



Fizyka Pogody i Klimatu

Chmury

Szymon, Malinowski, Krzysztof Markowicz

Instytut Geofizyki

Uniwersytet Warszawski

Czym jest chmura?

Chmury są skupiskiem bardzo drobnych (średnica 2-100 mikrometrów) kropelek wody i/lub kryształków lodu. W zależności od składu mówimy o chmurach:

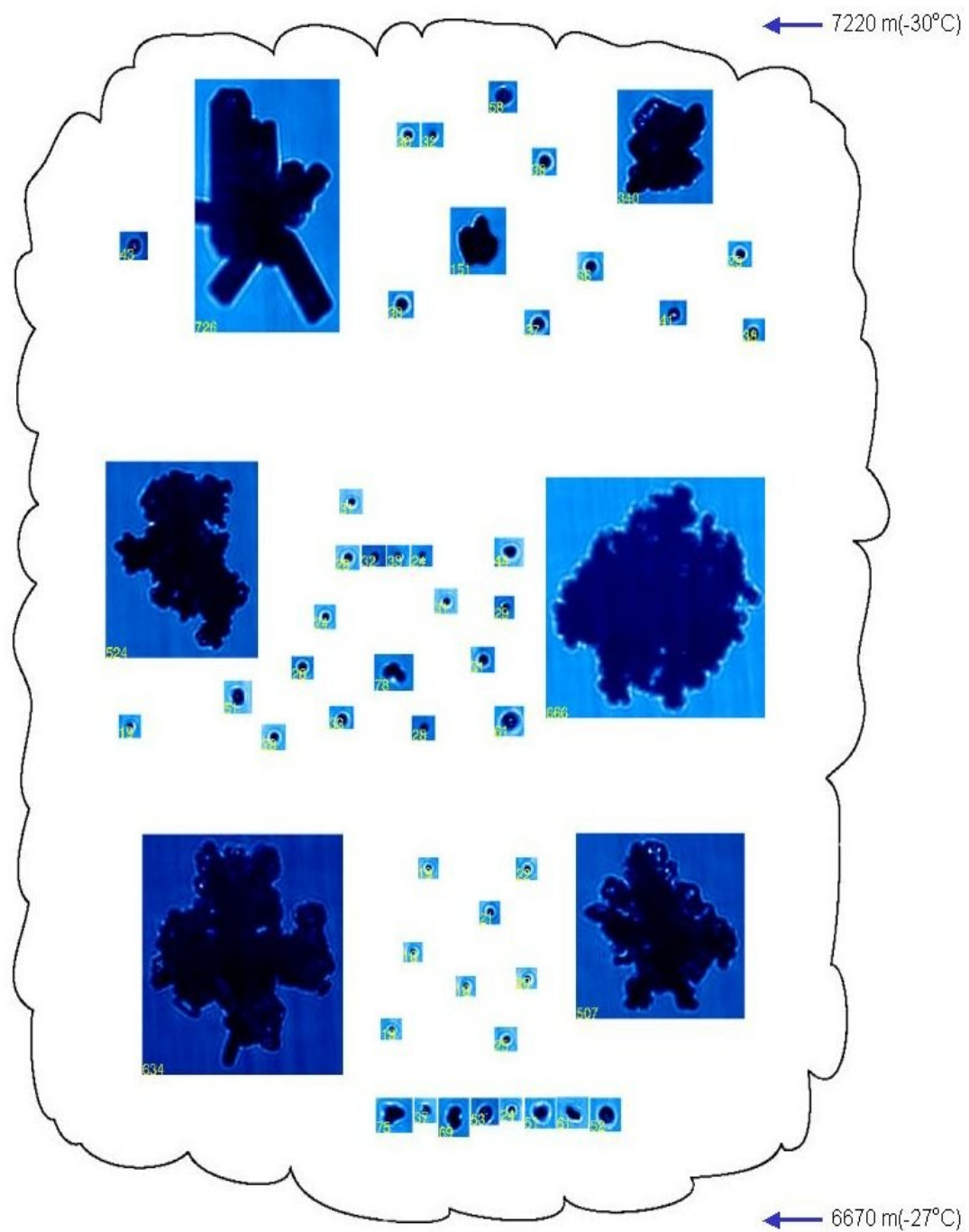
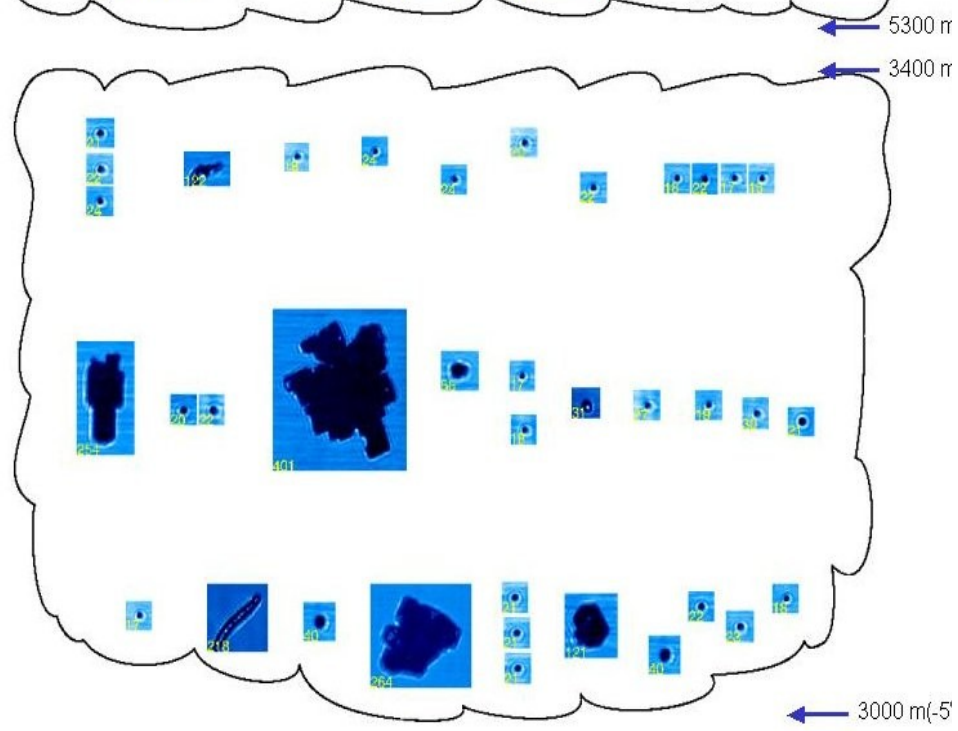
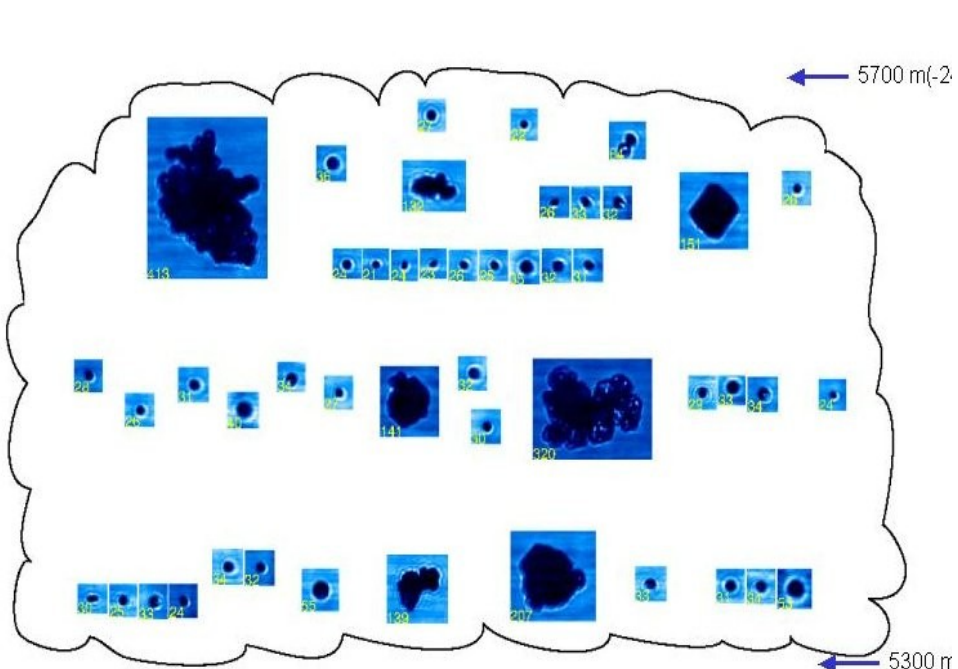
– ciepłych – składających się wyłącznie z kropeł wody (ang. warm clouds),

– lodowych – składających się wyłącznie z kryształków lodu (ang. ice clouds)

mieszanych – zawierających zarówno krople jak i kryształki (ang. mixed phase clouds).



Chmury powstają zawsze tam, gdzie temperatura powietrza ma niższą wartość niż temperatura punktu rosy lub punktu szronu. To umożliwia przemianę fazową – kondensację obecnej w powietrzu pary wodnej.



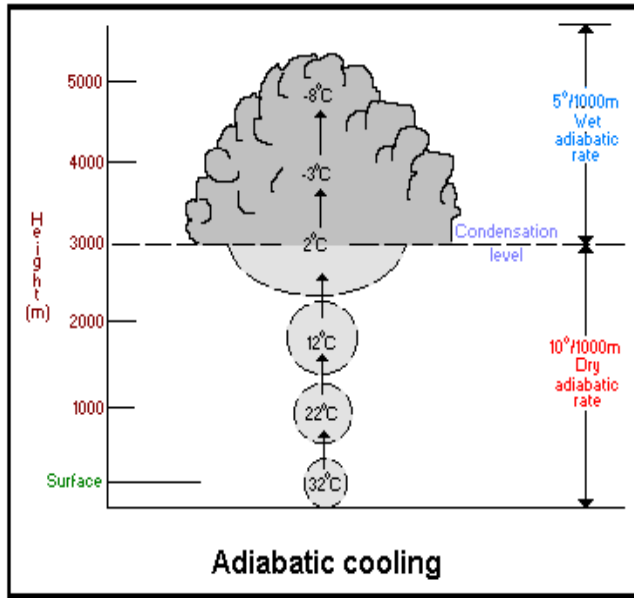
Cząstki chmurowe na różnych wysokościach zaobserwowane w warunkach naturalnych przyrządem CPI (Cloud Particle Imager, SPEC Inc.)

Procesy fizyczne prowadzące do kondensacji:

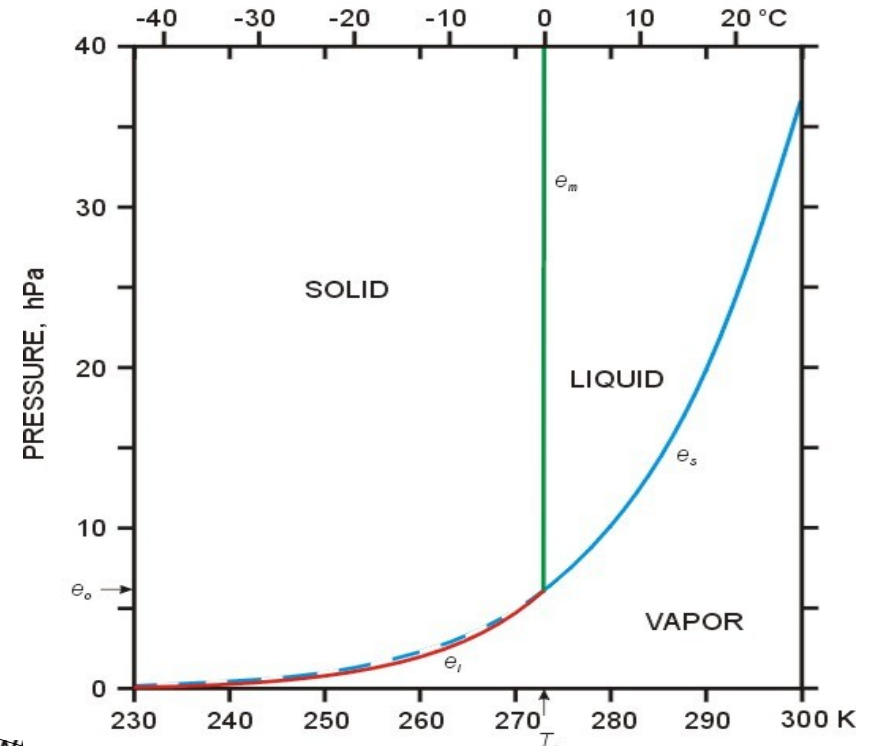
Rozprężanie adiabatyczne (np. w ruchach wstępujących)

Ochładzanie izobaryczne (radiacyjne, przez przewodnictwo);

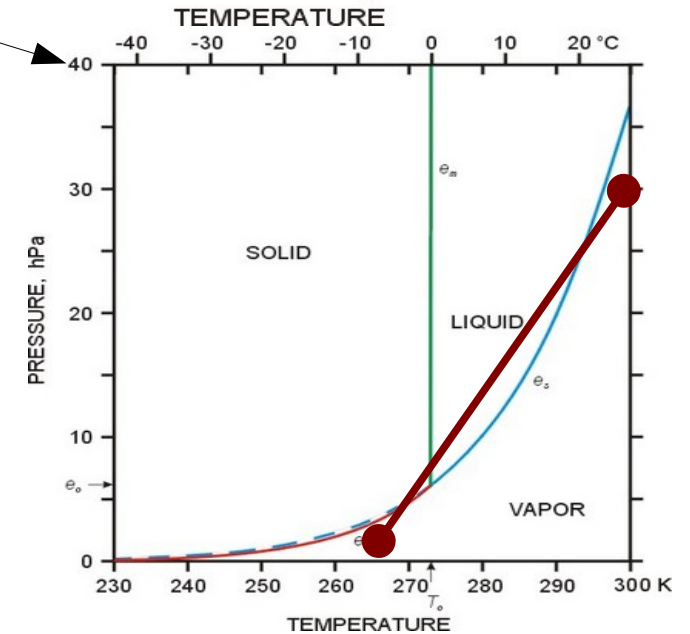
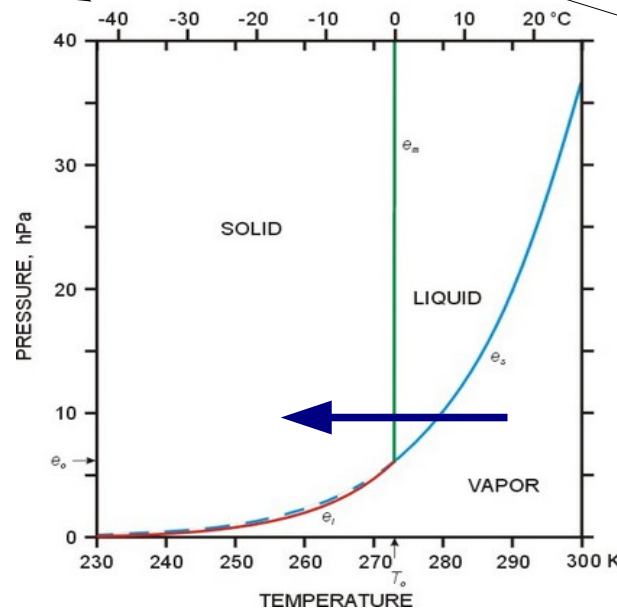
Mieszanie izobaryczne..



PHASE DIAGRAM OF WATER



PHASE DIAGRAM OF W



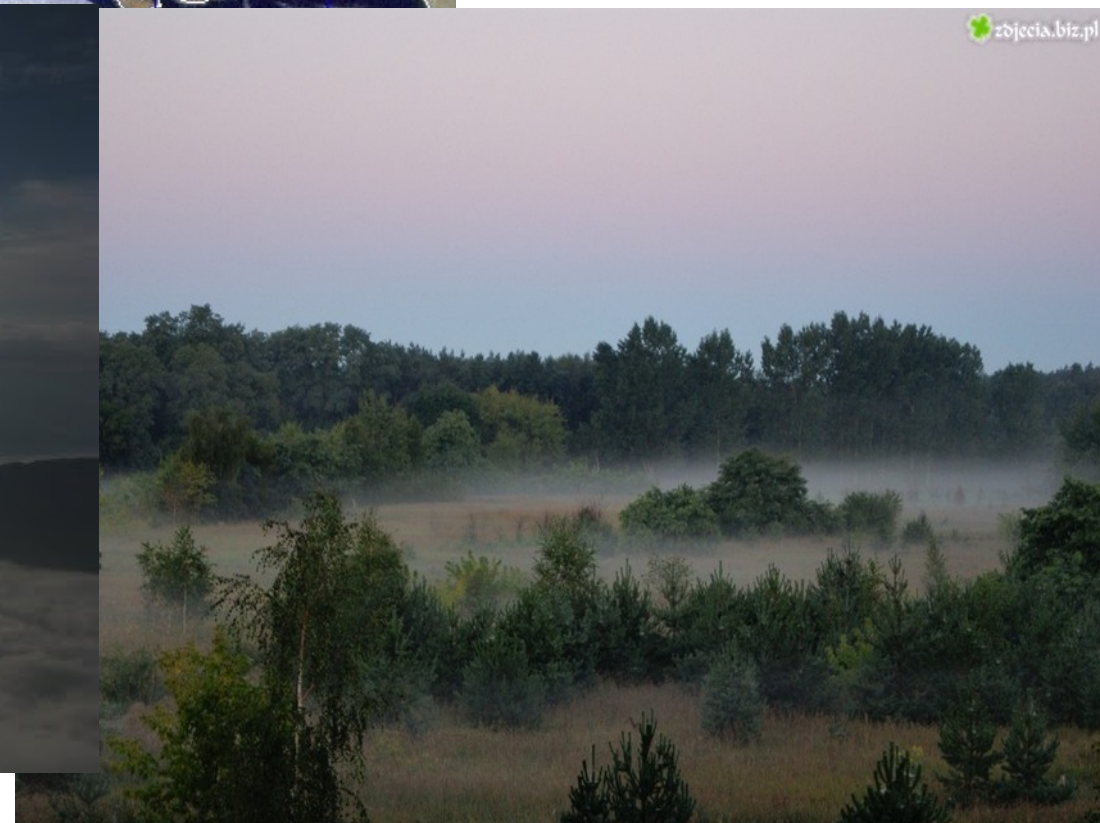
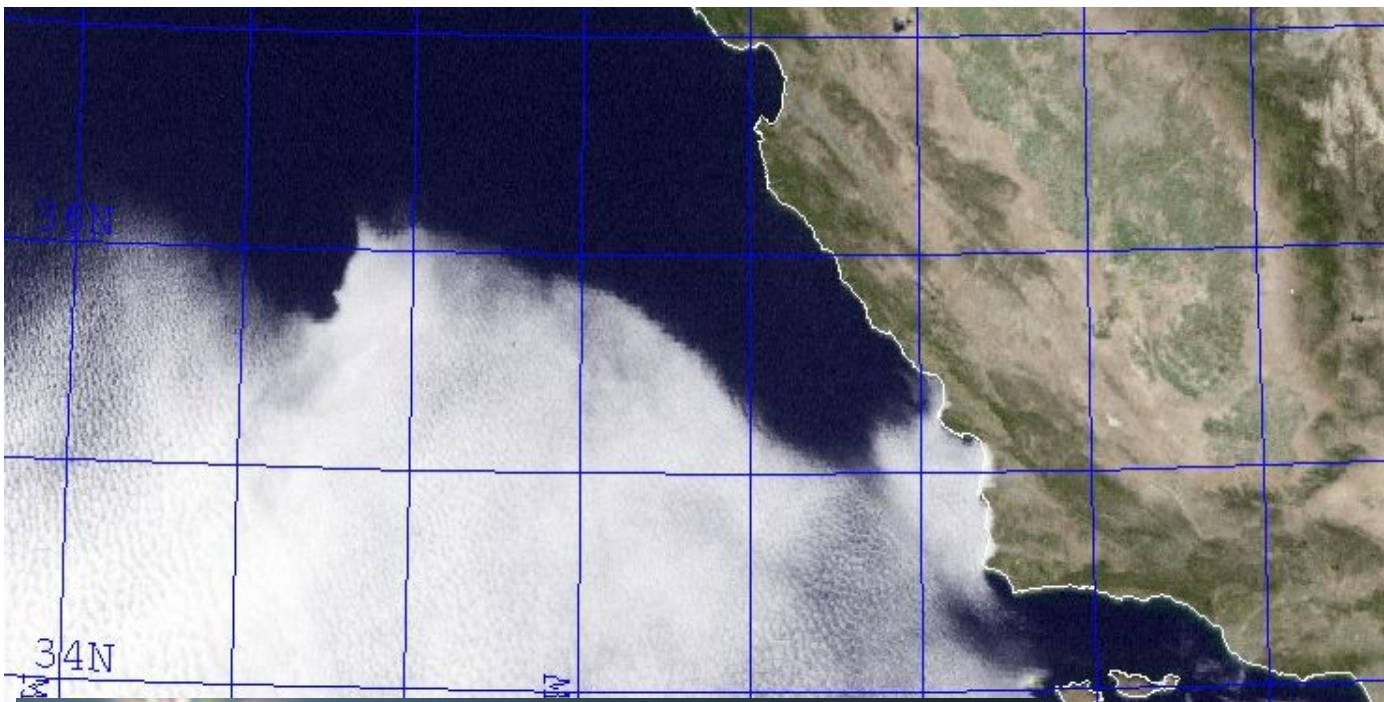


Formowanie się chmur wskutek adiabaty- cznego spadku ciśnienia.



Powstawanie chmur
wskutek ochładzania
izobarycznego

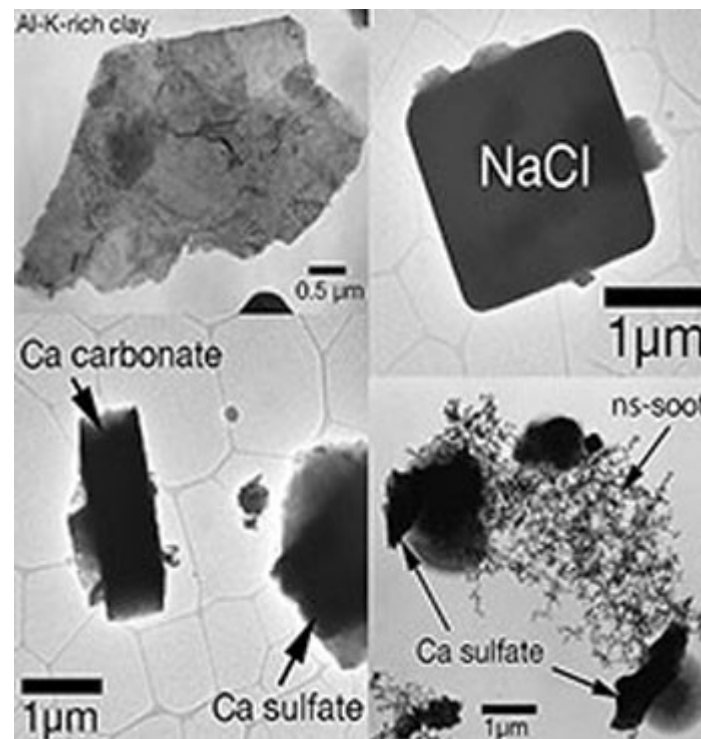
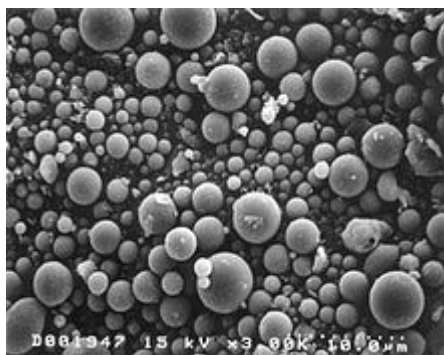
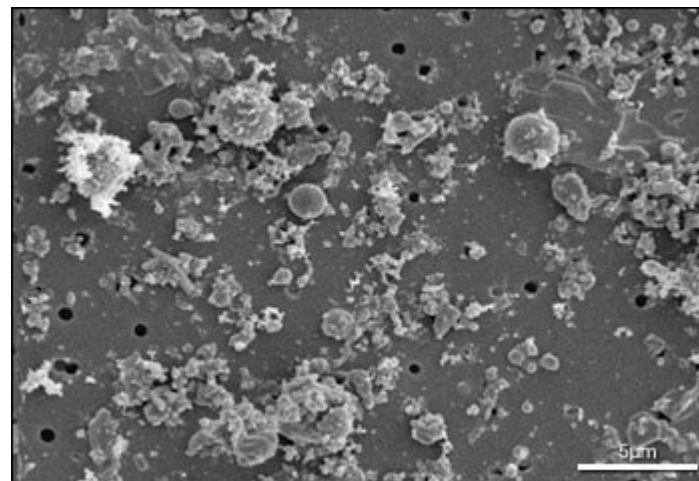
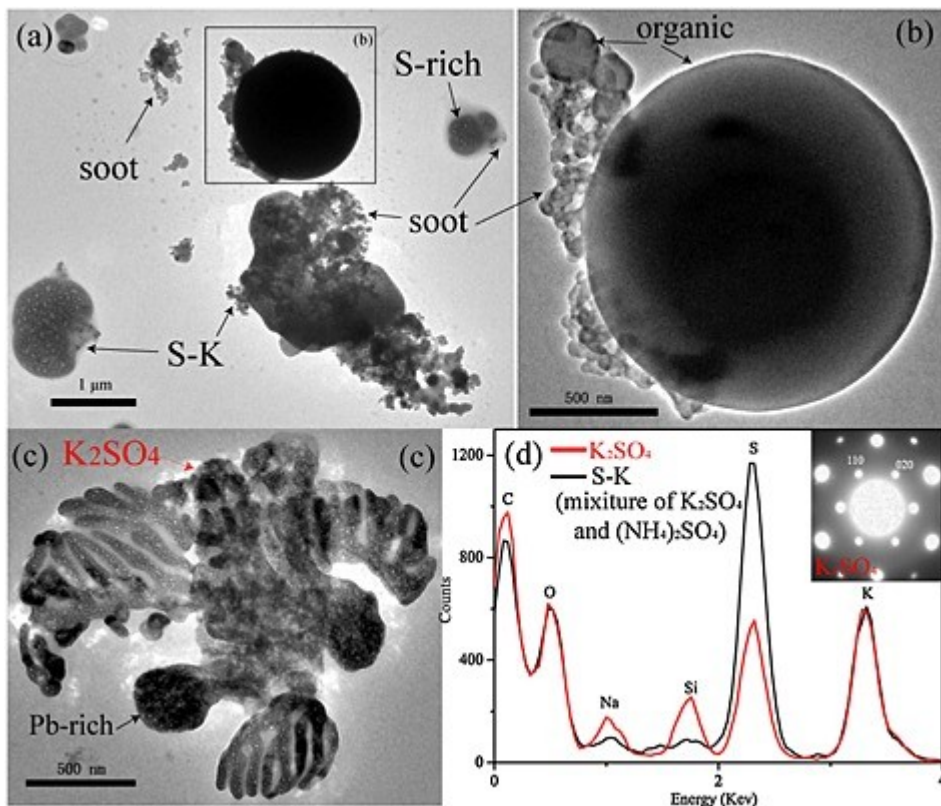
(na ogół wskutek
wypromieniowania w
podczerwieni).



Powstawanie chmur wskutek mieszania izobarycznego dwóch mas powietrza o różnych temperaturach.

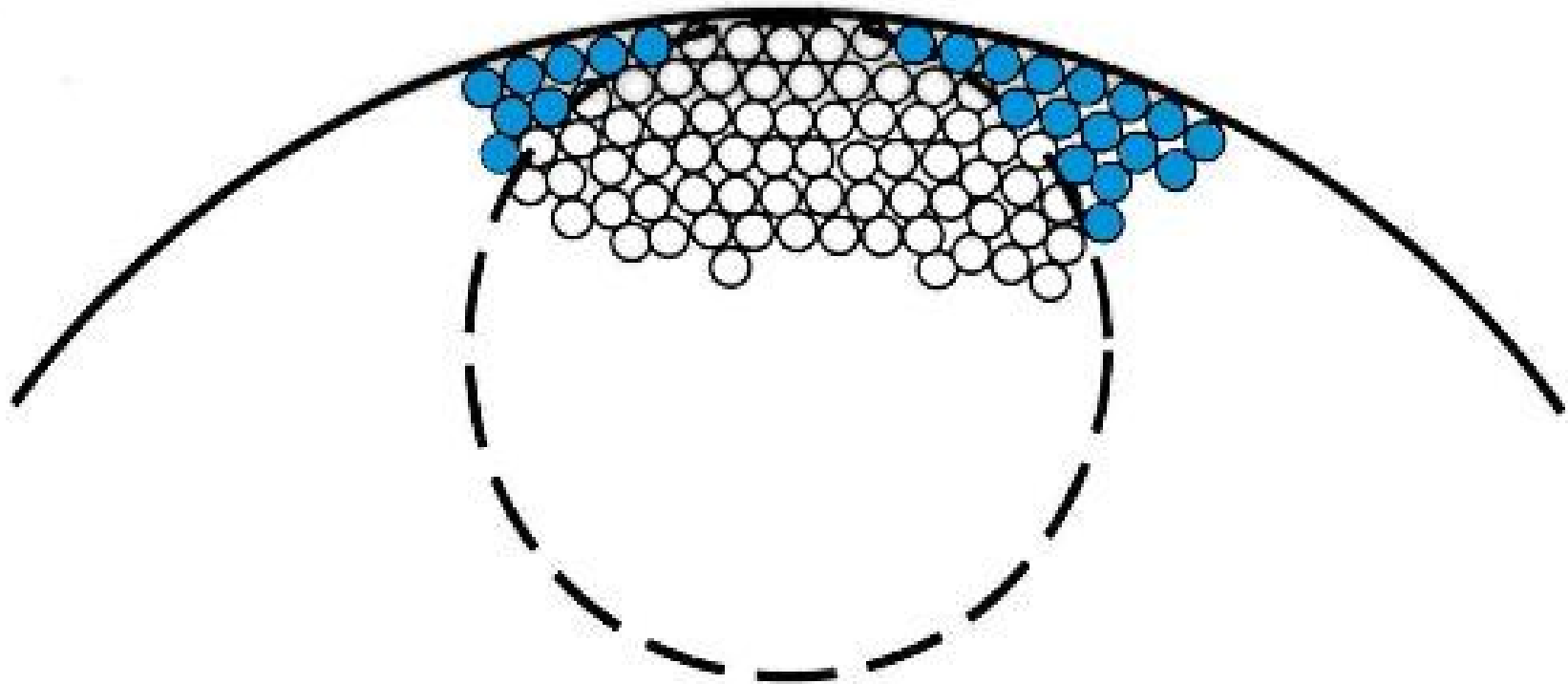


Aerozole – na nich zachodzi kondensacja

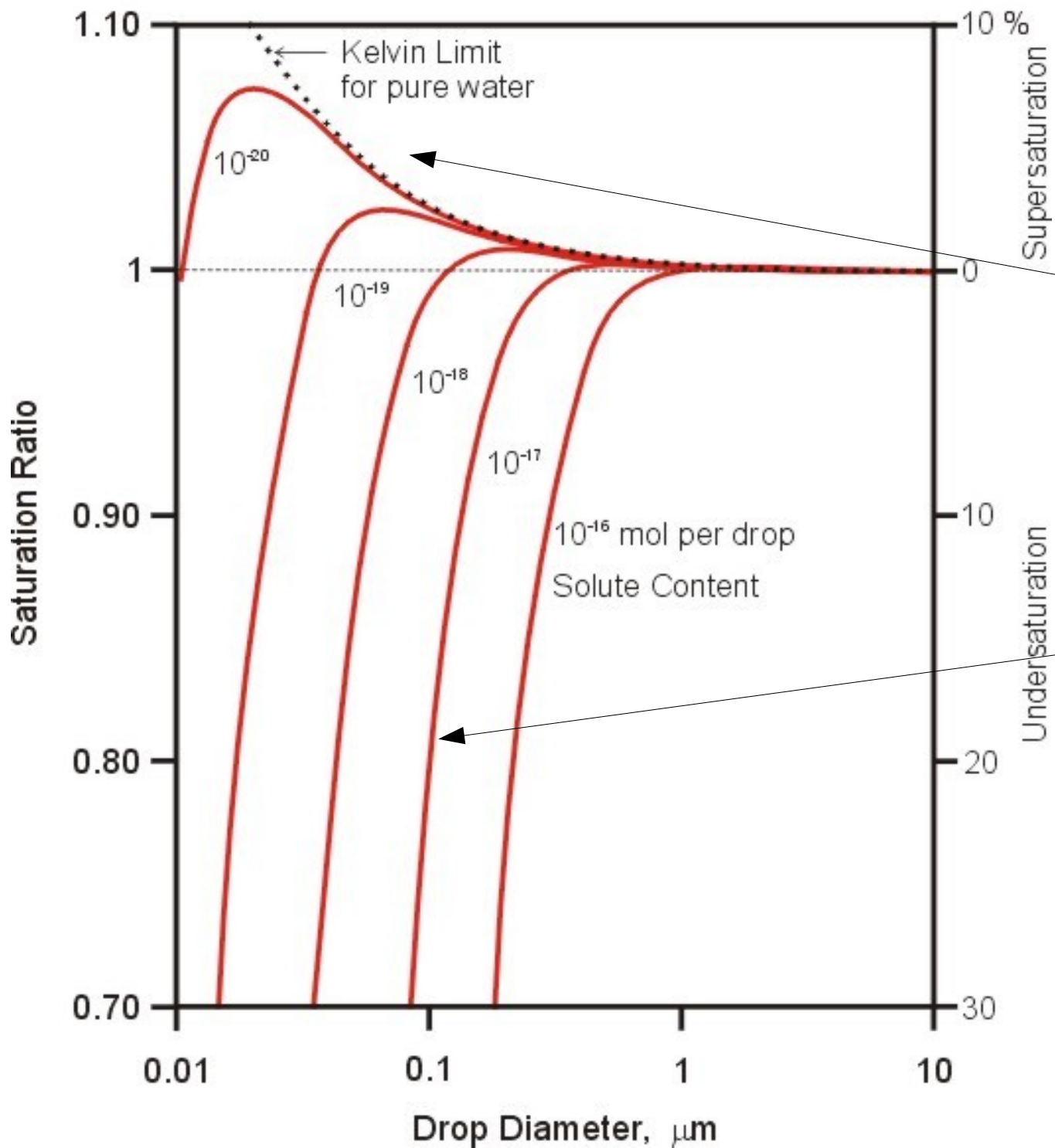


EFEKT ZAKRZYWIENIA POWIERZCHNI KROPLI

INTEPRETACJA MOLEKULARNA



KOEHLER CURVES

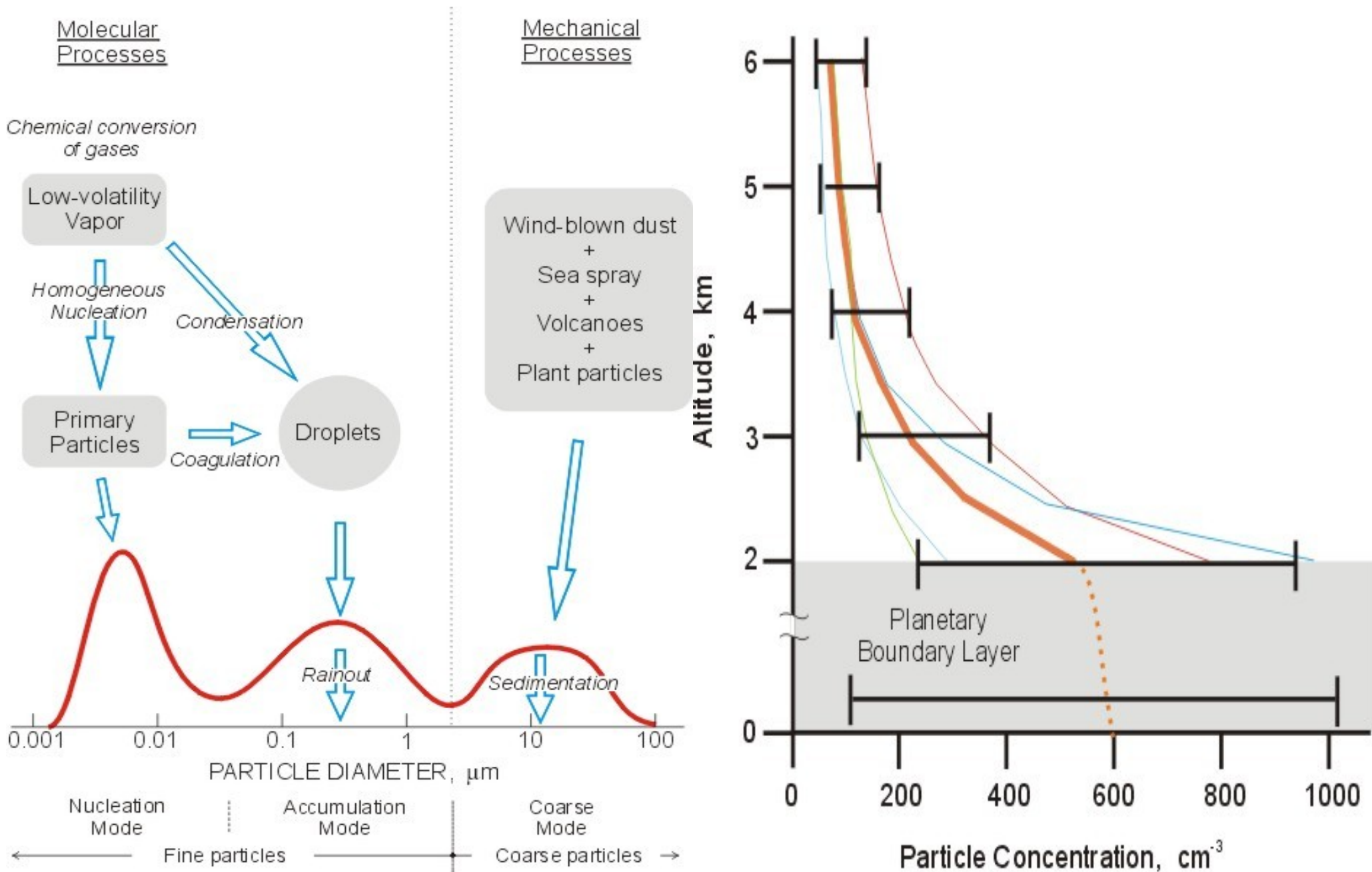


Kondensacja heterogeniczna: :

-efekt zakrzywienia powierzchni – utrudnia kondensację (podwyższają ciśnienie nasycenia pary)

-efekty higroskopowe (sole rozpuszczalne) – obniżają ciśnienie nasycenia pary.

Aerozole – na nich zachodzi kondensacja.



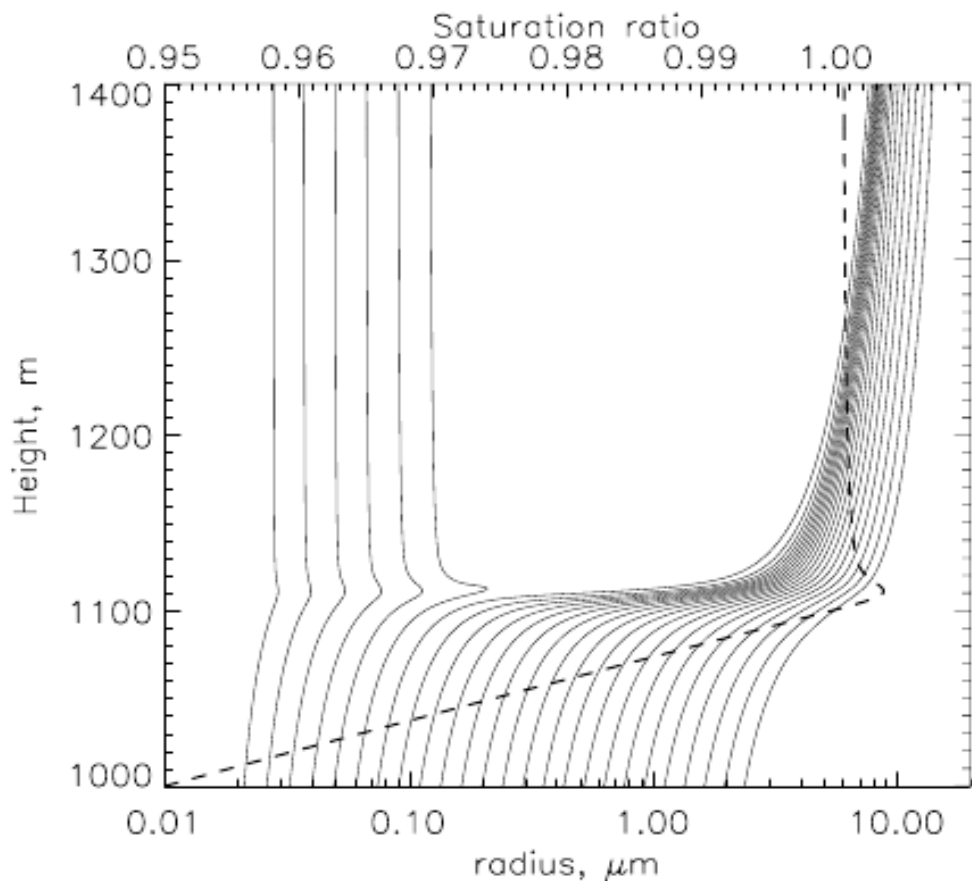


Fig. 4. Zmiana promienia kropli wraz z wysokością w symulacji zainicjowanej aerozolem siarczanu amonu o średniej geometrycznej średnicy 140 nm, odchyleniu standardowym $\sigma = 1,7$ i koncentracji cząstek aerozolu 300 cm^{-3} (odpowiada $0,76 \mu\text{g m}^{-3}$). Symulację rozpoczęto przy wilgotności względnej 95% na wysokości 1000 m. Linie ciągłe reprezentują wybrane klasy wielkości aerozoli. Linia przerywana to współczynnik nasycenia.

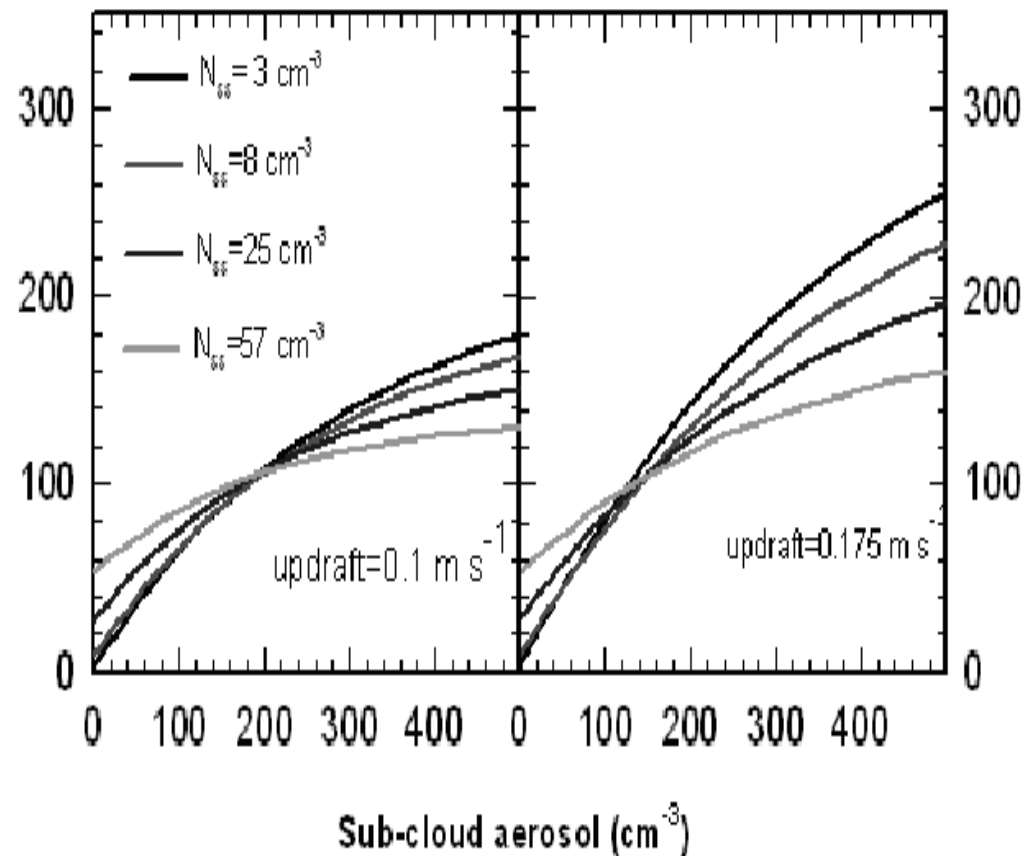


Fig. 5. Koncentracja kropelek chmur w funkcji aerozolu pod chmurą będącego mieszaniną CCN (jąder kondensacji) siarczanów i soli morskiej.

Aktywacja jąder kondensacji (CCN) u podstawy chmury.

Umowna granica między
kropelkami chmury
i kropelkami deszczu

$$r=100$$

$$v=70$$

Typowe jądro
kondensacji

$$r=0,1$$

$$n=10^6$$

$$v=0,0001$$

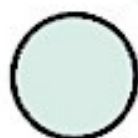
Duże kropelki
chmury

$$r=50$$

$$n=10^3$$

$$v=27$$

Typowa kropelka
chmury



$$r=10$$

$$n=10^6$$

$$v=1$$

r – promień w mikrometrach

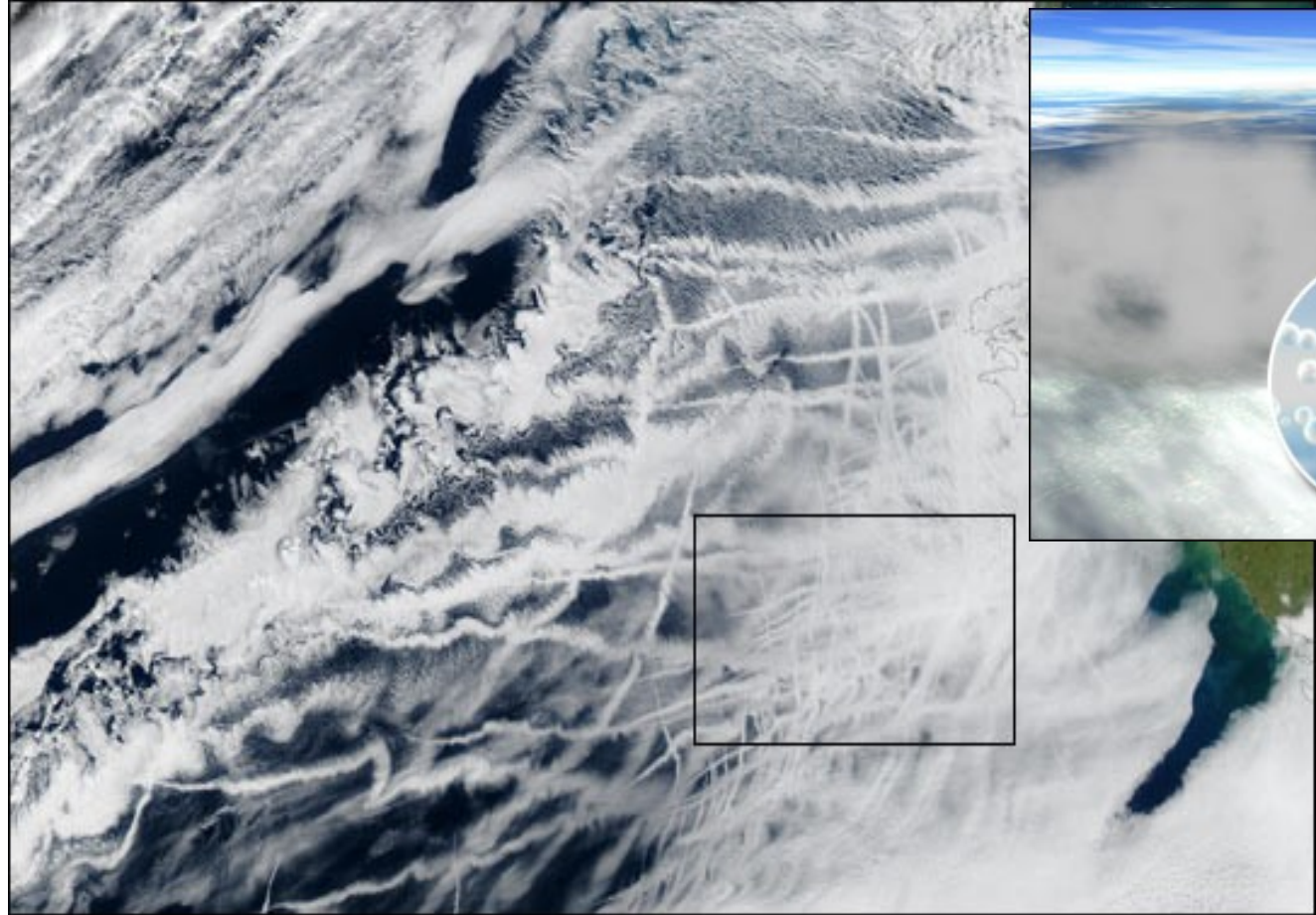
n – liczba cząstek w dm^3

v – prędkość opadania w cm/s

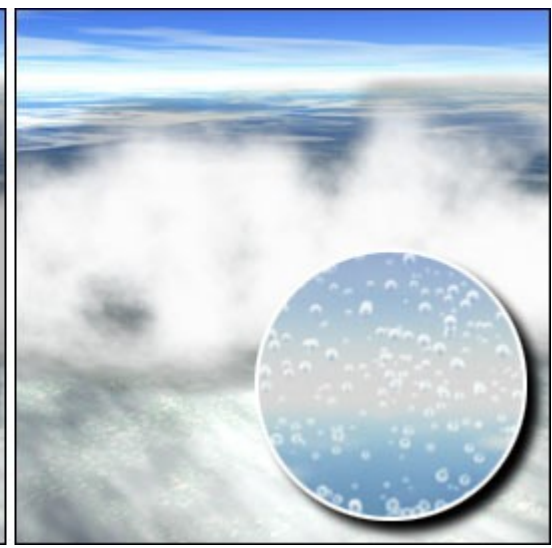
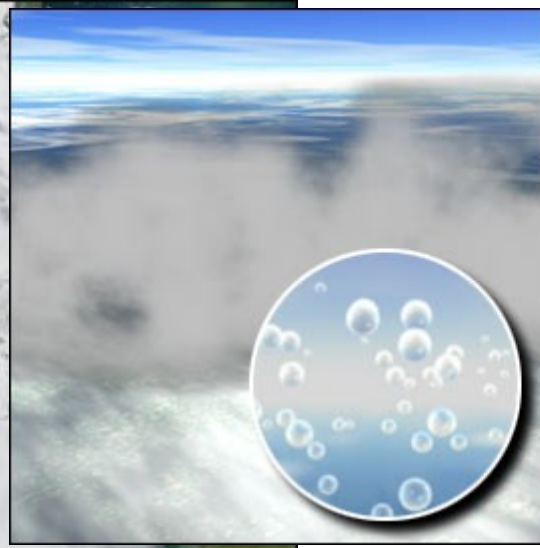
Typowa kropla deszczu

$$r=1000, n=1, v=650$$

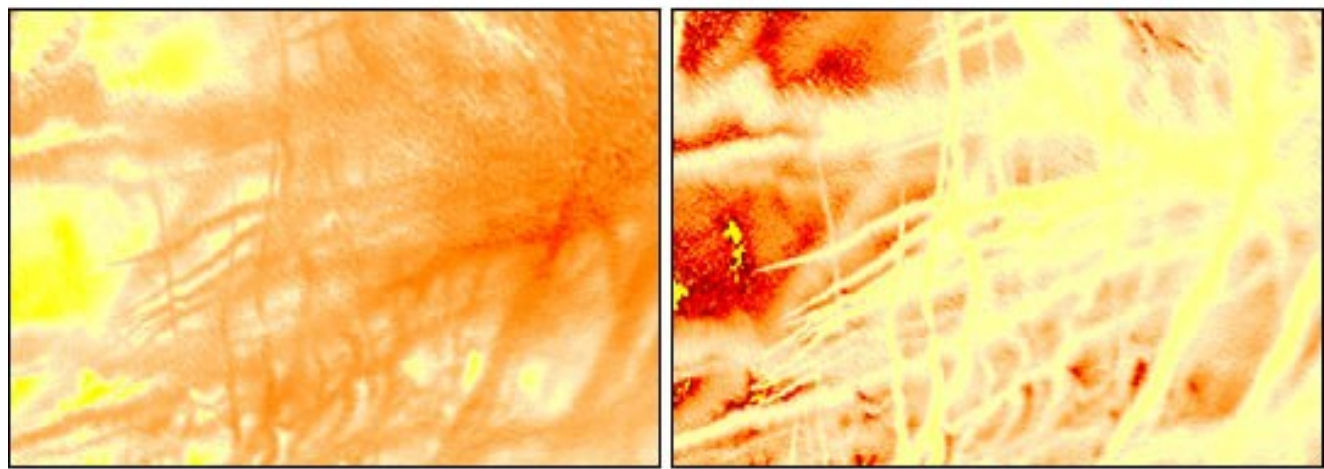
Typowe rozmiary, koncentracja i prędkość opadania
jąder kondensacji, kropel chmury i kropel deszczu



True Color

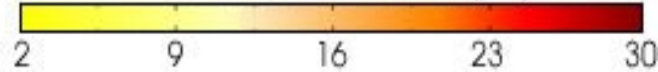


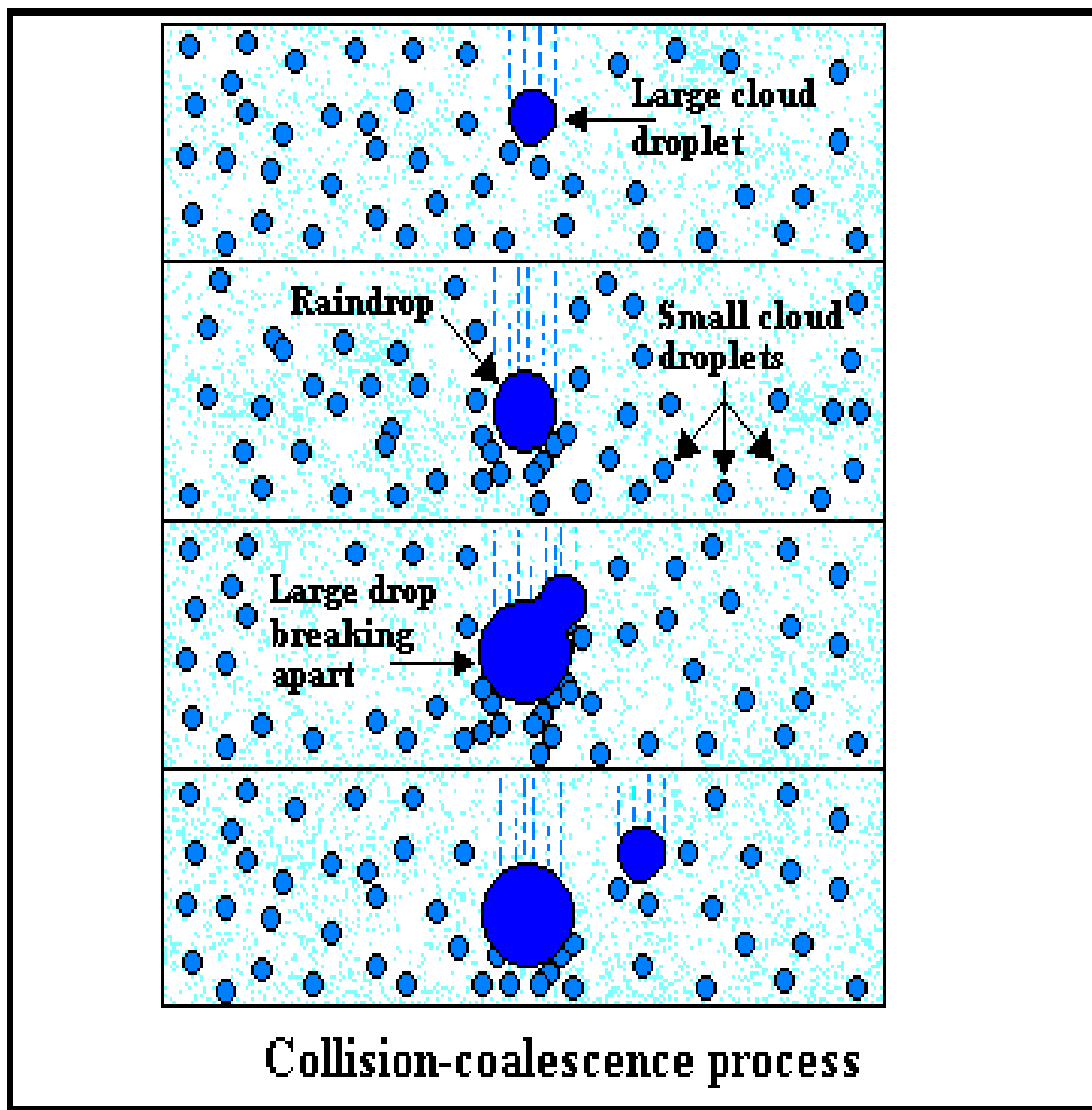
Wpływ aerozolu na budowę chmur (rozmiar kropelek) i w konsekwencji na ich własności radiacyjne: tzw. pośrednie efekty aerozolowe - pierwszy (albedo) drugi (czas trwania).



Optical Thickness

Effective Particle Radius (μm)

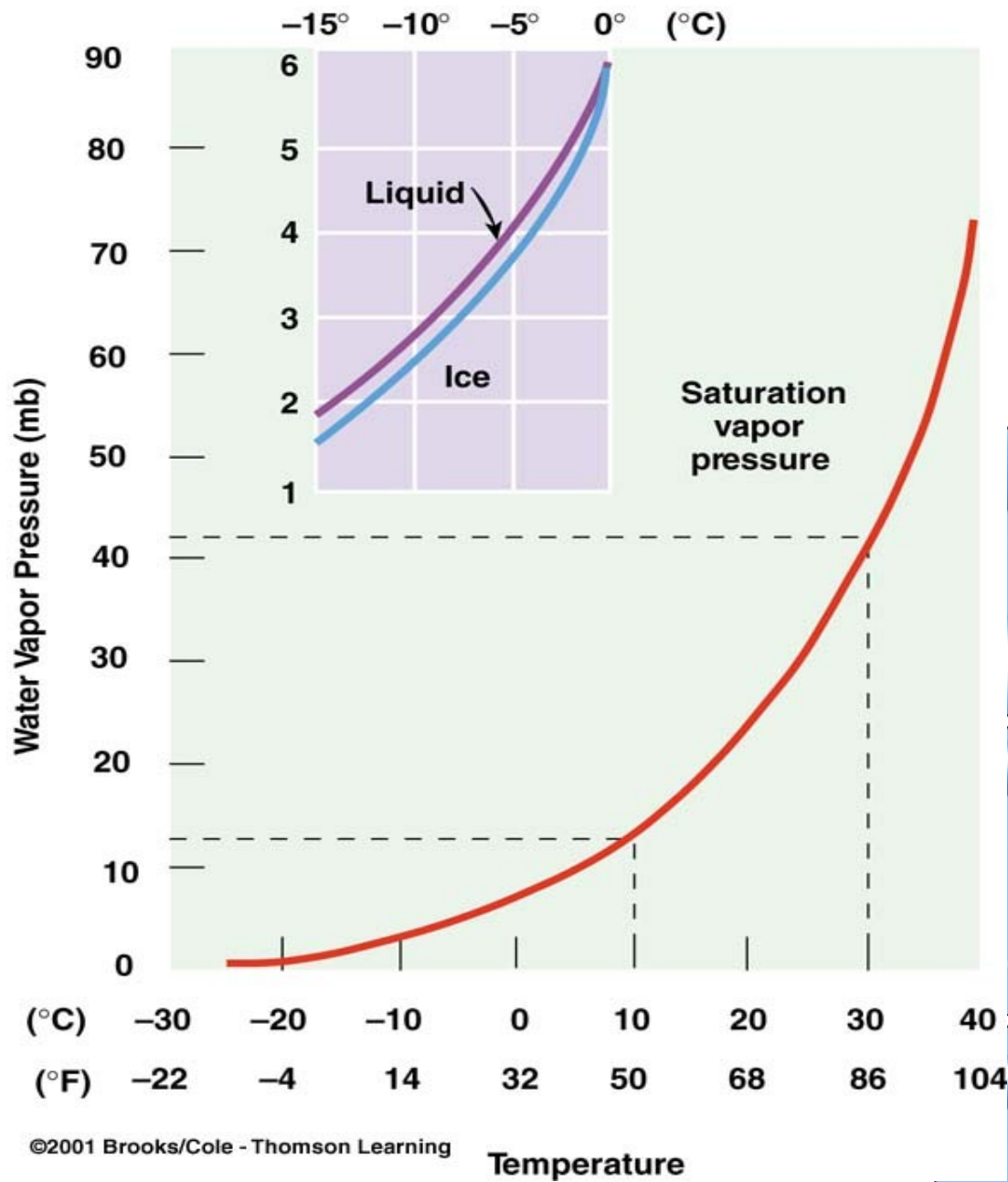




Masa typowej kropli deszczu jest MILION razy większa od masy kropli chmurowej powstałej w wyniku kondensacji.

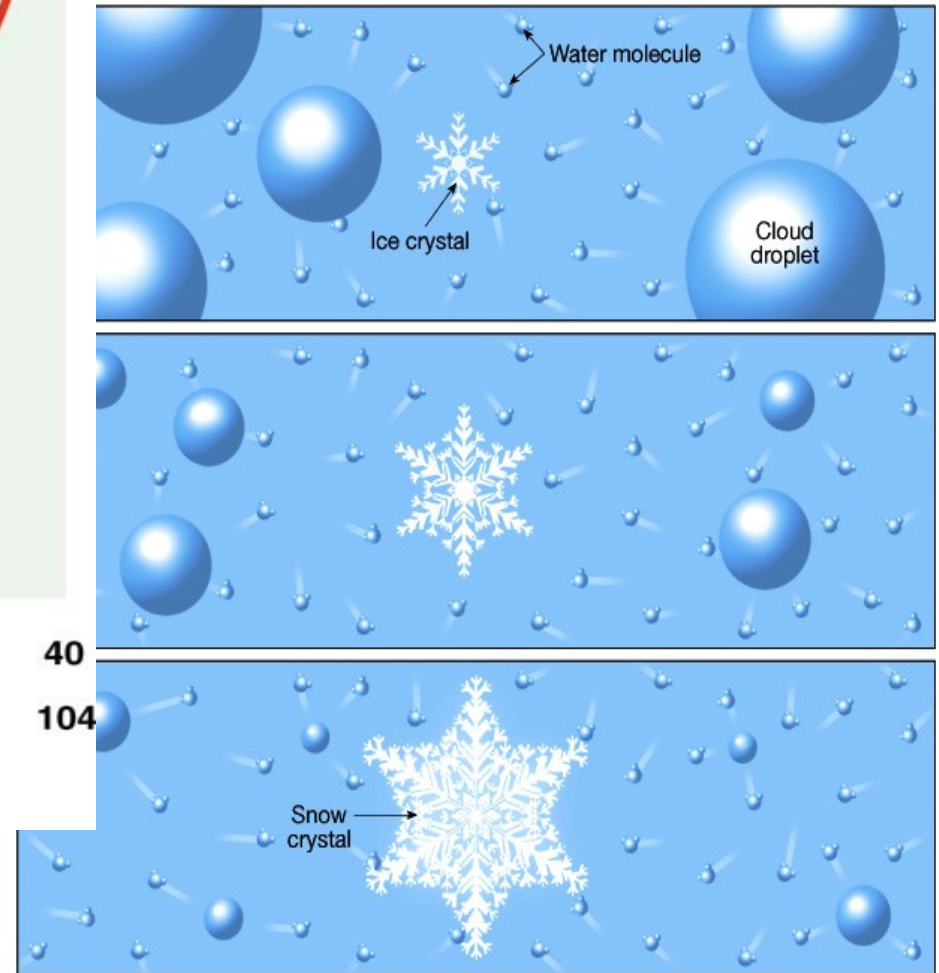
Takie krople opadowe mogą powstać tylko w procesie zderzeń i zlewania się kropli (collision coalescence), ale żeby mógł on zajść potrzebne są na początku krople o zróżnicowanych rozmiarach (różnych prędkościach opadania)!

Inny mechanizm powstawania opadu: proces Bergerona (Wegenera, Findeisena)

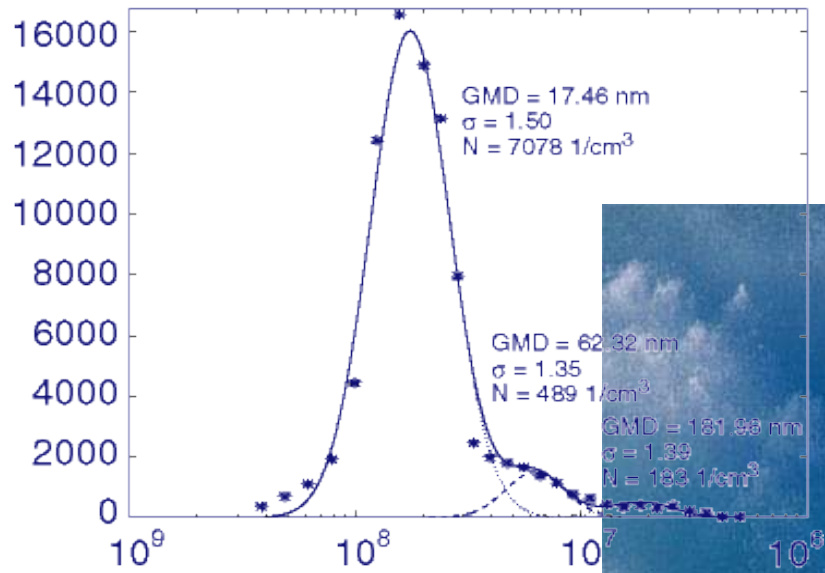


©2001 Brooks/Cole - Thomson Learning

Temperature

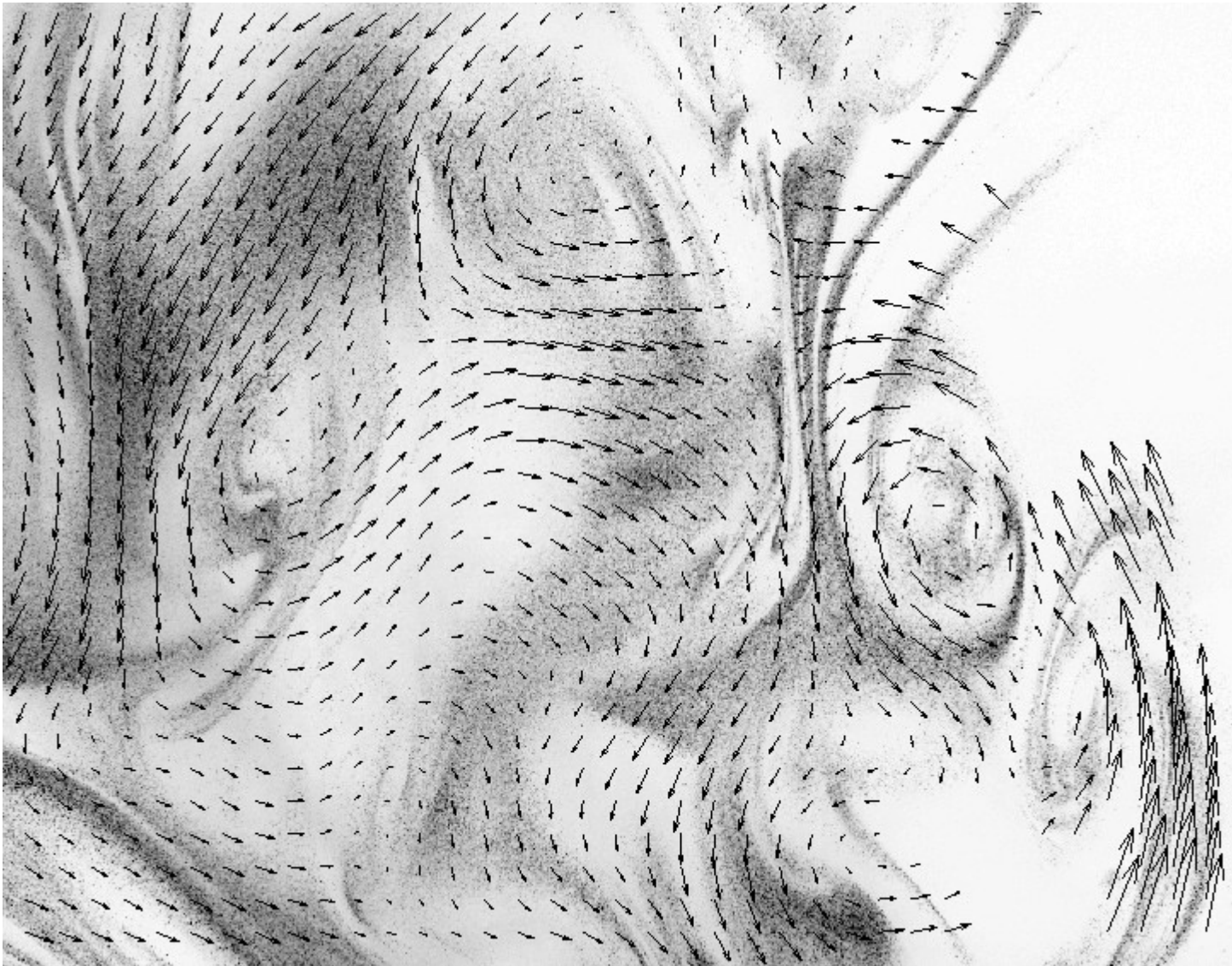


Hyytiälä 13.4.1996 15:39-15:49 p.m.



Jeszcze inny mechanizm:
gigantyczne jądra
kondensacji.



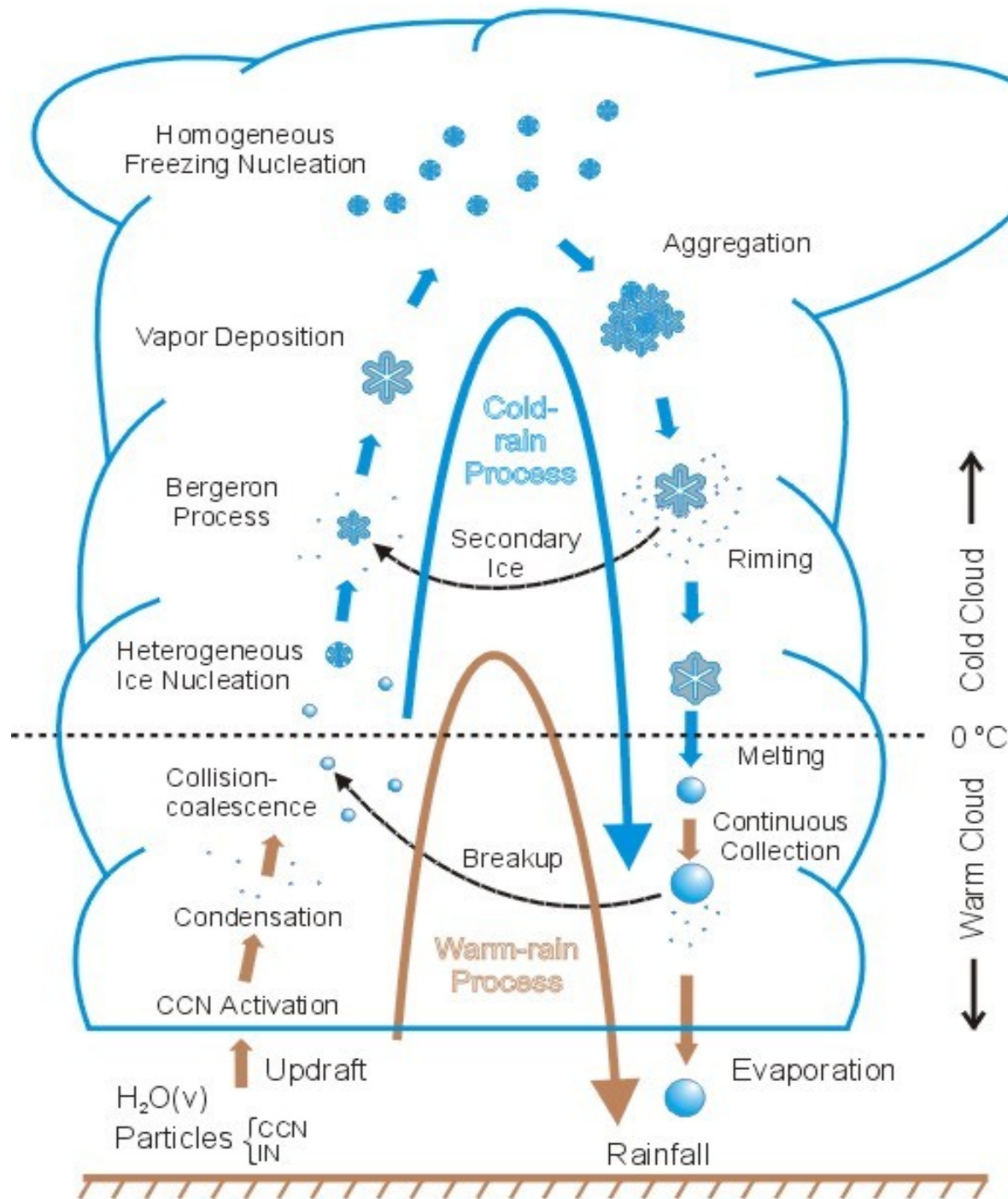


Jeszcze inne
mechanizmy
powstawania
opadu
związane z
turbulencją:

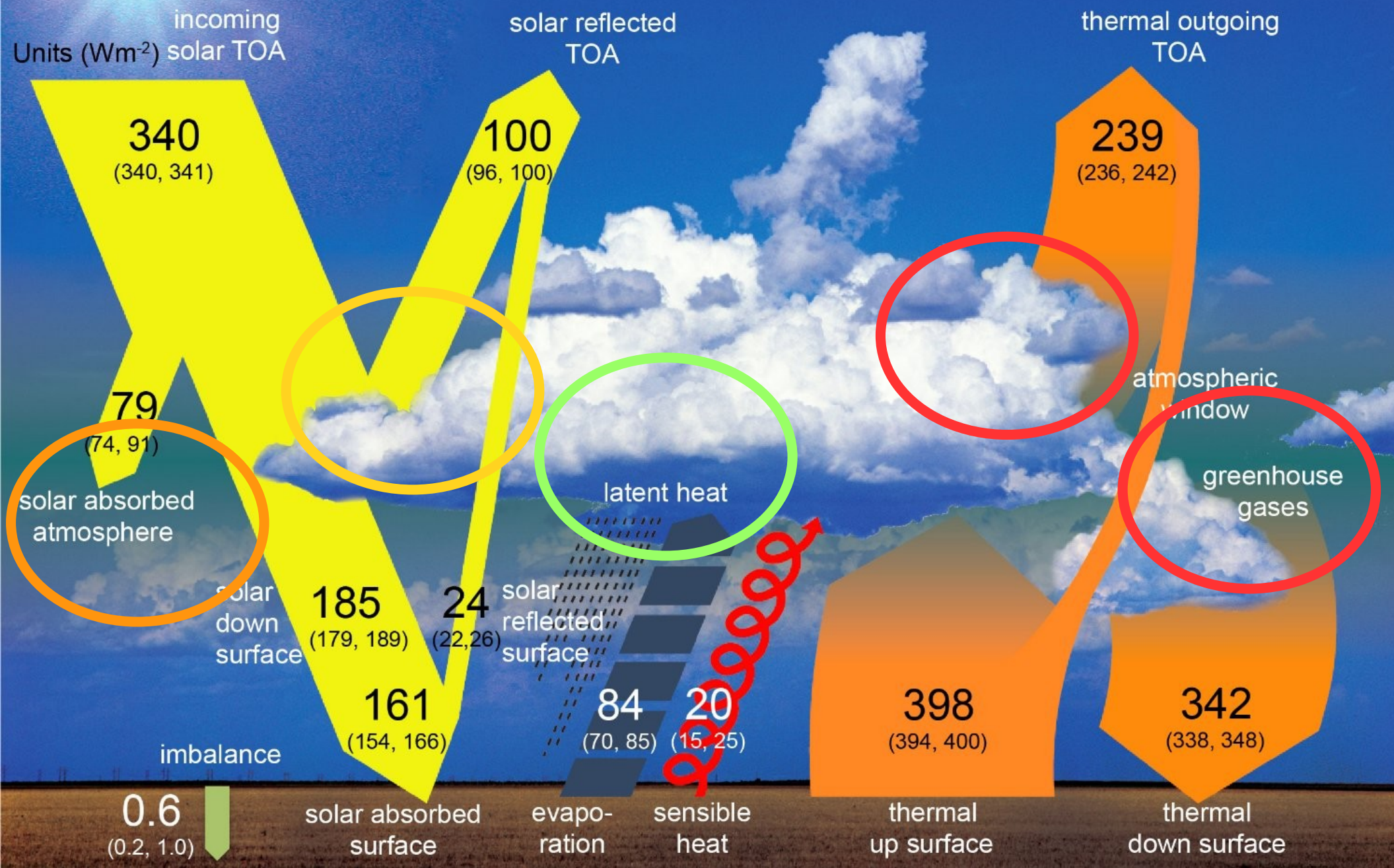
preferential
concentration,

mieszanie
jednorodne i
niejednorodne.

PRECIPITATION MECHANISMS

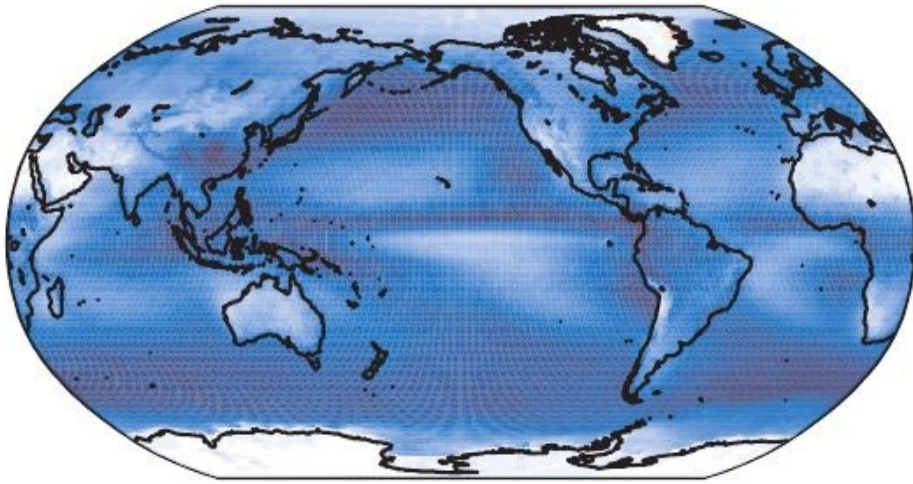


Mechanizmy opadowe

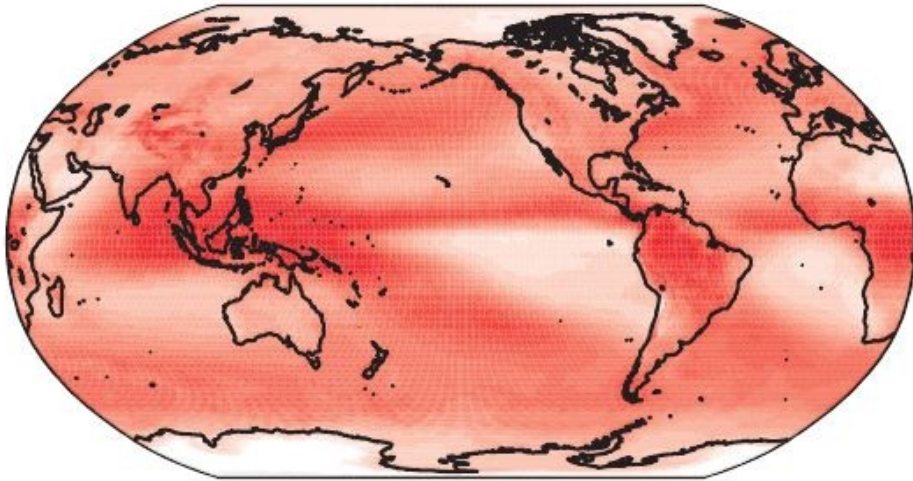


Uśredniony bilans energii systemu klimatycznego. Wartości w W/m^2 .
 W nawiasach zakres niepewności i zmienności.

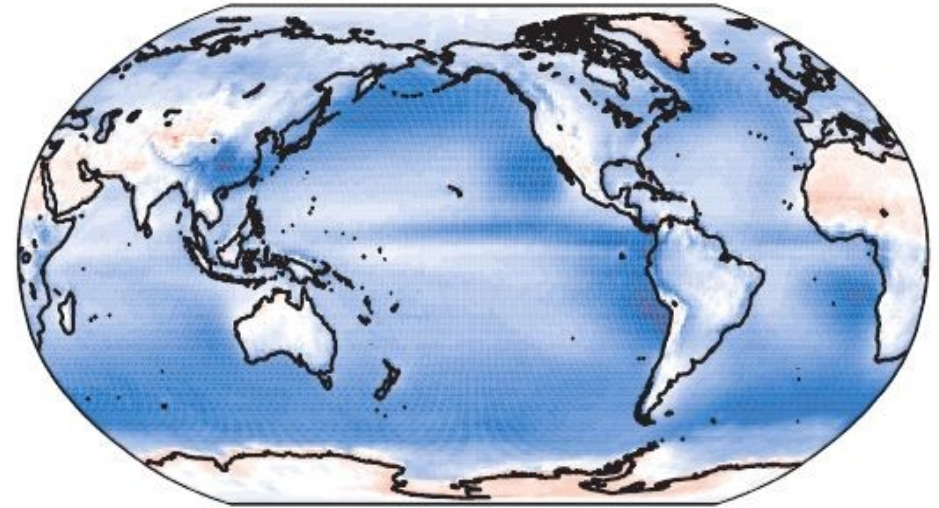
(a) Shortwave (global mean = -47.3 W m^{-2})



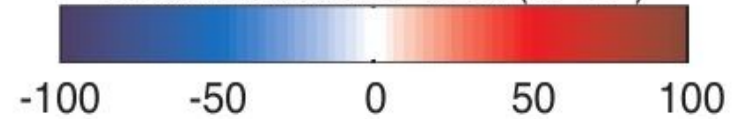
(b) Longwave (global mean = 26.2 W m^{-2})



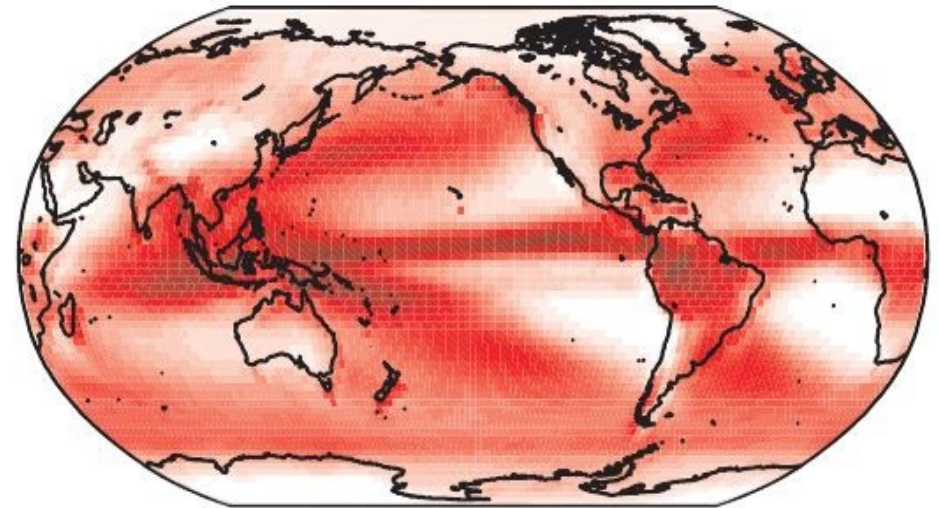
(c) Net (global mean = -21.1 W m^{-2})



Cloud Radiative Effect (W m^{-2})



(d) Precipitation (global mean = 2.7 mm day^{-1})

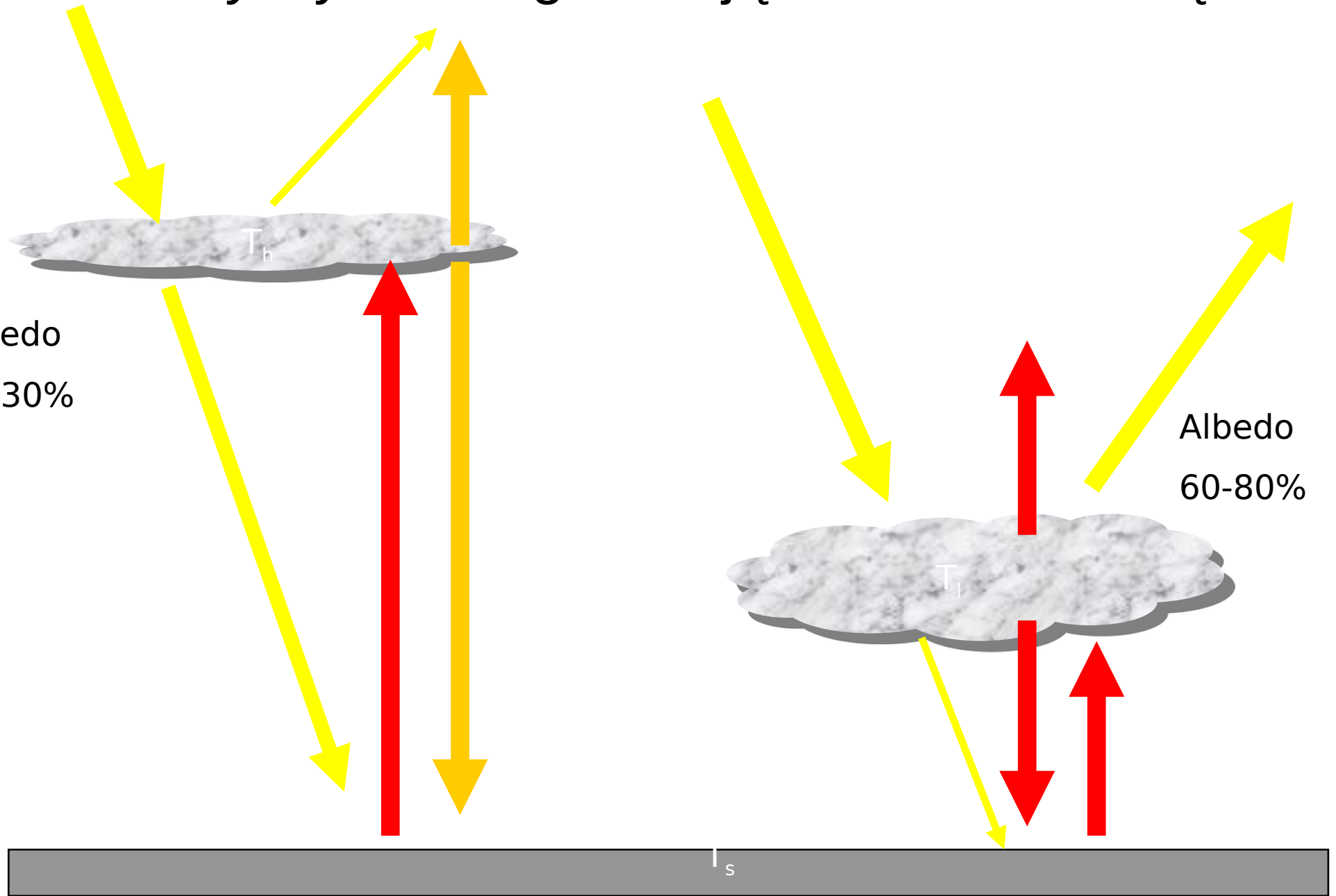


(mm day^{-1})



Chmury i ich rola w procesach radiacyjnych i klimatycznych

Chmury wysokie ogrzewają a niskie chłodzą...



$$T_s \approx T_l \quad T_s \gg T_h$$

Change in effective radiative forcing from 1750 to 2019

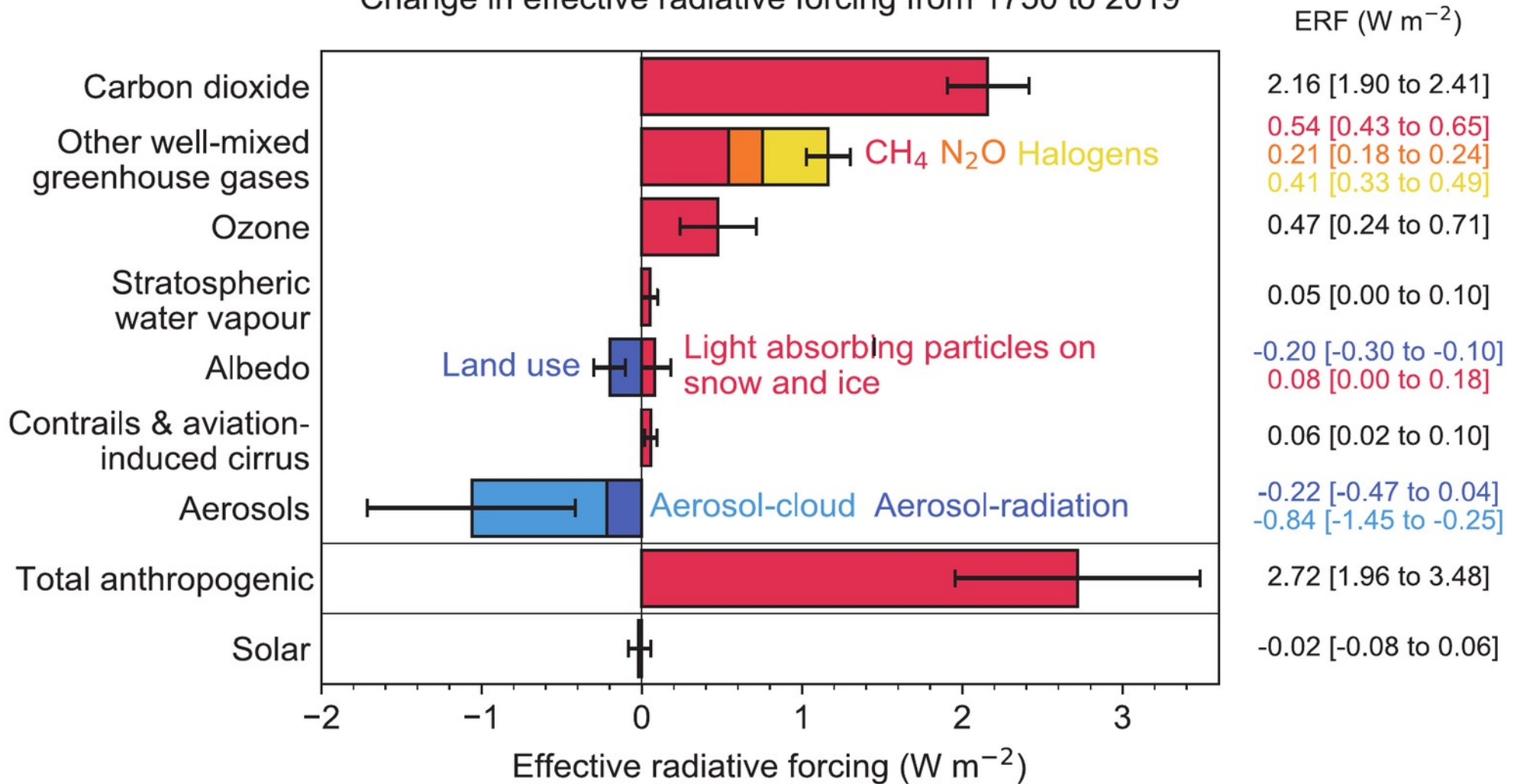
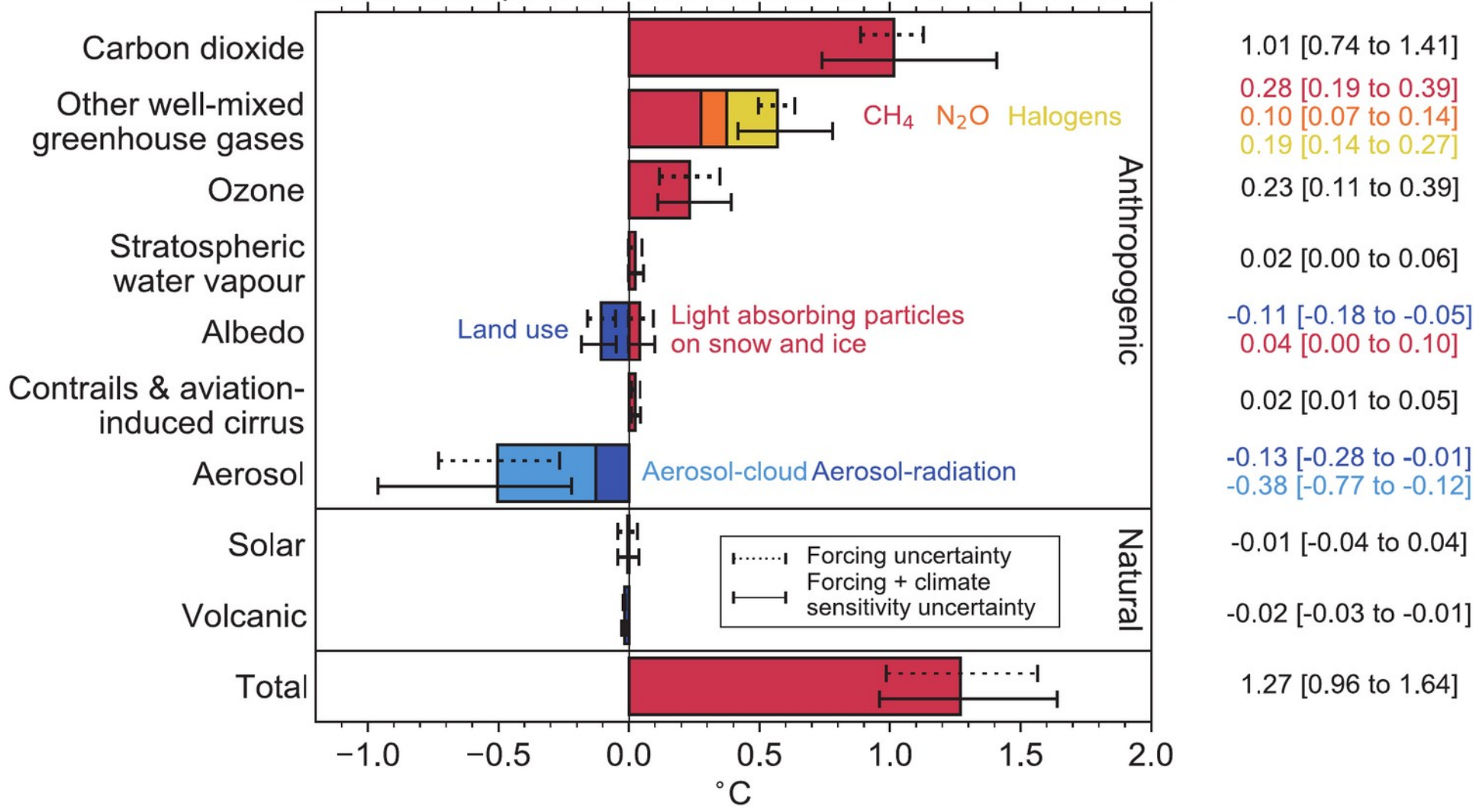
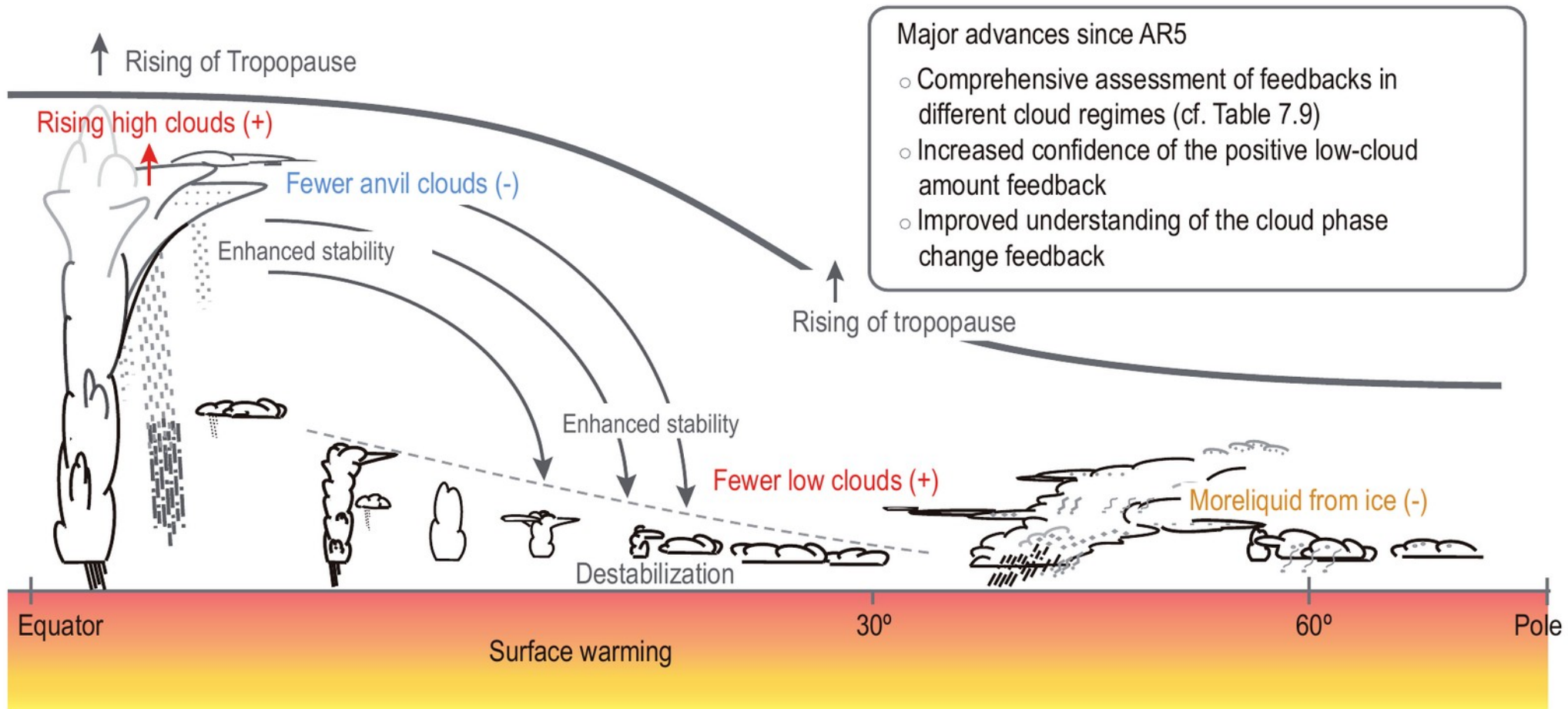


Figure 7.6 | Change in effective radiative forcing (ERF) from 1750 to 2019 by contributing forcing agents (carbon dioxide, other well-mixed greenhouse gases (WMGHGs), ozone, stratospheric water vapour, surface albedo, contrails and aviation-induced cirrus, aerosols, anthropogenic total, and solar).

Solid bars represent best estimates, and very likely (5–95%) ranges are given by error bars.

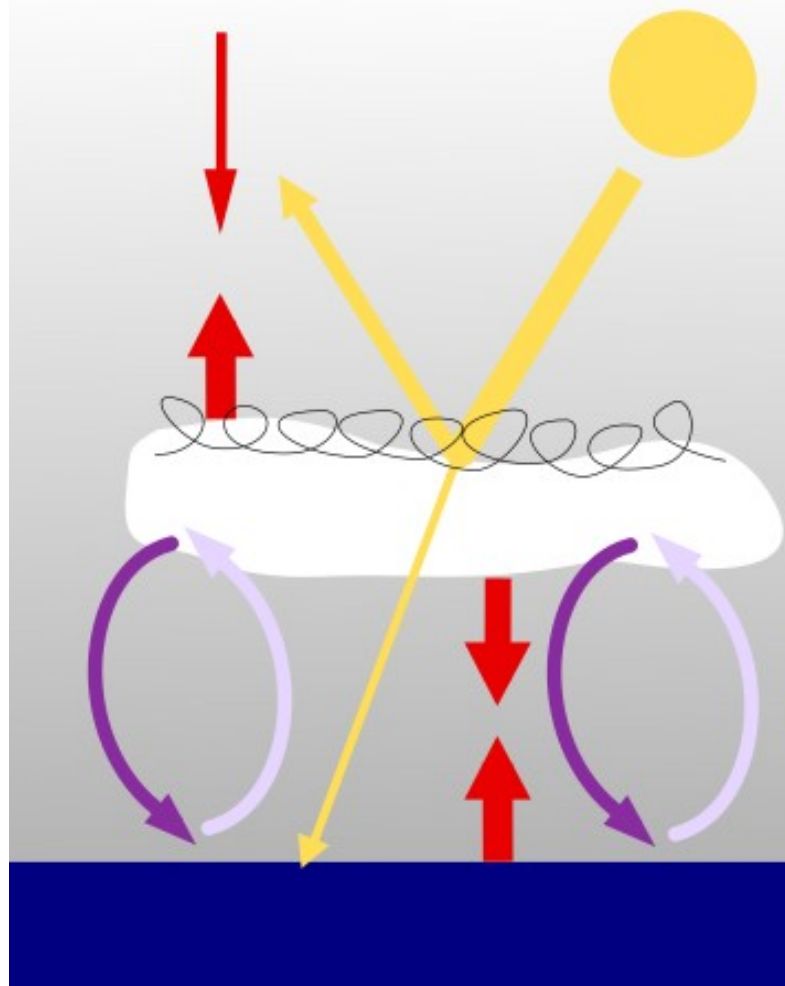
Simulated temperature contributions in 2019 relative to 1750



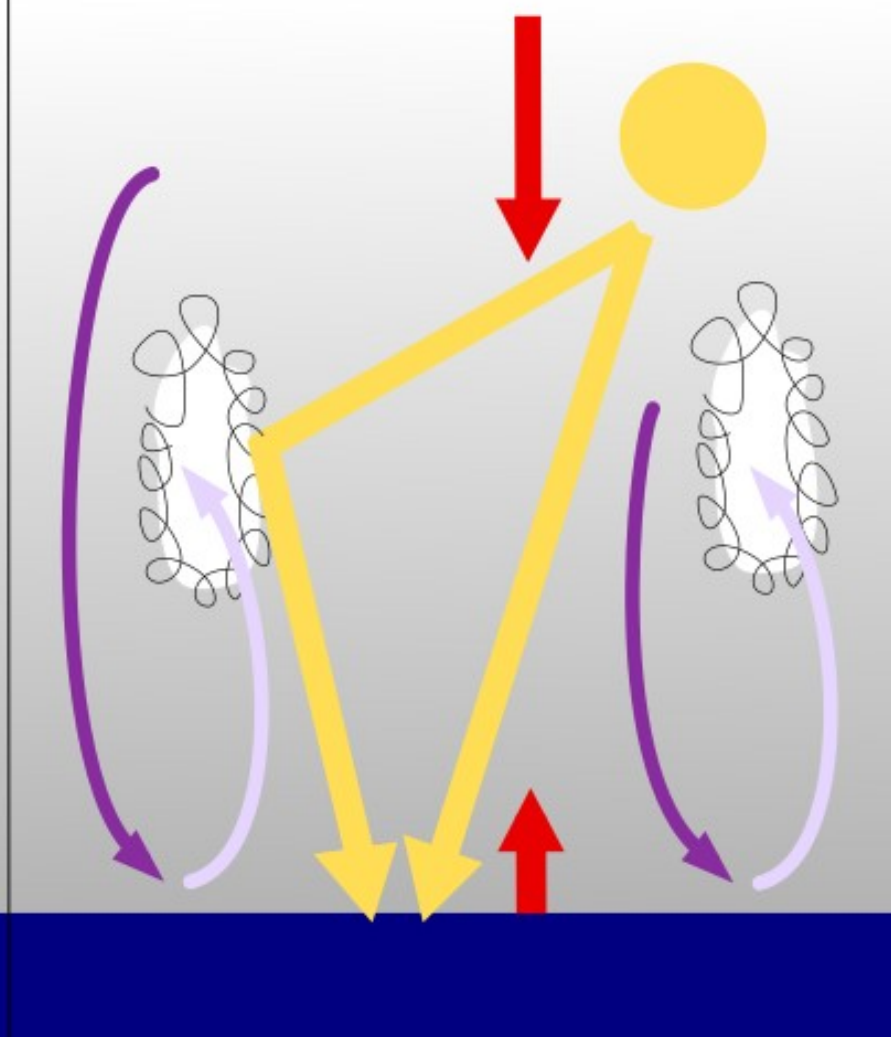


Schematic cross section of diverse cloud responses to surface warming from the tropics to polar regions. Thick solid and dashed curves indicate the tropopause and the subtropical inversion layer in the current climate, respectively. Thin grey text and arrows represent robust responses in the thermodynamic structure to greenhouse warming, of relevance to cloud changes. Text and arrows in red, orange and green show the major cloud responses assessed with high, medium and low confidence, respectively, and the sign of their feedbacks to the surface warming is indicated in the parenthesis. Major advances since AR5 are listed in the box.

400 ppm CO₂



1600 ppm CO₂



Schemat zmian w bilansie energii i własnościach morskiej warstwy granicznej atmosfery nakrytej chmurą stratocumulus w sytuacji, gdy koncentracja CO₂ w atmosferze wzroście z wartości obecnych (ok. 400 ppm) do ok. 1600 ppm. (przyszłe stulecie w scenariuszu Biznes-jak-zwykle) Proste żółte linie ze strzałkami schematycznie pokazują bilans promieniowania słonecznego, czerwone – promieniowania podczerwonego (cieplnego). Fioletowe strzałki ilustrują transport konwekcyjny (mieszanie wskutek konwekcji) w dolnych warstwach atmosfery: pokazują, że przy konwekcji stratocumulusowej wymiana pary wodnej i wody ograniczona jest do płytkiej warstwy pokrytej chmurami, w przeciwieństwie do sytuacji z konwekcją cumulusową, gdzie mieszanie i transport pary wodnej z powierzchni oceanu obejmuje znacznie głębszy obszar..

„Wybielanie” chmur stratocumulus dla schładzania planety?

