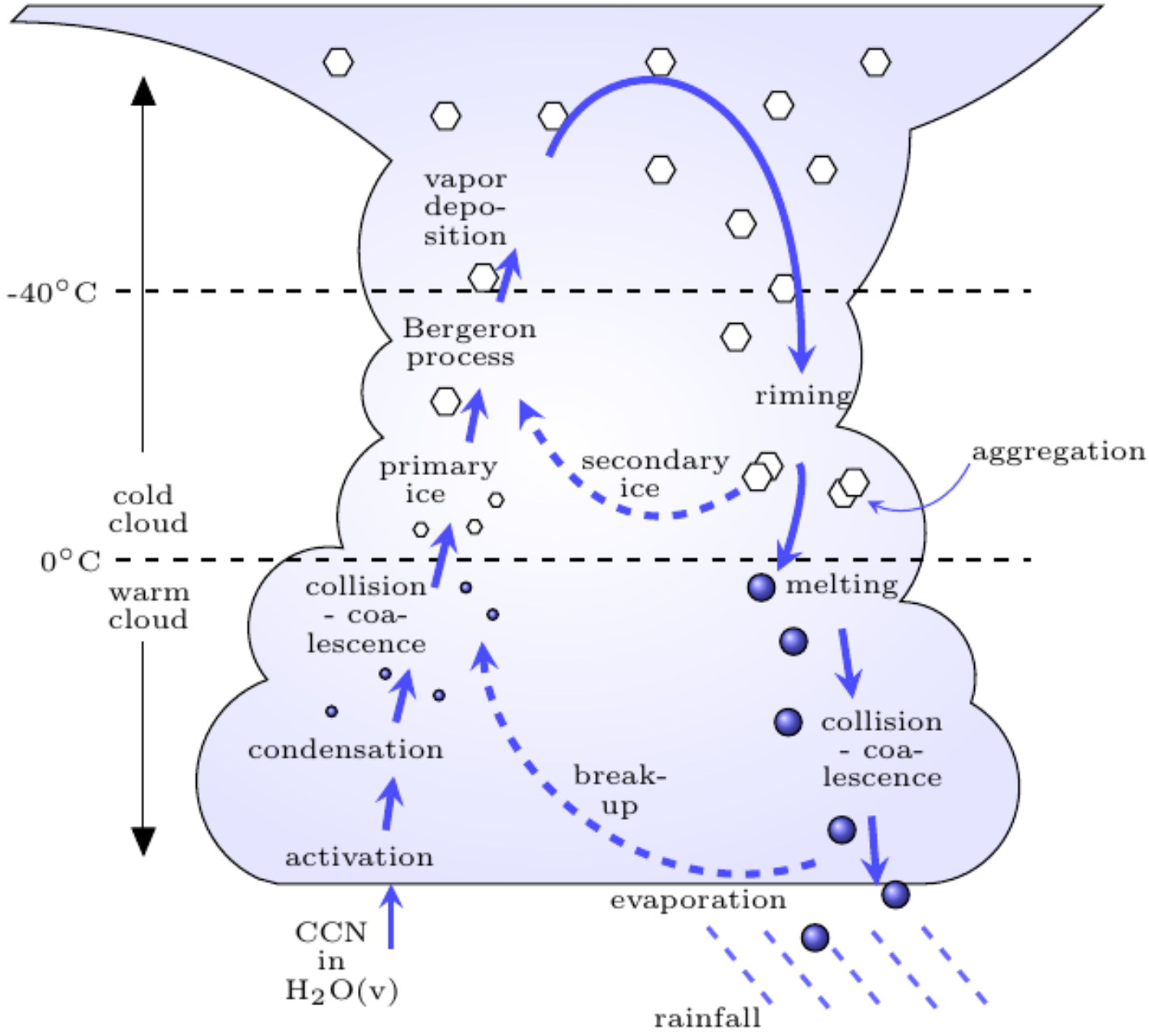


Krupa (ang. *graupel; soft hail*) mocno oszronione kryształki lodu



Grad (ang. *hail*)




vapor
depo-
sition
-40°C
Bergeron
process
riming
aggregation
primary
ice
secondary
ice
cold
cloud
0°C
warm
cloud
collision
- coa-
lescence
melting
condensation
collision
- coa-
lescence
break-
up
activation
evaporation
CCN
in
$H_2O(v)$
rainfall

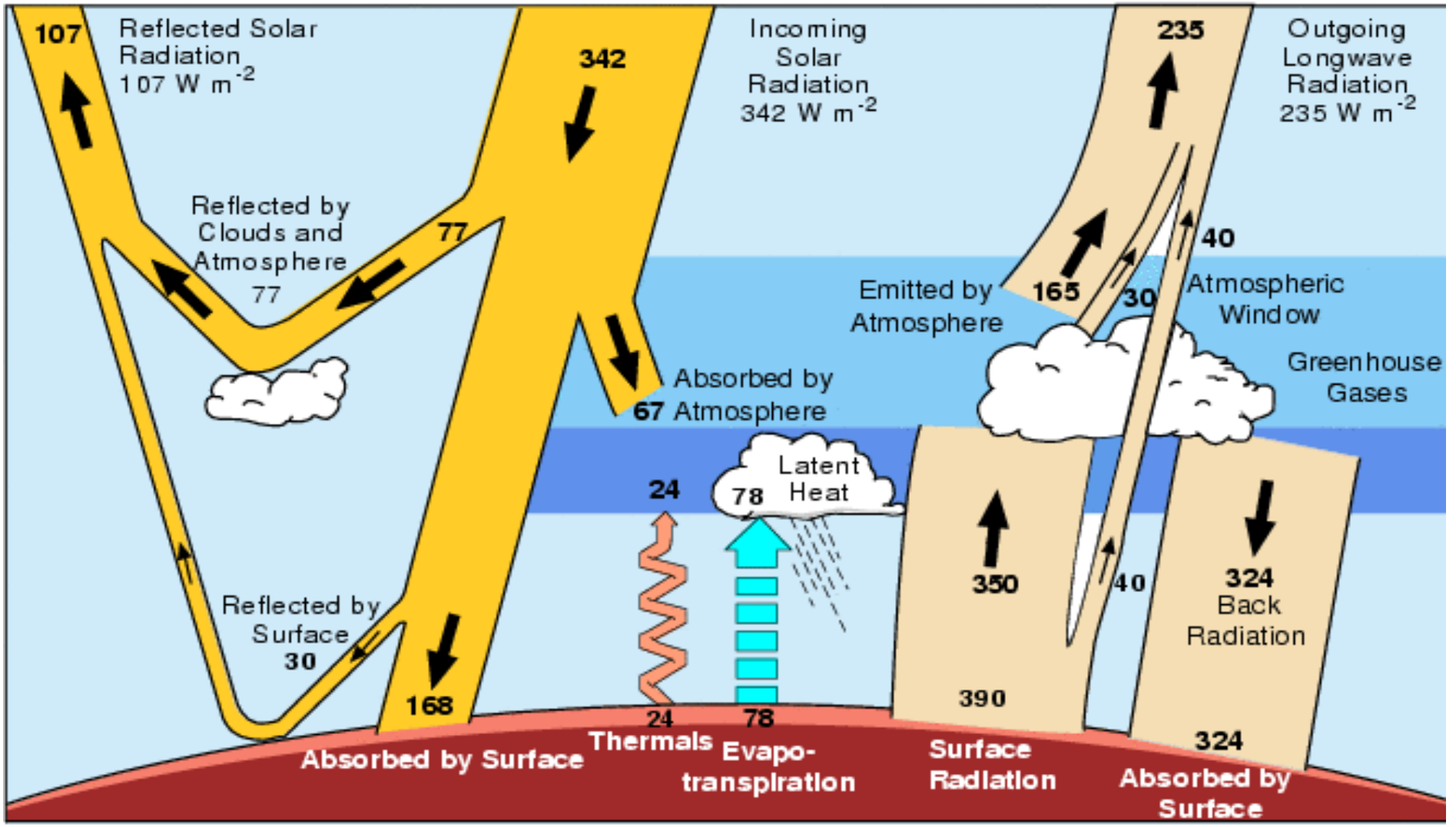
Powyższe to bardzo ogólny przegląd zagadnień jakimi zajmuje się fizyka chmur…

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

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

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

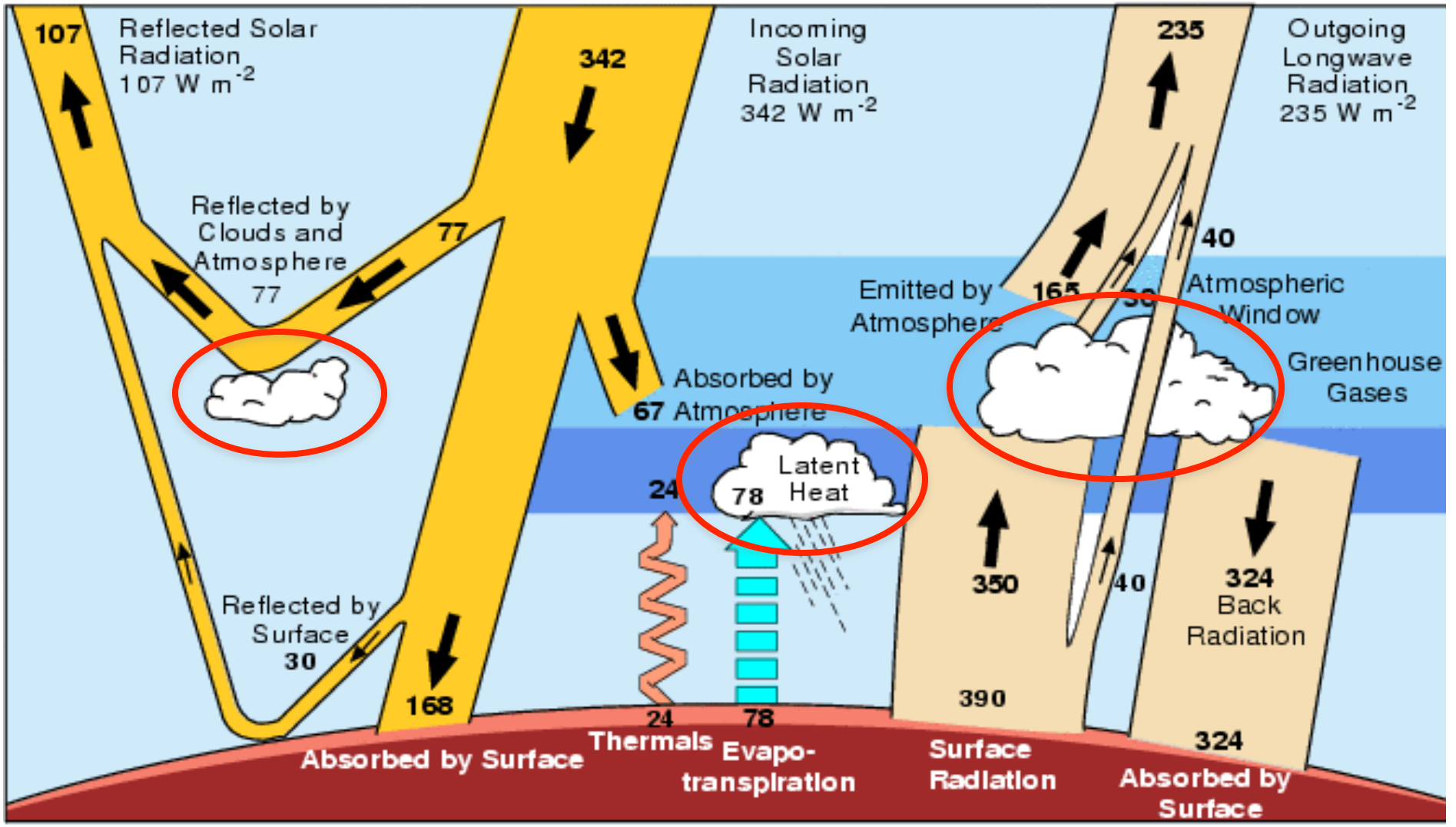
Aby to zrozumieć musimy zrozumieć podstawy bilanu energetycznego Ziemi...



Kiehl and Trenberth 1997

Średni bilans energii Ziemi

(uśredniony po całej planecie i po cyklu rocznym)

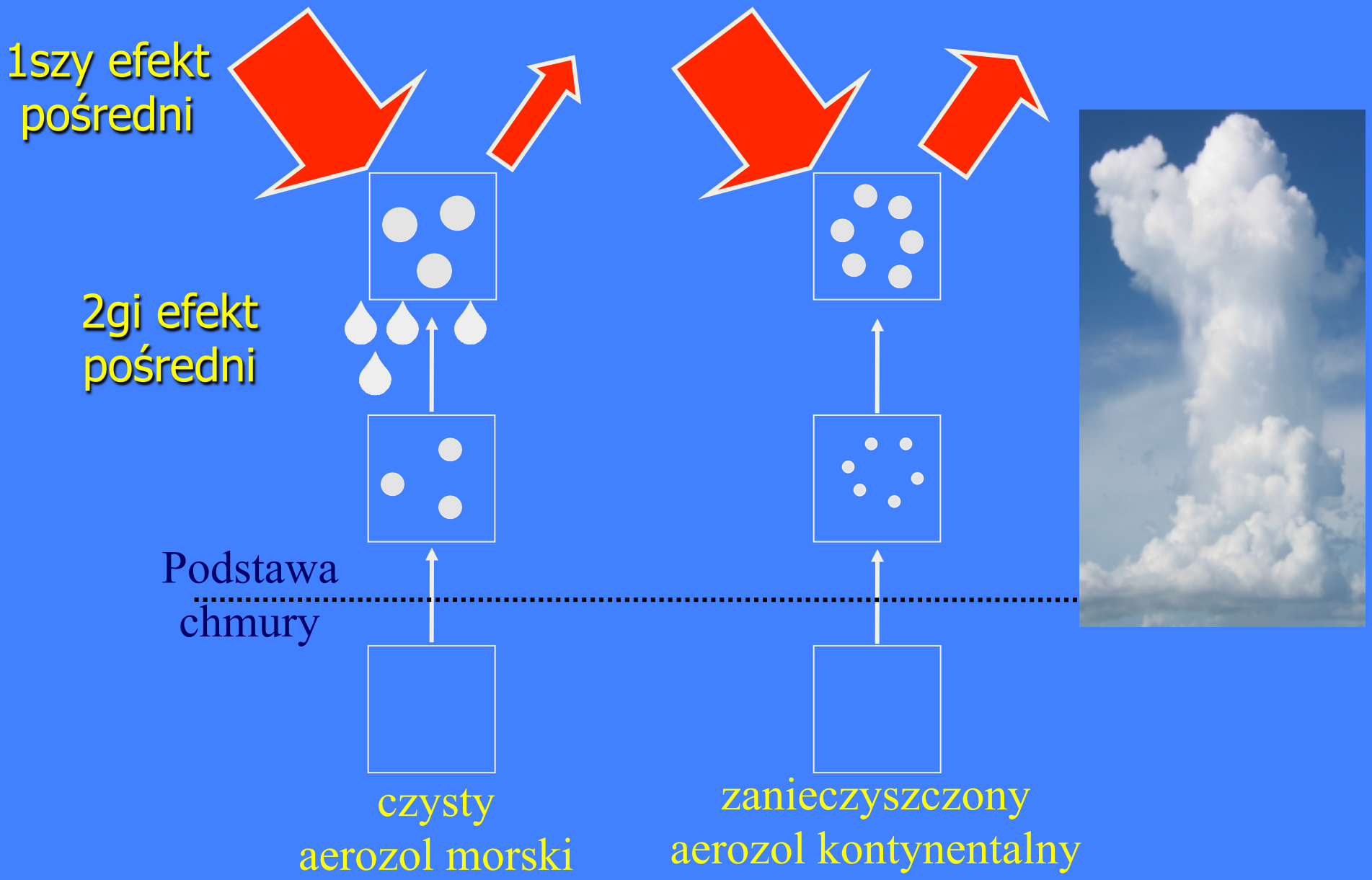


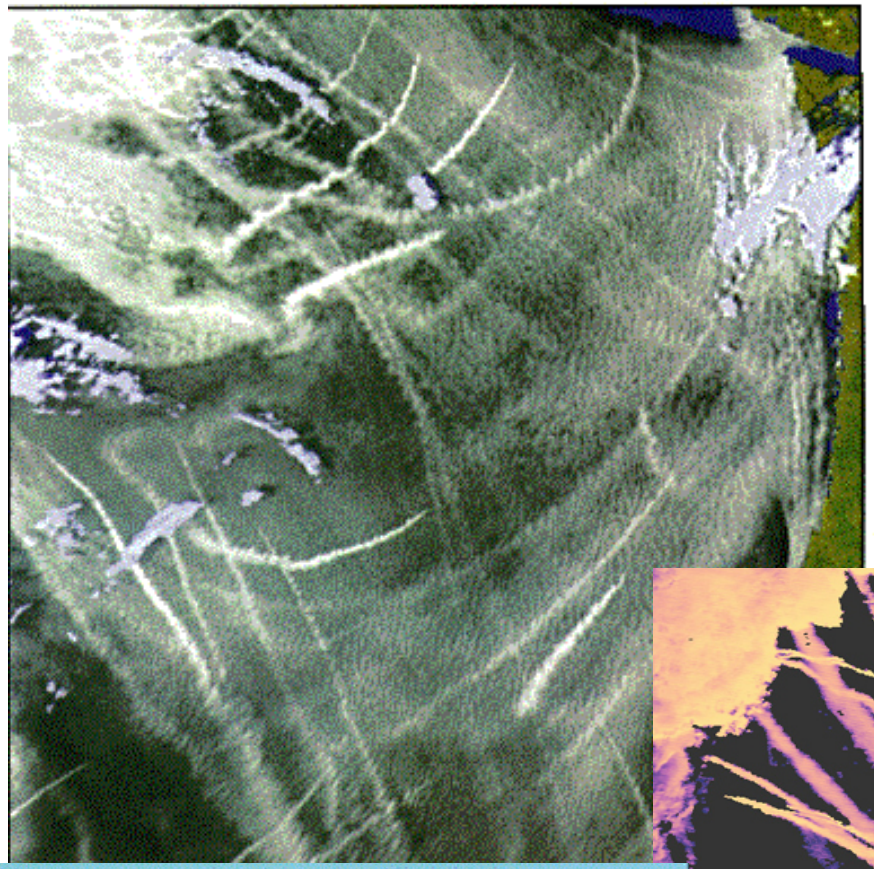
Kiehl and Trenberth 1997

Średni bilans energii Ziemi

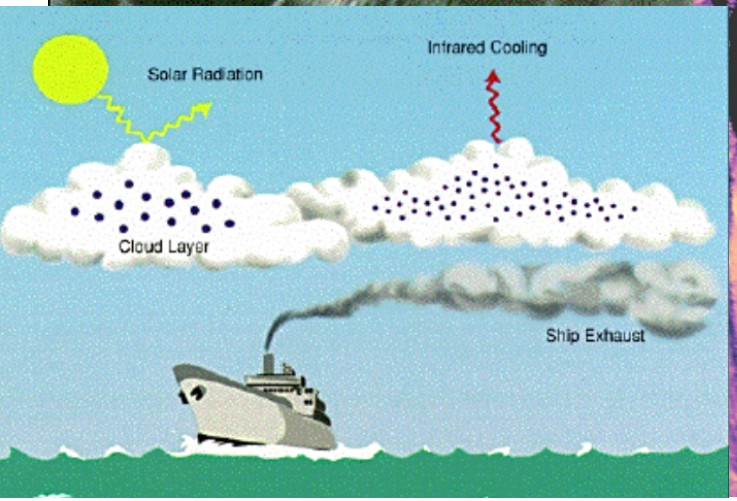
(uśredniony po całej planecie i po cyklu rocznym)

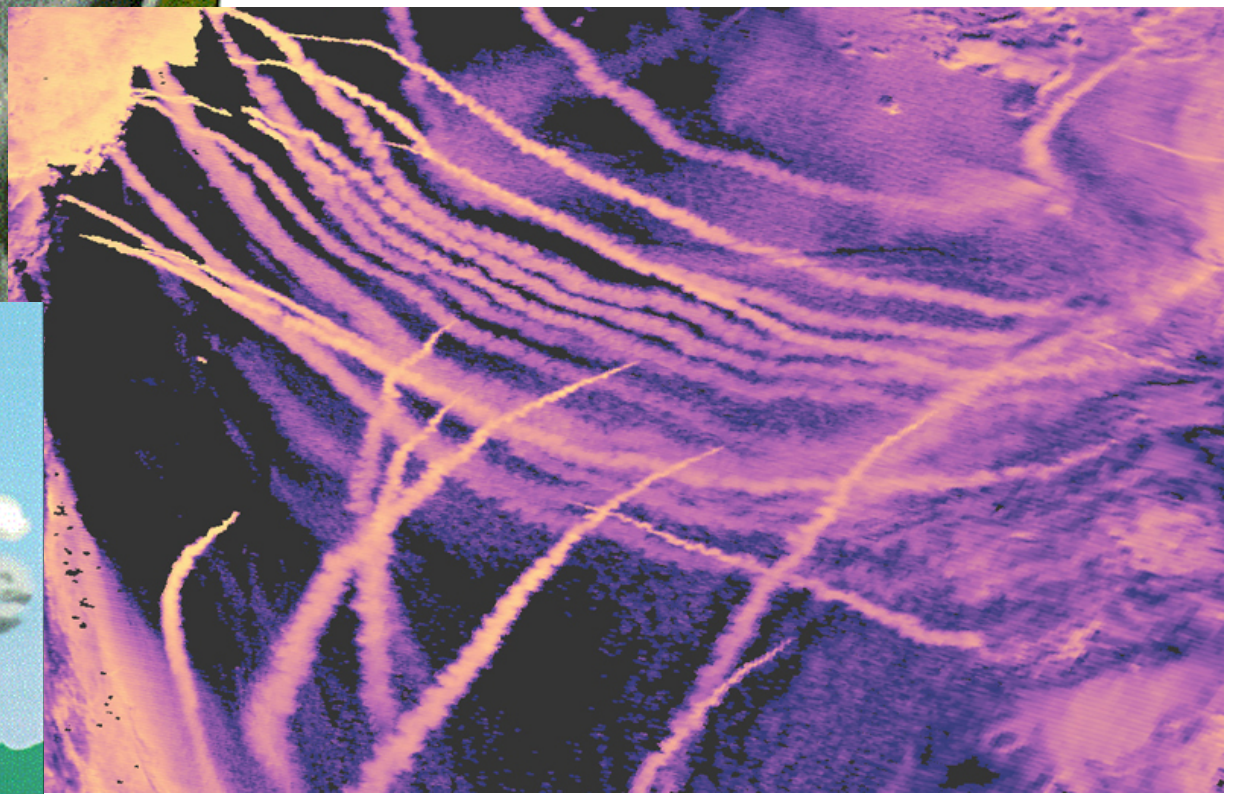
Pośredni wpływ aerozoli na klimat





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





Dlaczego fizyka chmur jest awangardą meteorologii i klimatologii?

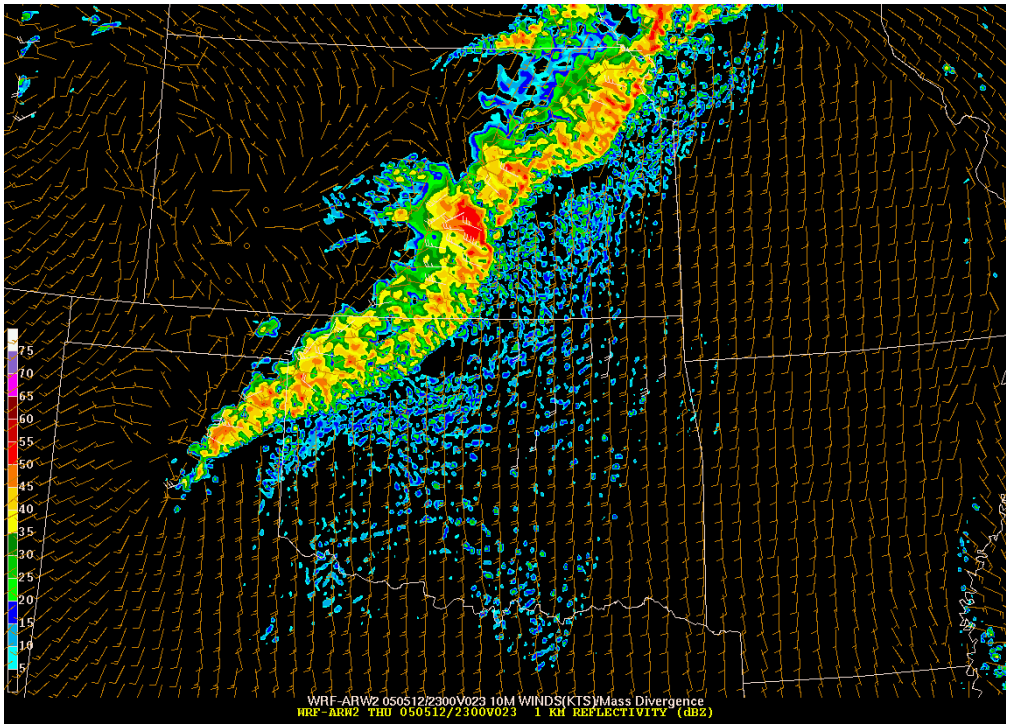
Bo chmury i opady stanowią kluczowy element pogody i klimatu…

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 wysokosci 1 km nad ziemią obliczoną z danych modelu numerycznego (koncentracje i rozmiary cząstek chmurowych i opadowych).



Czym klimat różni sie od pogody?

"Klimat jest tym czego chcesz,
pogoda jest tym co jest za oknem"

"Climate is what you want, weather is what you get"

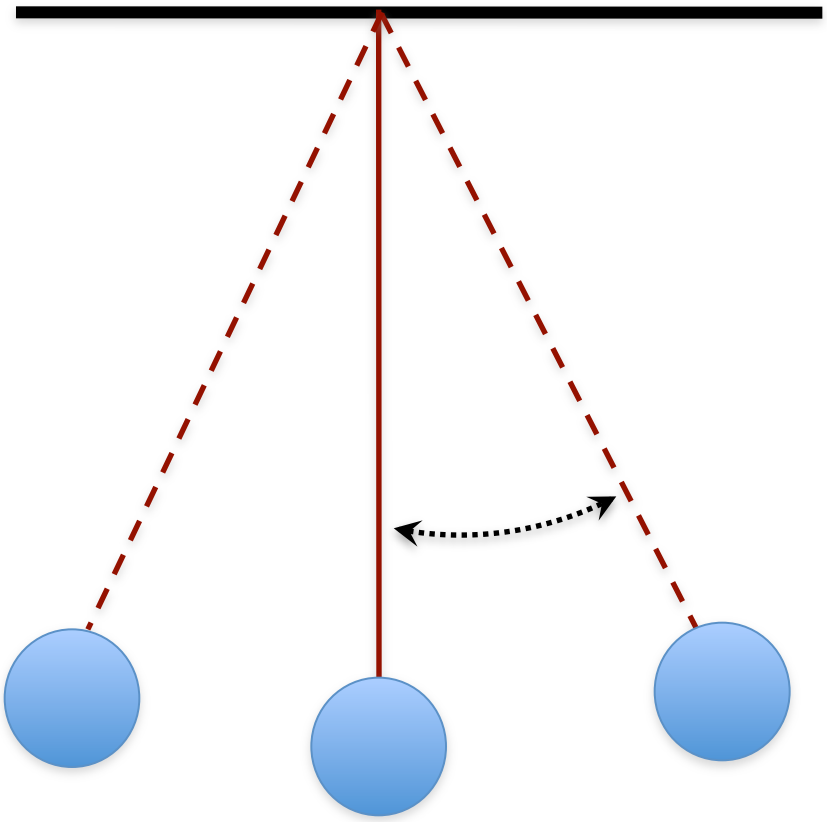
Edward Lorenz (1917-2008)
amerykański matematyk i meteorolog, pionier teorii chaosu

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



Pogoda a klimat

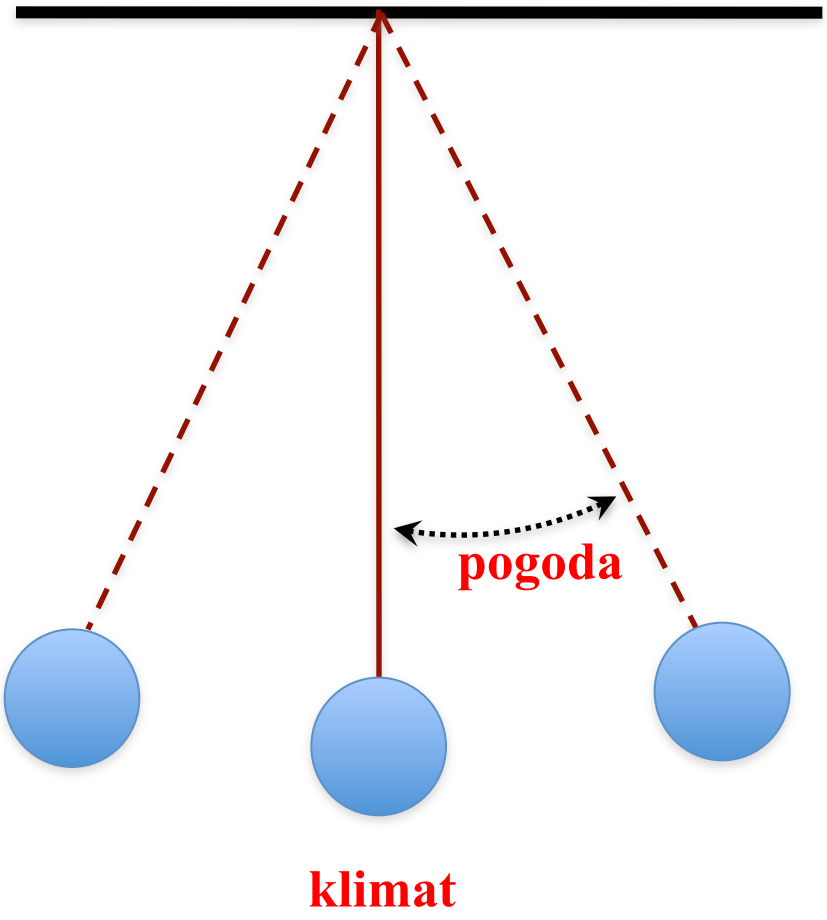
prosty model koncepcyjny…



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

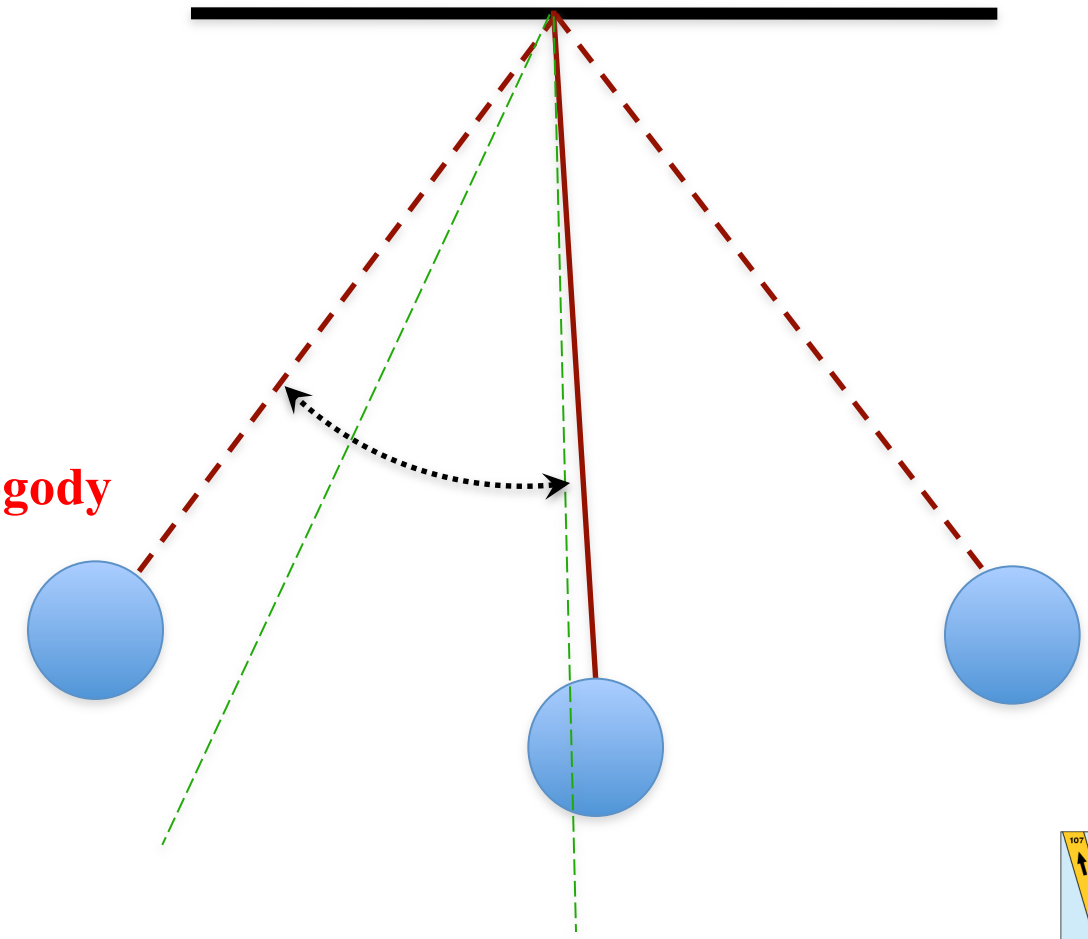
Pogoda a klimat

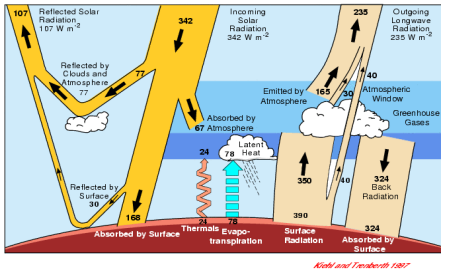
prosty model koncepcyjny…



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 Wm^2 względem ok 340 Wm^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

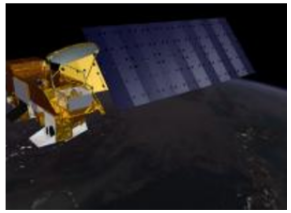
Klimat: wynik wielu rzutów
wiadomo jaki będzie wynik

NAUKA O KLIMACIE
DLA SCEPTYCZNYCH



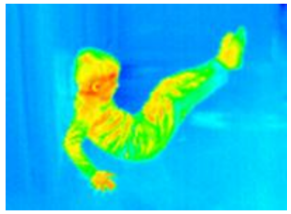
Czy i dlaczego klimat Ziemi się zmienia?

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

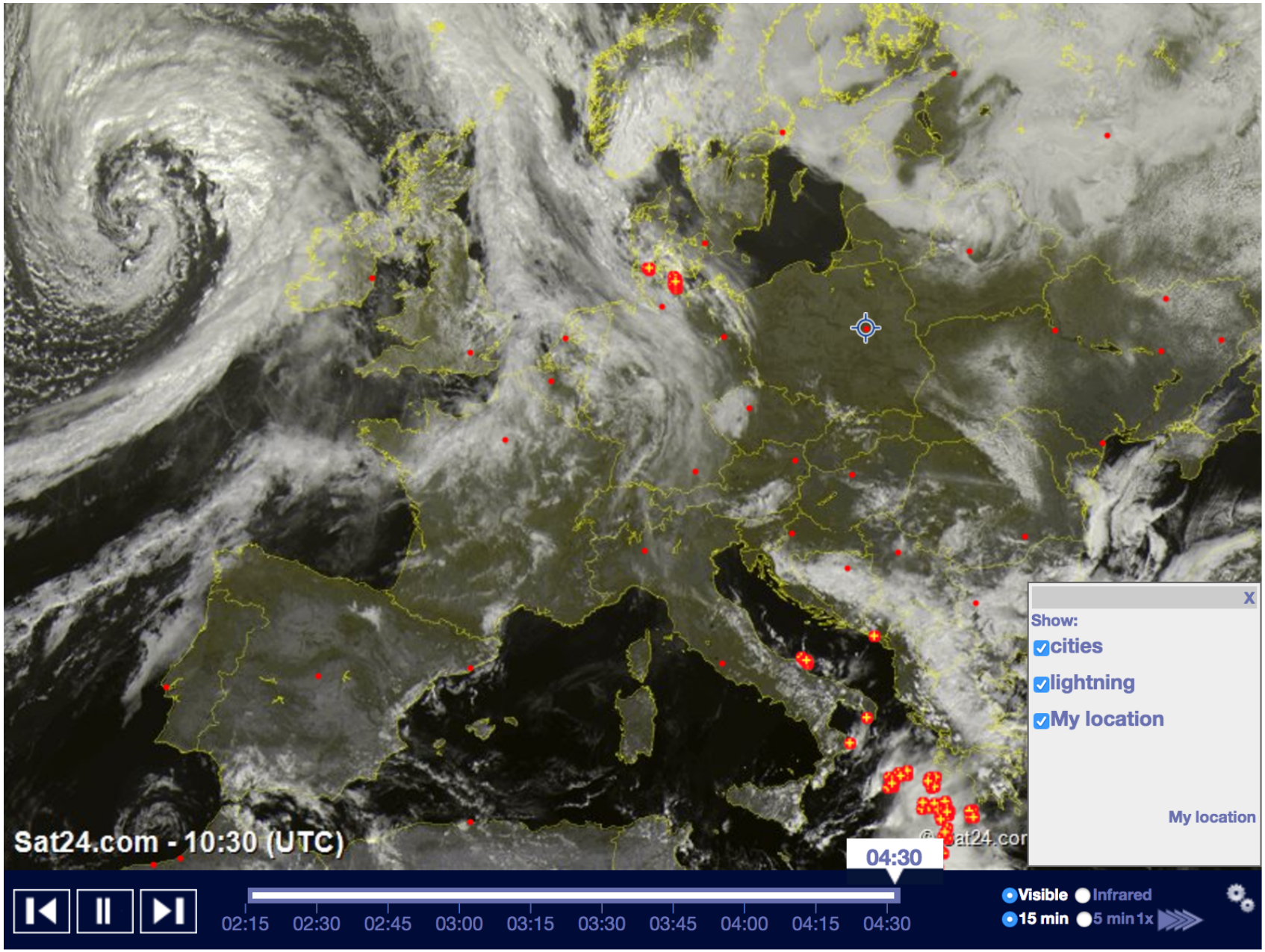


NAJPOPULARNIEJSZE MITY

- 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 sie lepsze prognozy pogody?



Chmury widziane przez satelitę dziś koło południa…

sat24.com

Dobre prognozy pogody wymagają wielkiego potencjału ludzkiego i olbrzymich mocy obliczniowych. To zadanie z wielkim sukcesem realizuje od kilkudziesięciu 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 krajow czlonkowskich.

ECMWF English Français Deutsch Search site Contact Log in

Home About Forecasts Computing Research Learning Library

Who we are | What we do | Jobs | Media centre | Suppliers | Contact us

Who we are

- Governance
- Member States
- History
- Official documents
- Representatives



Read some of our key facts and figures

Read our newsletters, corporate brochures and annual reports

ISO 9001:2015 UKAS MANAGEMENT SYSTEMS

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

www.ecmwf.int



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?

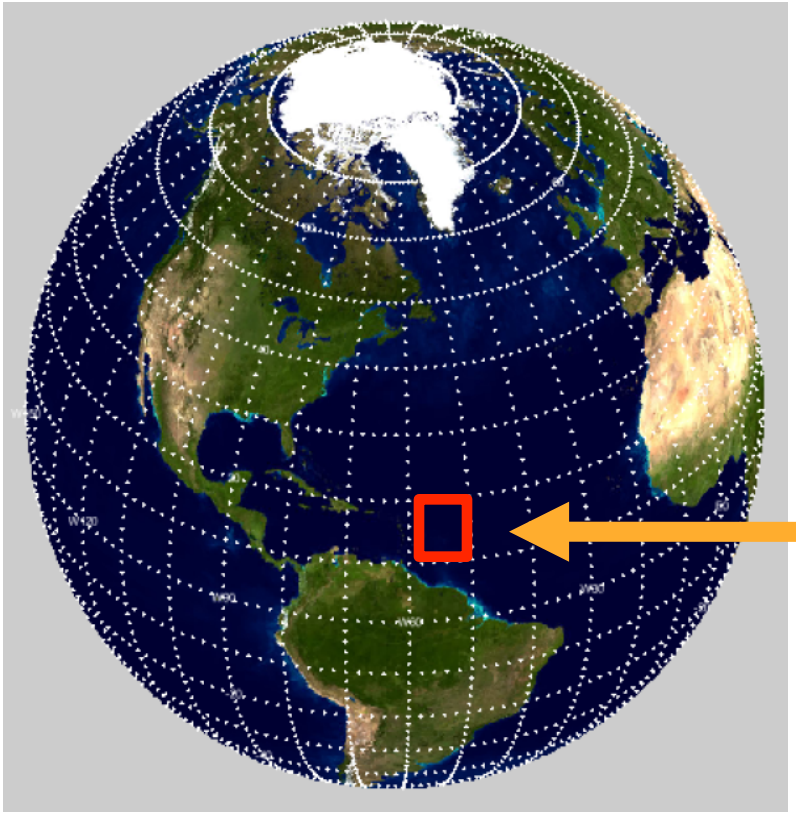
Używając modelu w którym chmury są symulowane explicite!…

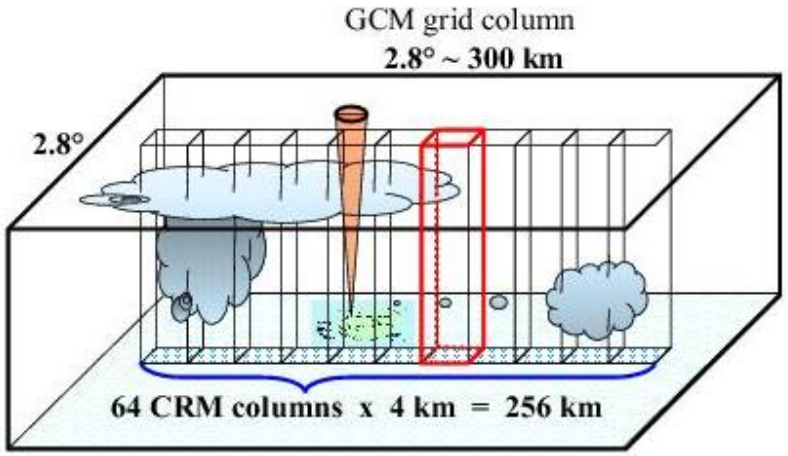


Modelowanie klimatu wymaga gigantycznych mocy obliczeniowych, głównie ze względu na długość symulowanego okresu czasu (setki i tysiące lat). Rozwiązanie które zaproponowalem 20 lat temu, znane jako "super-parametryzacja" pchnęło modelowanie klimatu na nowe tory…



logo supermena





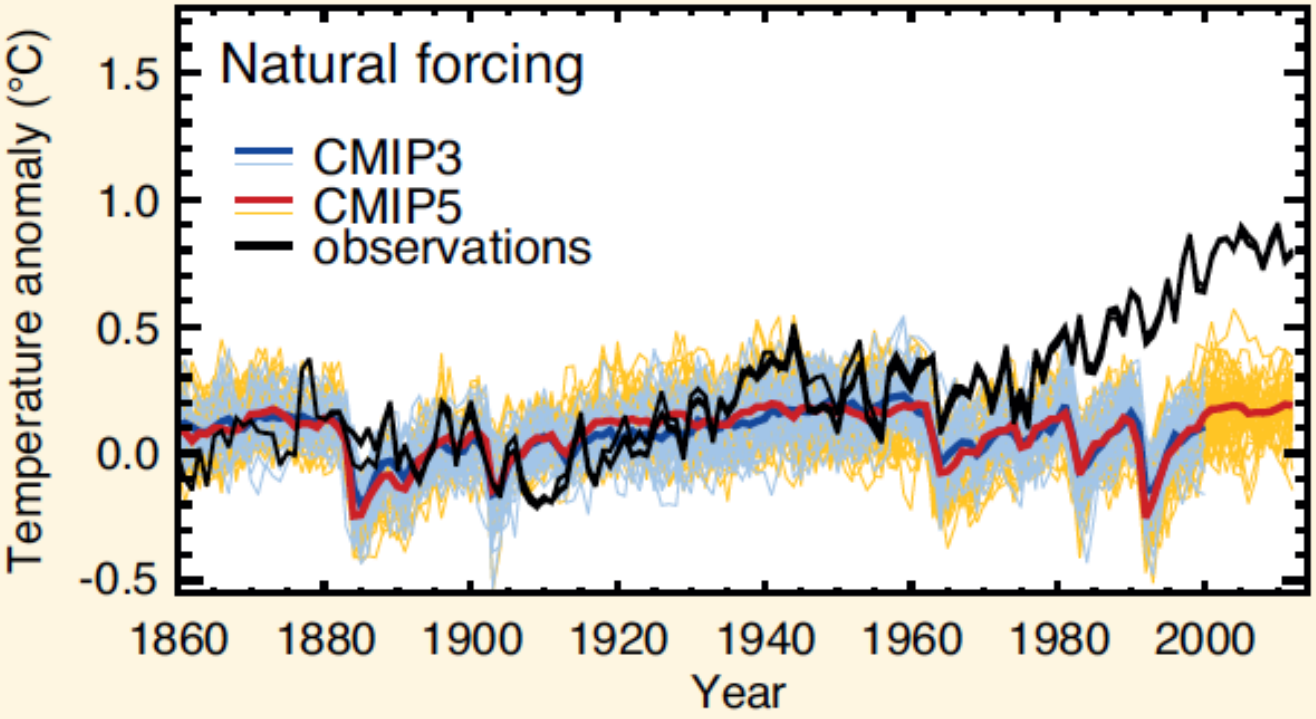
"Multi-scale modeling framework"

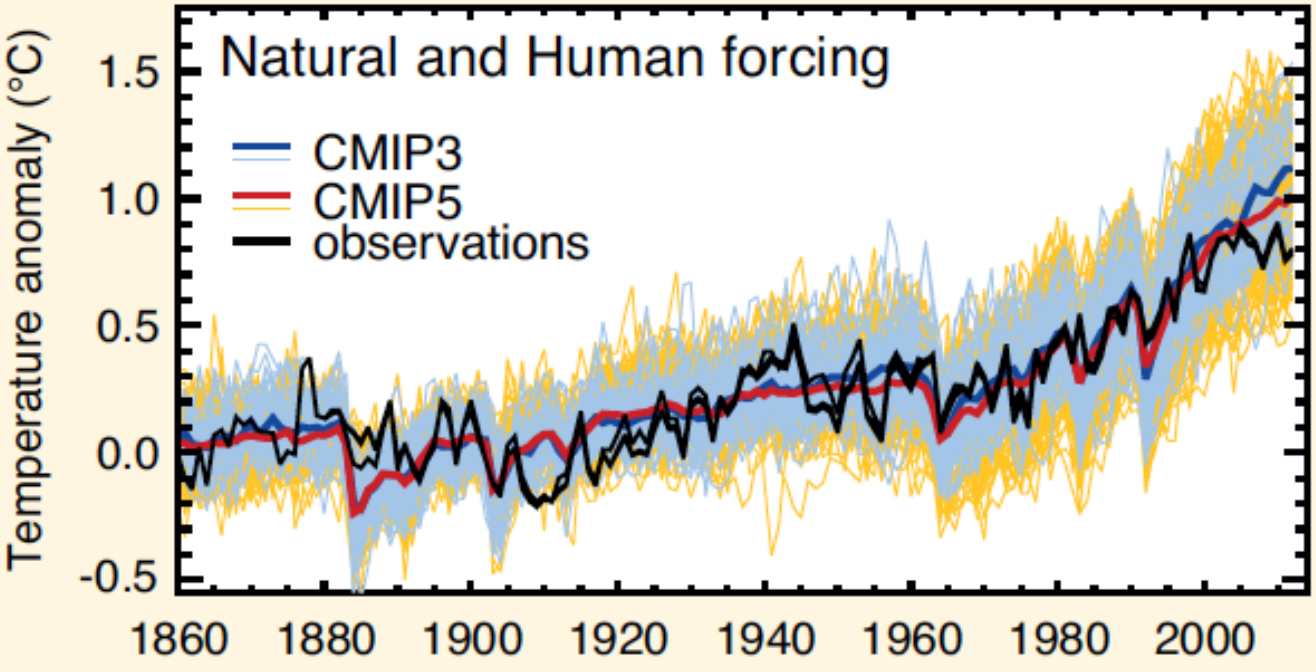
Podsumowanie:

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

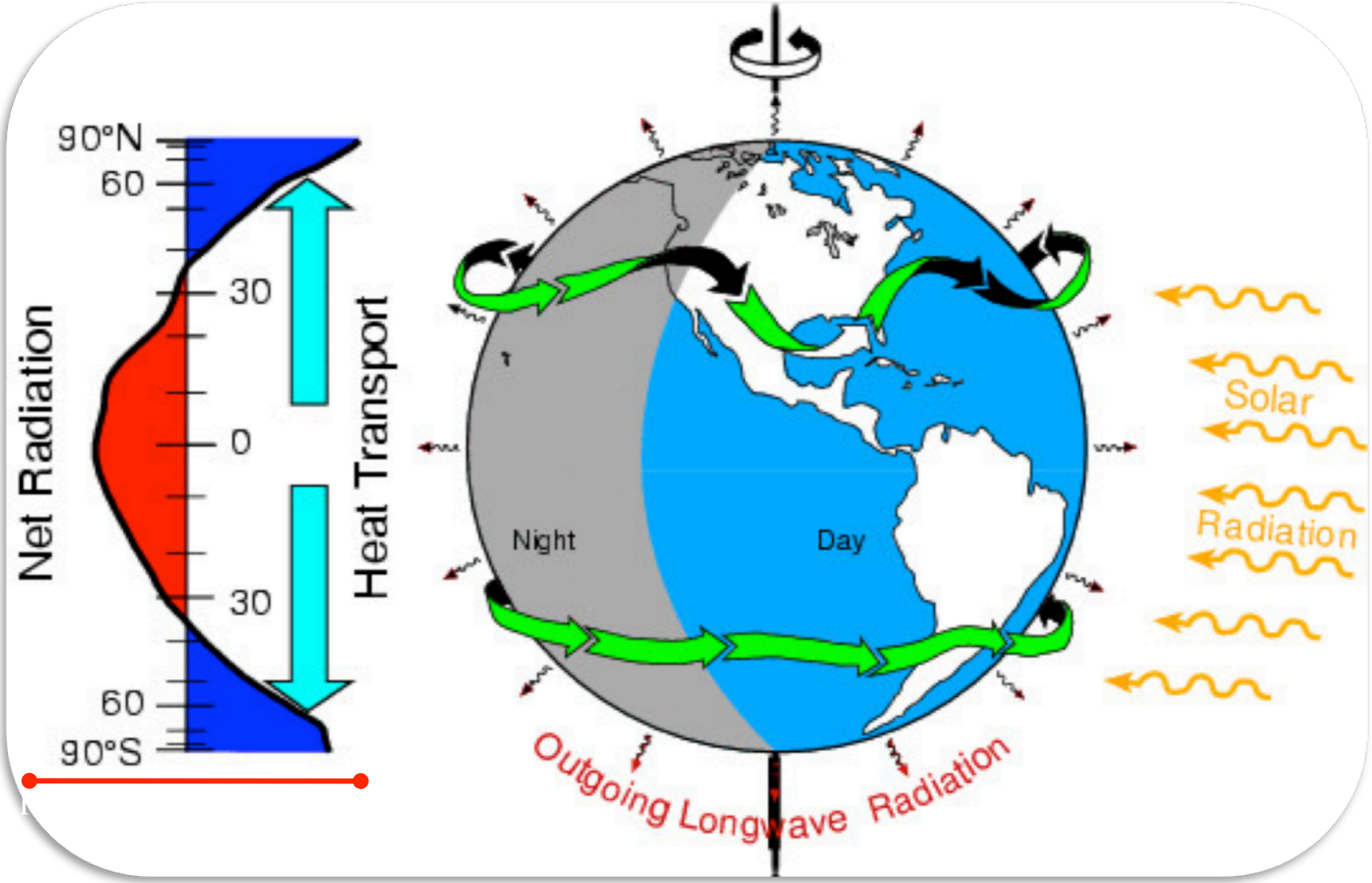
Obserwacje chmur (samoloty, satelity, etc), badania laboratoryjne (np. komory chmurowe), teoria oraz modelowanie numeryczne pozwalają na głebsze zrozumienie roli chmur w procesach pogodowych i wpływu chmur na klimat i jego zmiany.

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

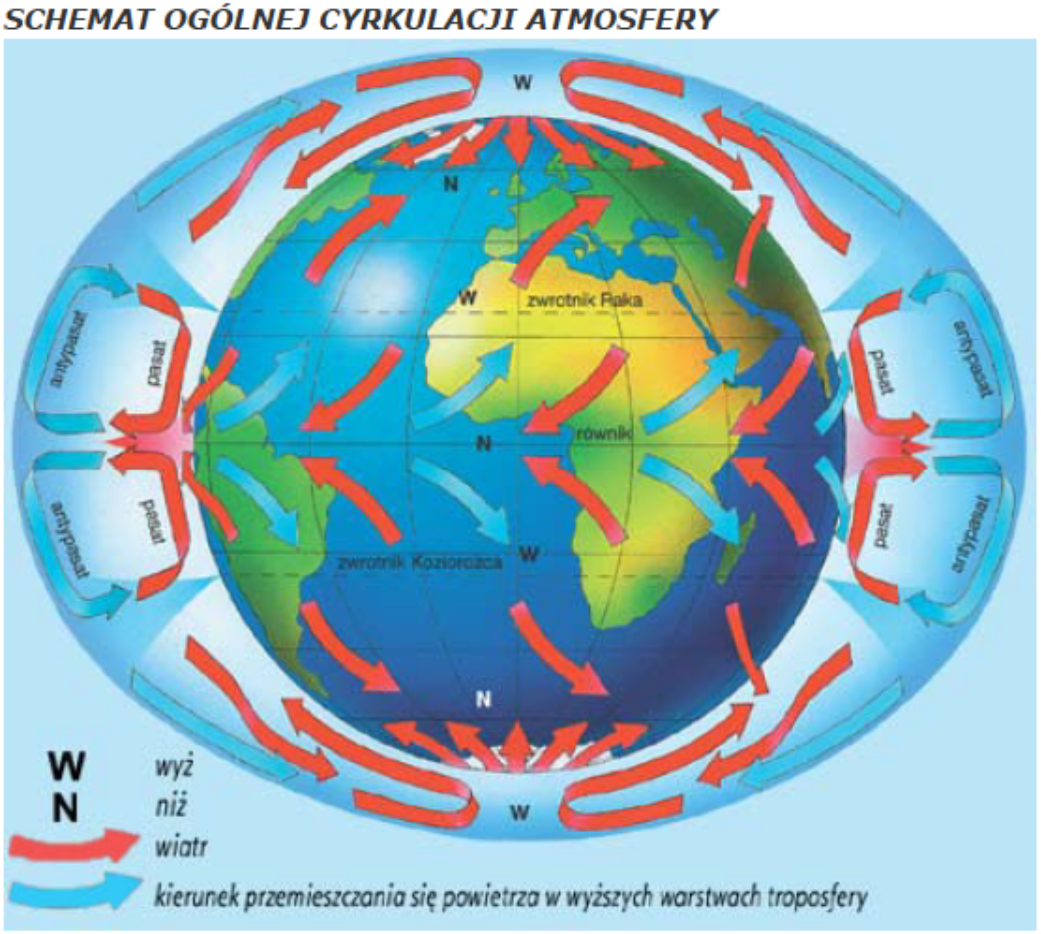

Natural forcing
CMIP3
CMIP5
observations
Temperature anomaly (°C)
1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
1860
1880
1900
1920
1940
1960
1980
2000
Year


Natural and Human forcing
CMIP3
CMIP5
observations
Temperature anomaly (°C)
1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
1860
1880
1900
1920
1940
1960
1980
2000

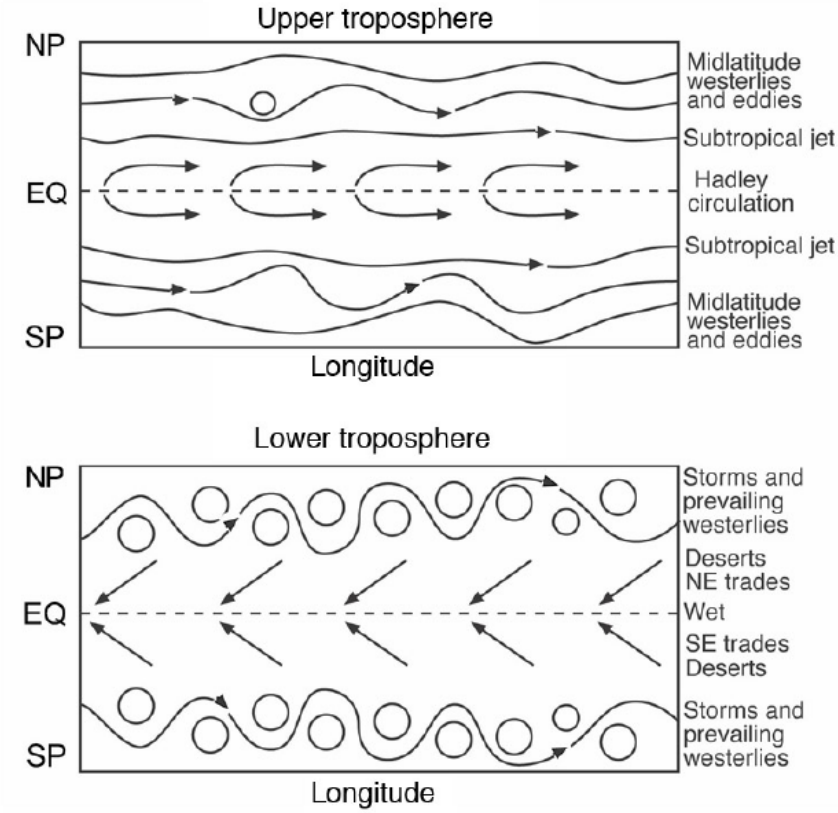
Top-of-atmosphere net (solar minus Earth longwave) radiative flux



Kevin Trenberth, NCAR

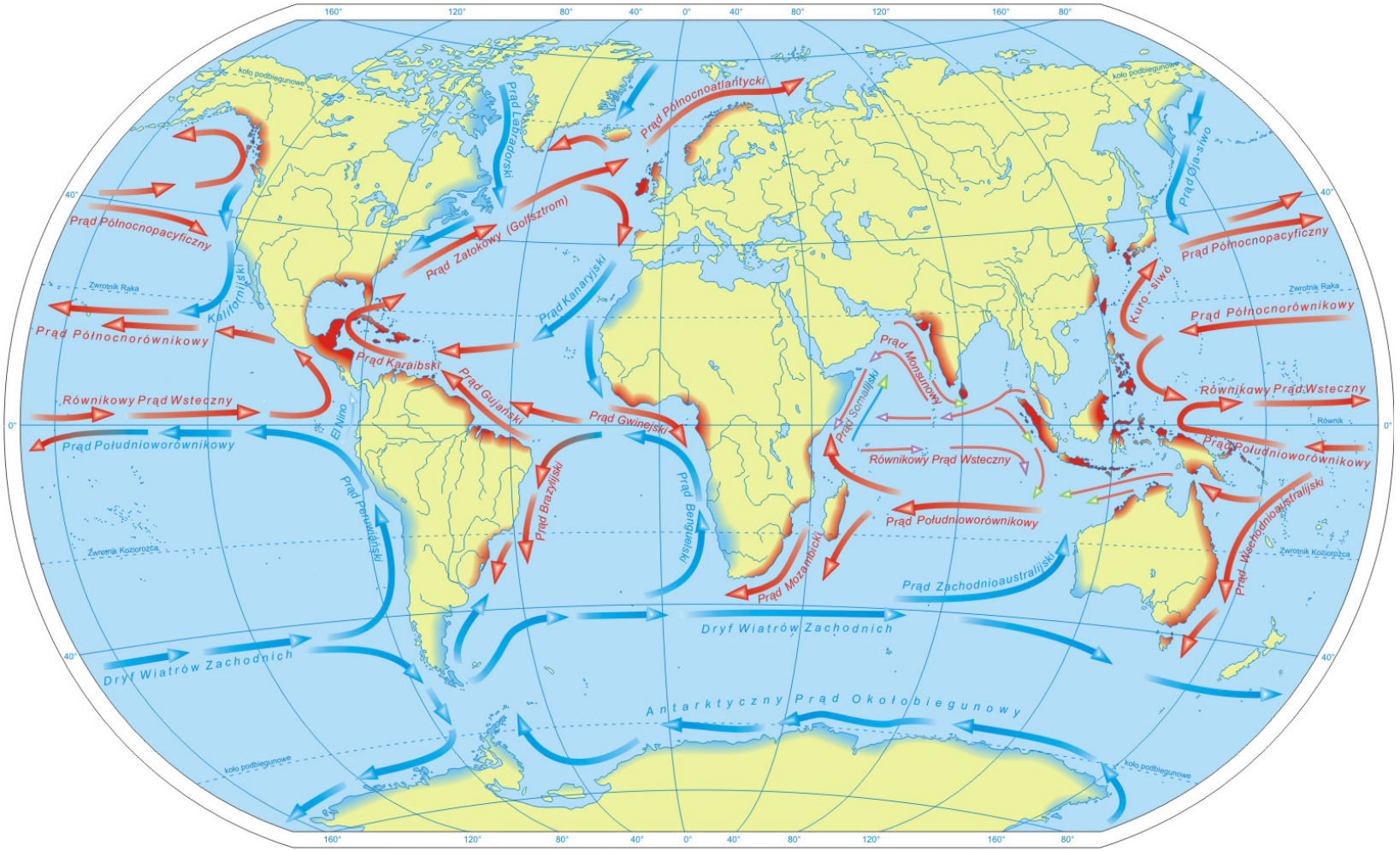


http://www.wiking.edu.pl/article_print.php?id=898



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

Prądy oceaniczne



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

Znacząca cześć transportu energii od równika do begunów odbywa się poprzez cyrkulację oceanu…

(pojemność cieplna całej atmosfery odpowiada kilku metrom wody)