

FIZYKA CHMUR



Szymon Malinowski

Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

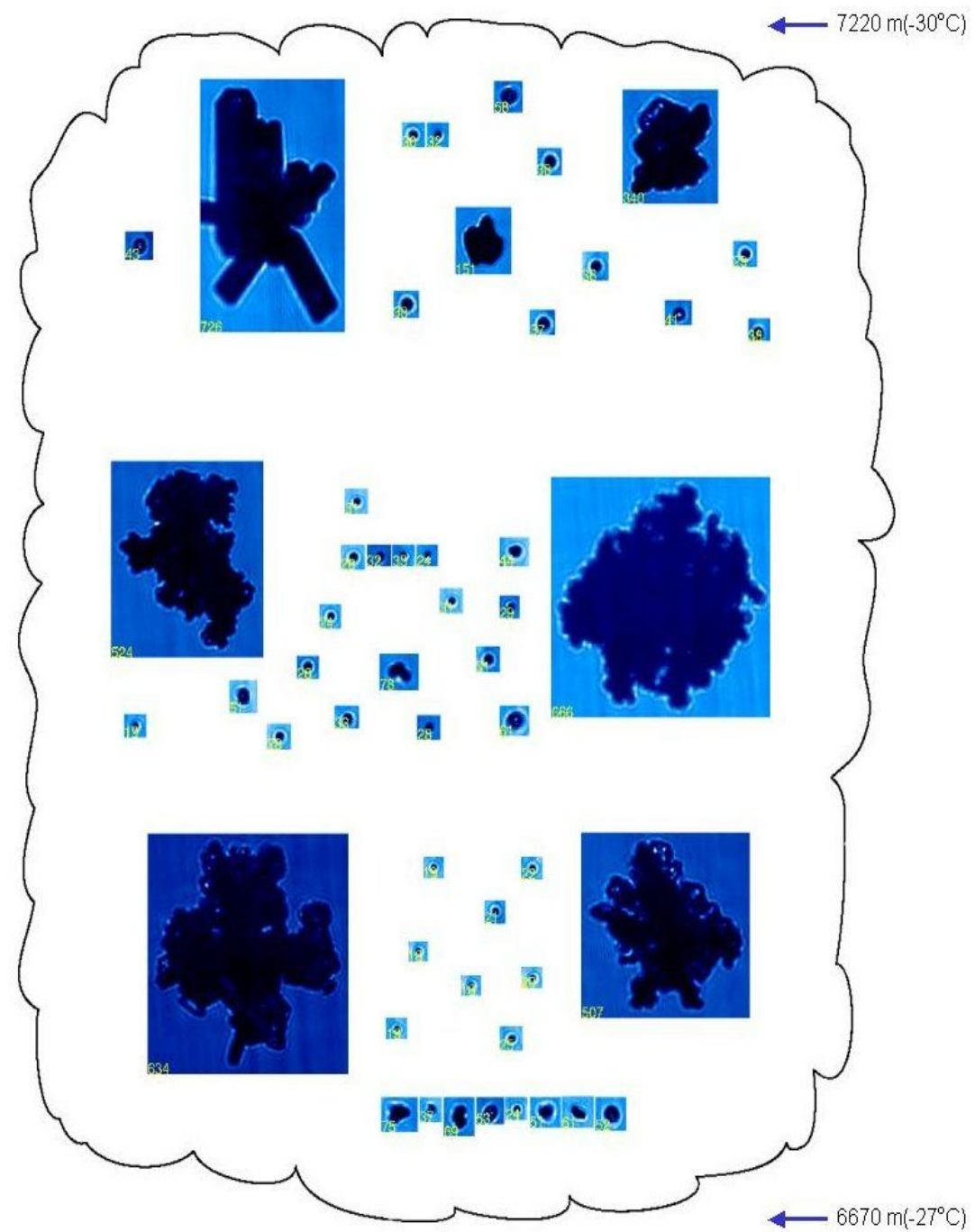
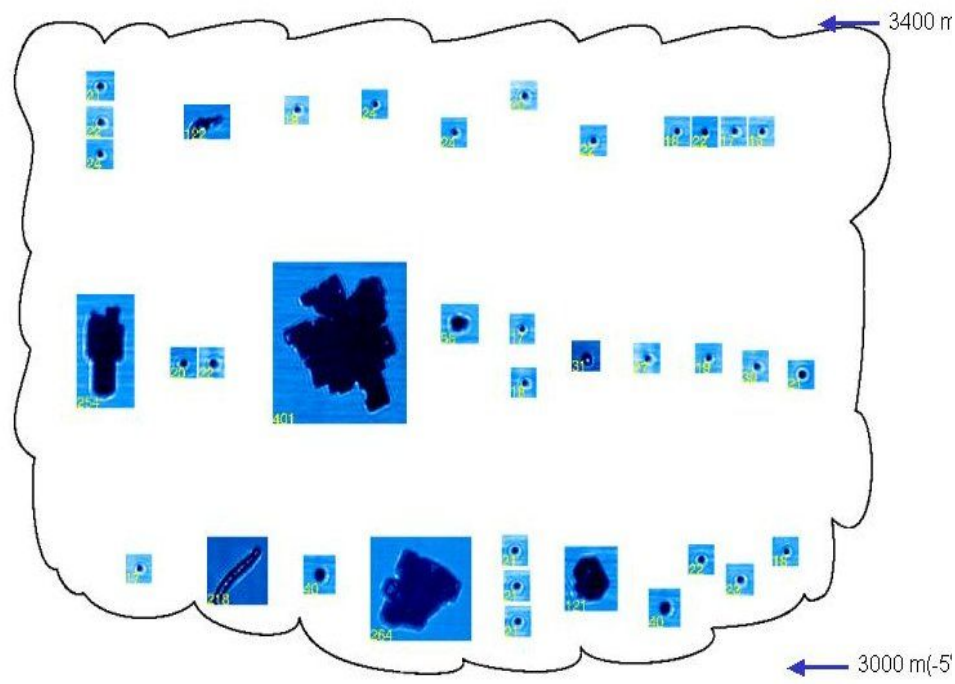
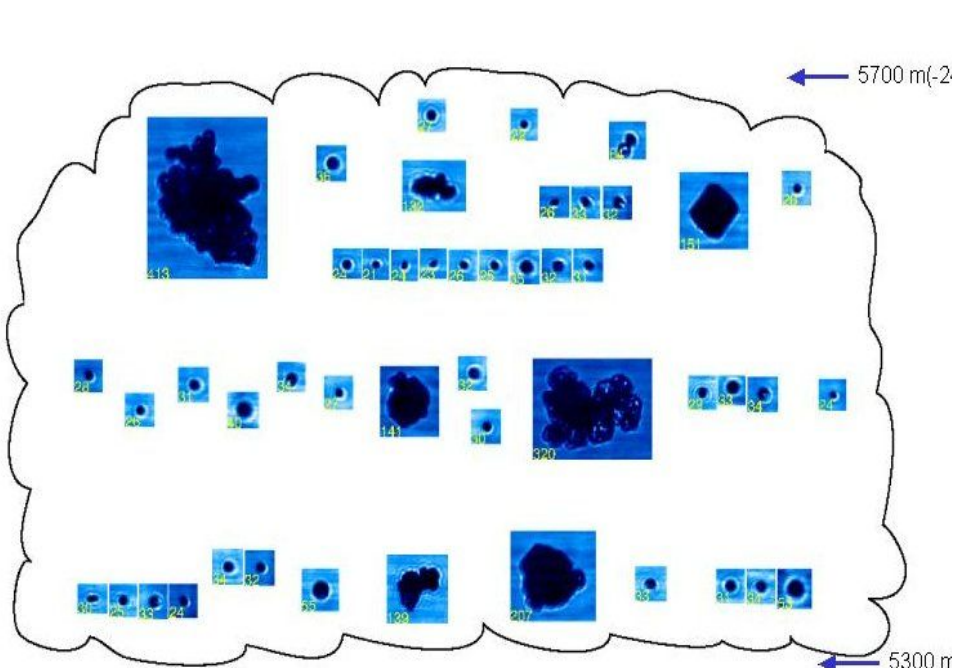
Czym jest chmura?

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 kropelek 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).



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

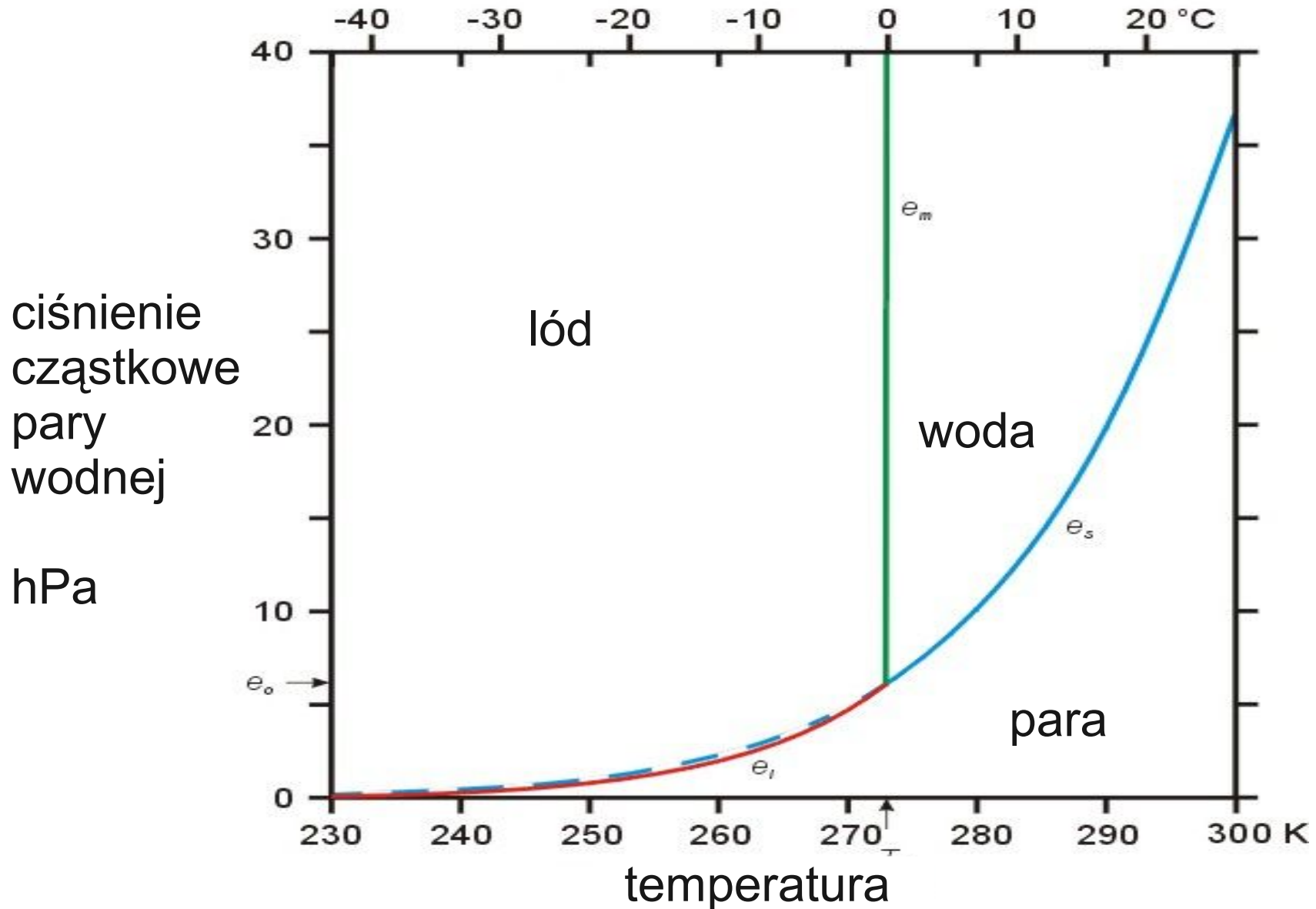
Woda w atmosferze – domieszka do tzw. „powietrza suchego” występuje w trzech stanach skupienia - stałym, ciekłym i gazowym.

Przejścia pomiędzy tymi stanami mają swoje nazwy i tak - między stanem stałym i ciekłym topnienie i zamarzanie; między stanem ciekłym i gazowym - parowanie i kondensacja; między stanem gazowym a stałym - sublimacja i resublimacja.



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

Przemiany fazowe wody – równowaga faz



Przejścia między stanami skupienia związane są z pobieraniem bądź oddawaniem energii.

Przy przejściu fazowym między lodem a wodą (topnienie) pobierane jest ciepło topnienia lub wydzielane ciepło krystalizacji w ilości ok. 334 kJ/kg, ciepło parowania/kondensacji wynosi ok. 2,270 kJ/kg.



Ciepło przemiany fazowej, jest na ogół funkcją temperatury.

Jak przebiegają przemiany fazowe wody w atmosferze? Na przykład ocean parując w traci ciepło. Para wodna miesza się z powietrzem, jest unoszona z przepływem. Gdy znajdą warunki do skroplenia, para wodna kondensując do postaci chmury oddaje ciepło atmosferze.

Pary nie widać, czasami mówiąc o transporcie pary wodnej w powietrzu tego powodu mówi się o transporcie ciepła utajonego...

MIARY WILGOTNOŚCI

Powietrze jest mieszaniną powietrza suchego i pary wodnej, ciśnienie jakie wywiera powietrze to suma ciśnień cząstkowych powietrza suchego i pary wodnej.

Masa pary wodnej w jednostce masy powietrza wilgotnego to **wilgotność właściwa**.

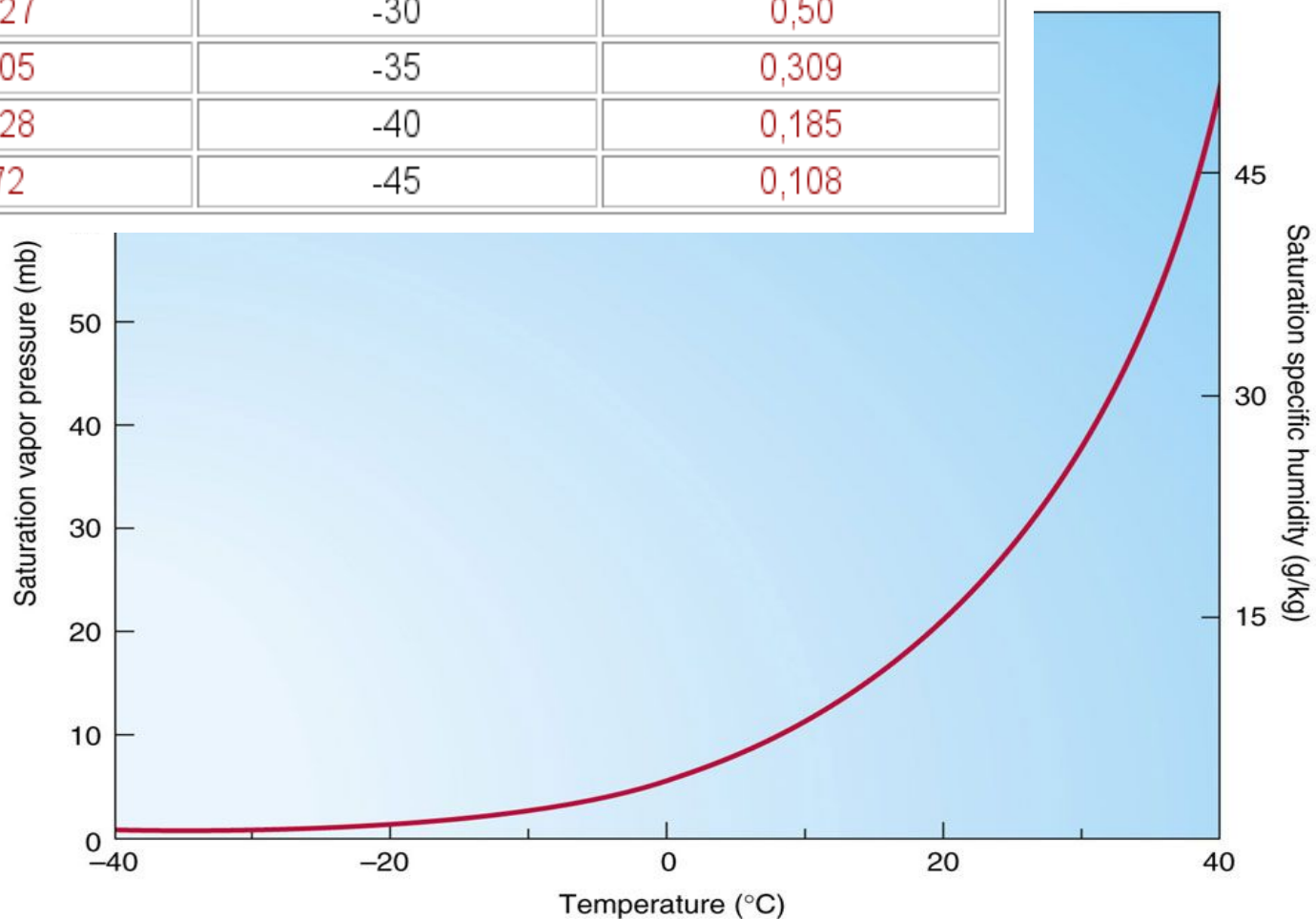
Stosunek ciśnienia cząstkowego pary wodnej obecnej w powietrzu do **maksymalnego ciśnienia pary możliwego w danej temperaturze** to **wilgotność względna**.

To maksymalne możliwe ciśnienie nazywa się **ciśnieniem nasycenia pary (ciśnieniem pary nasyconej)**. Gdy zostanie osiągnięte, dodanie więcej pary wodnej nie powoduje wzrostu jej ciśnienia a kondensację nadmiaru wody. Często wilgotność względną wyrażamy w procentach.

Przy obniżaniu temperatury, ciśnienie nasycenia pary wodnej spada. Stąd inna miara wilgotności: **temperatura punktu rosy**, czyli temperatura, w której wystąpi nasycenie powietrza parą wodną.

Wartości prężności pary wodnej nasyconej (hPa) w funkcji temperatury powietrza (°C)

t (°C)	E (hPa)	t (°C)	E (hPa)
50	123,3	0	6,11
45	95,77	-5	4,21
40	73,72	-10	2,68
35	56,20	-15	1,90
30	42,41	-20	1,25
25	31,66	-25	0,80
20	23,27	-30	0,50
15	17,05	-35	0,309
10	12,28	-40	0,185
5	8,72	-45	0,108



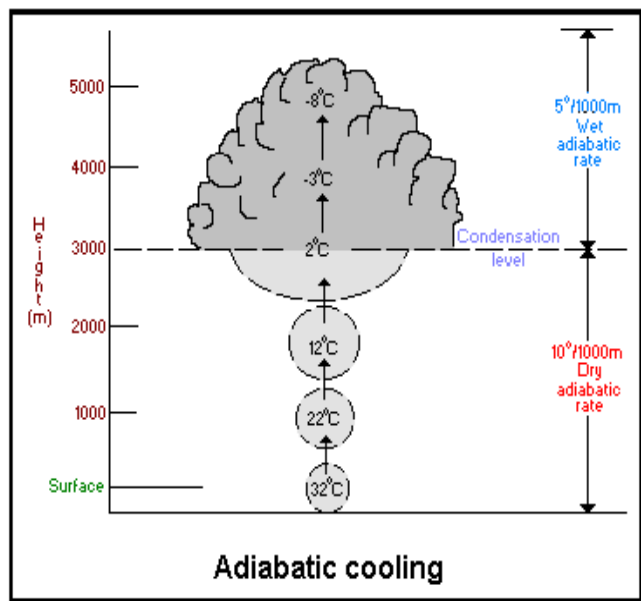
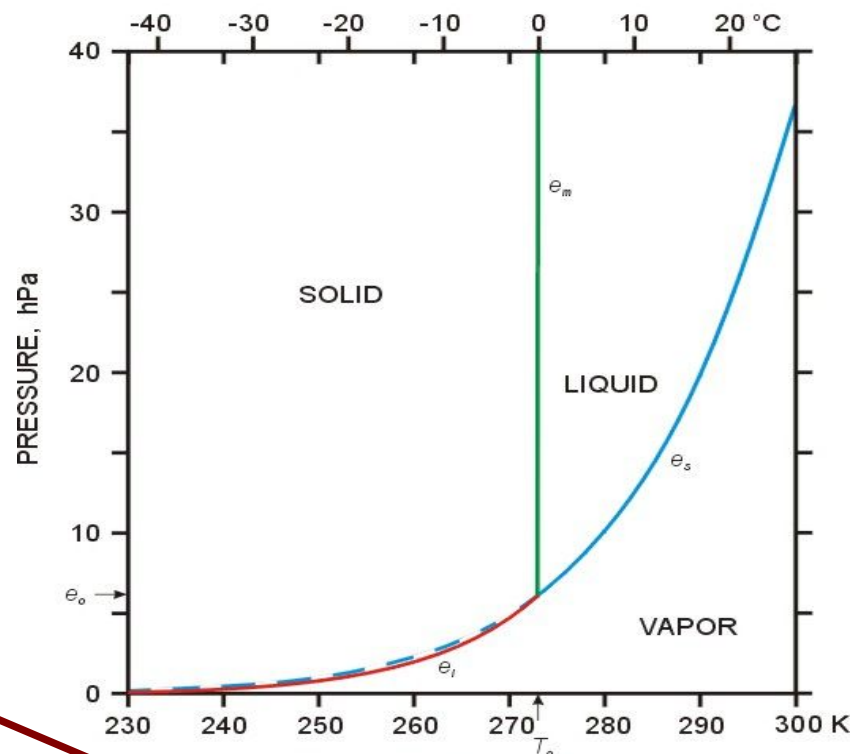
Procesy fizyczne prowadzące do kondensacji pary wodnej obecnej w powietrzu:

rozprężanie adiabatyczne (np. w ruchach wstępujących);

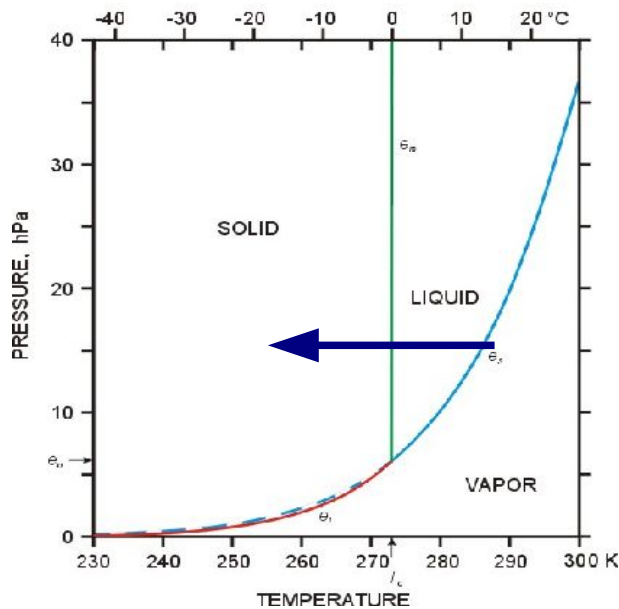
ochładzanie izobaryczne (radiacyjne, przez przewodnictwo);

mieszanie izobaryczne.

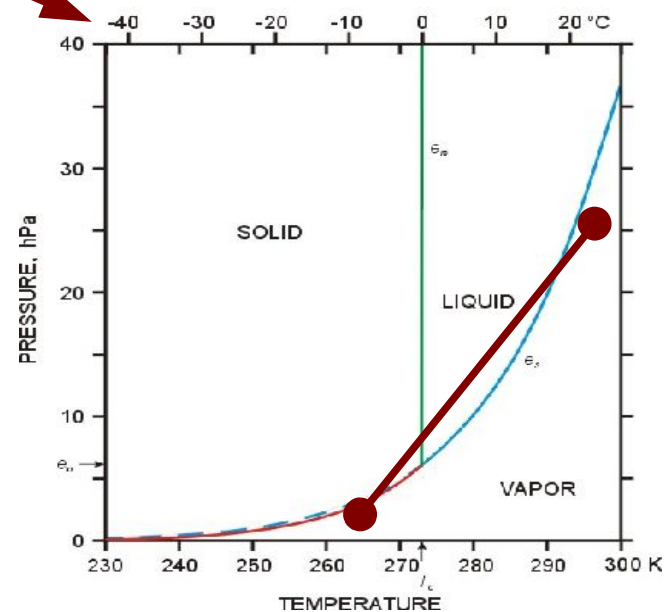
PHASE DIAGRAM OF WATER



PHASE DIAGRAM OF WATER

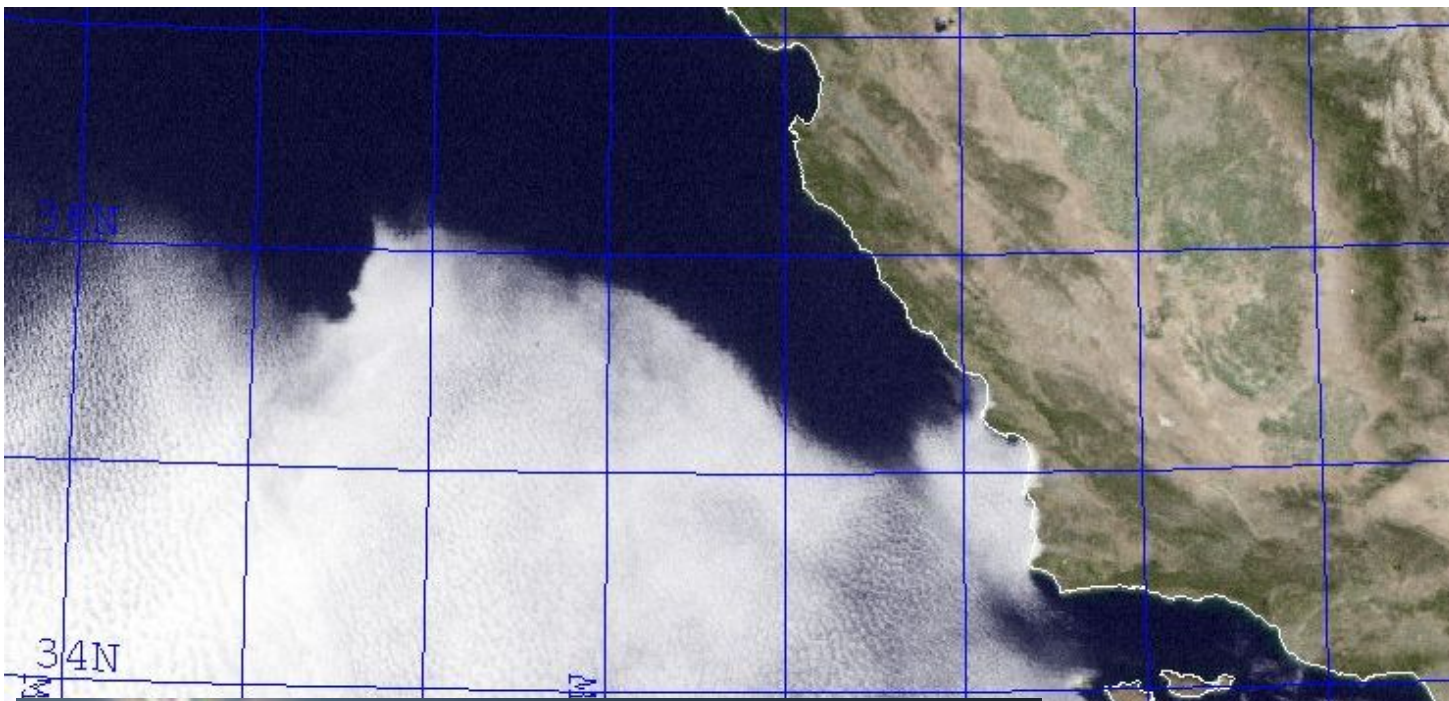


TEMPERATURE PHASE DIAGRAM OF WATER





Formowanie się
chmur wskutek
adiabaticznego
spadku
ciśnienia



Powstawanie chmur
wskutek
ochładzania
izobarycznego

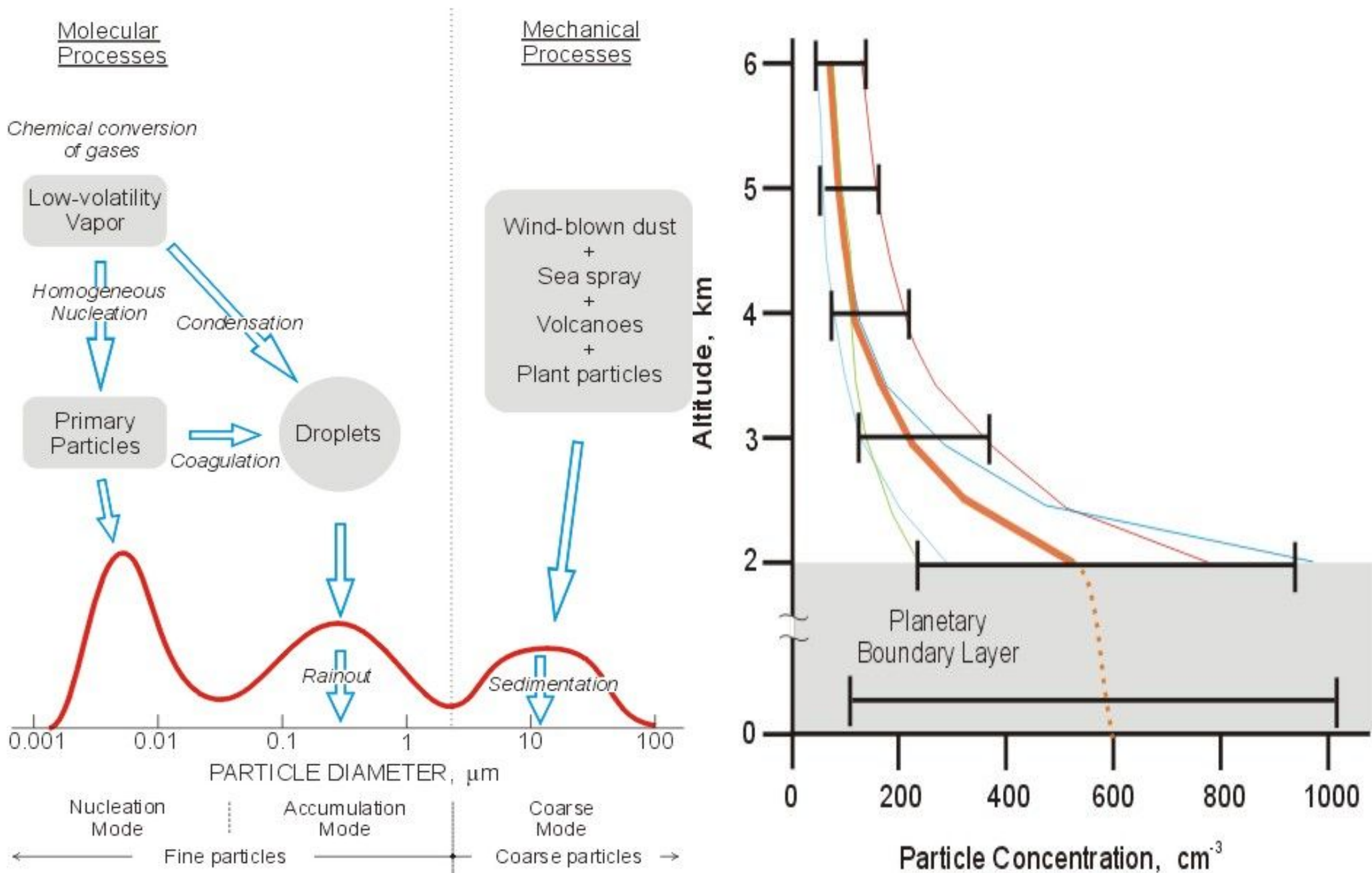
(na ogół wskutek
wypromieniowania
w podczerwieni).



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

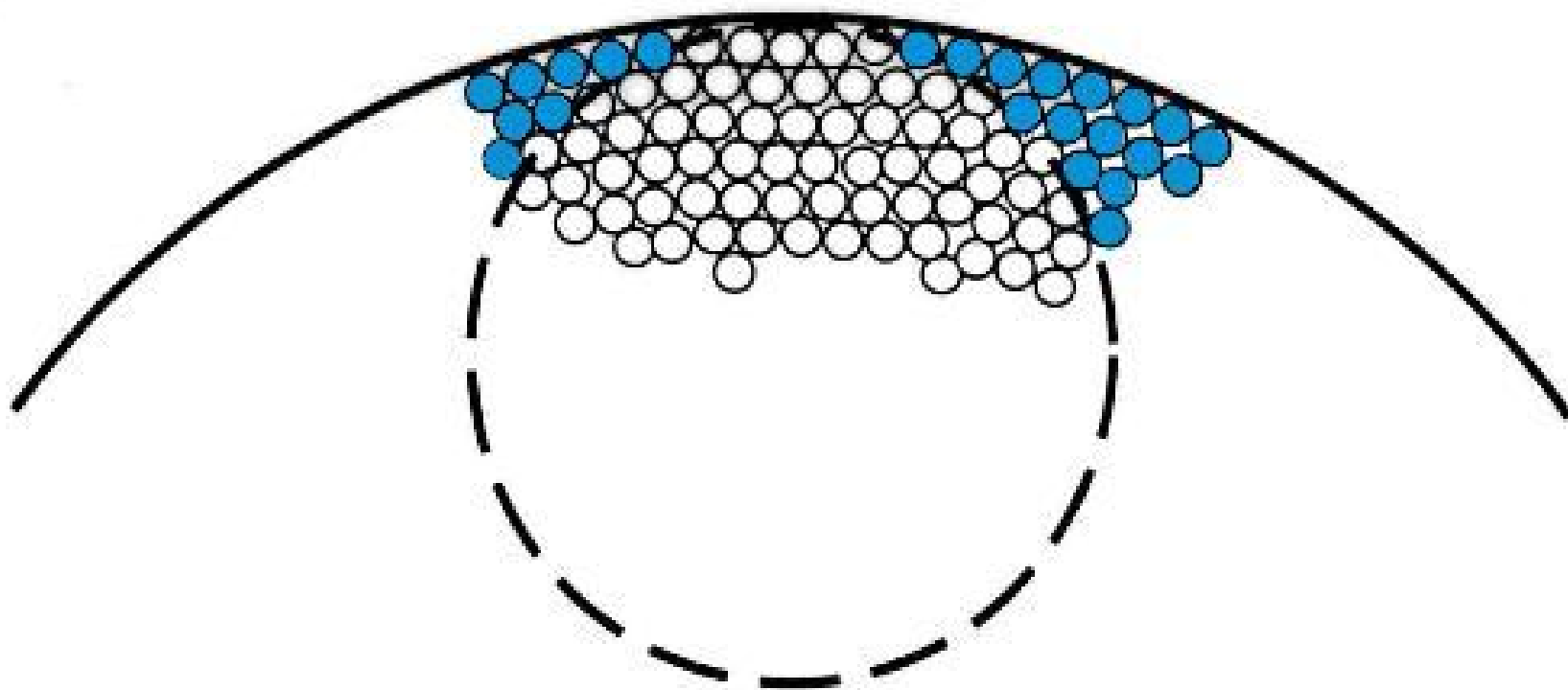


Aerozole – na nich zachodzi kondensacja.

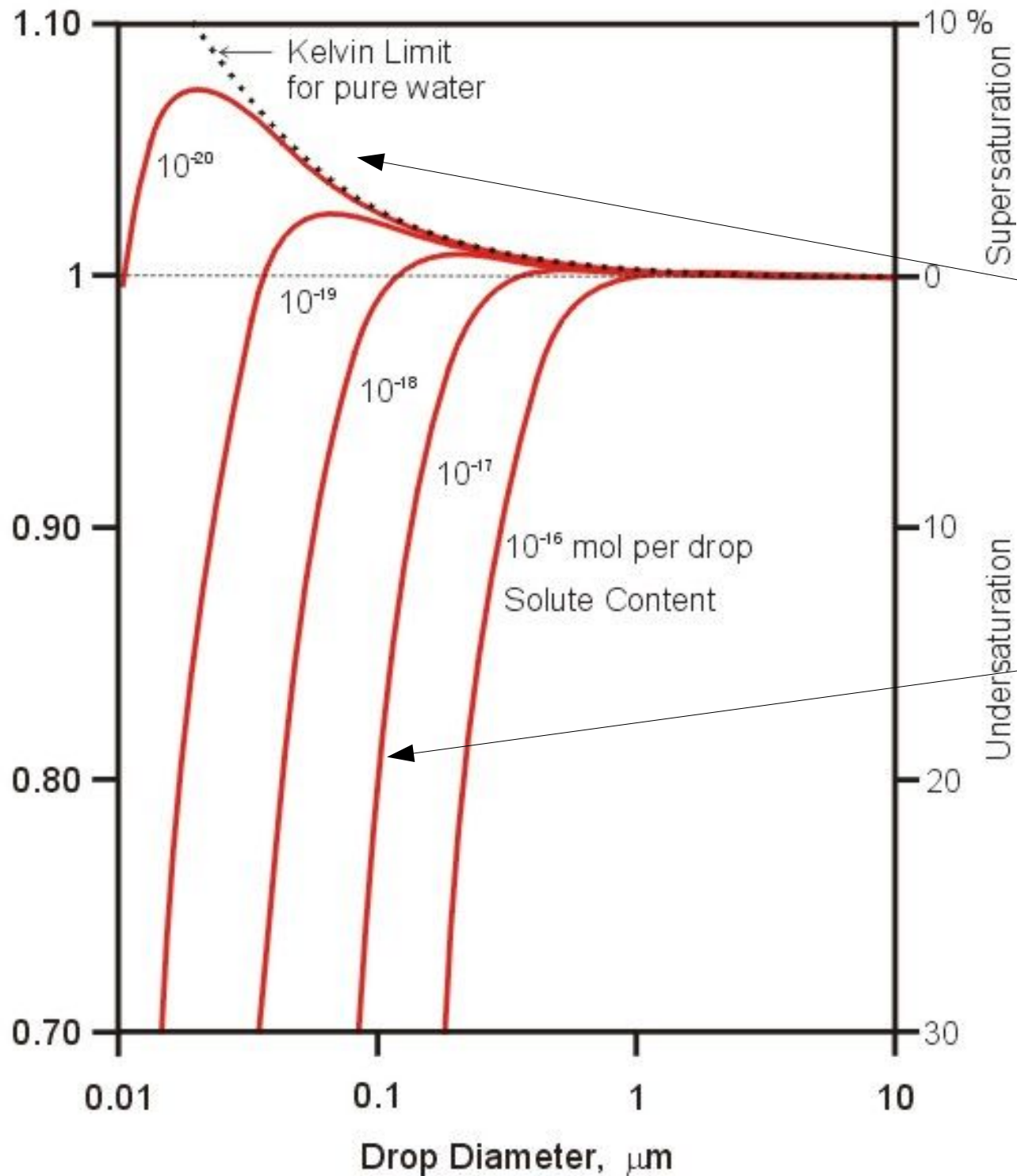


EFEKT ZAKRZYWIENIA POWIERZCHNI KROPLI

INTEPRETACJA MOLEKULARNA



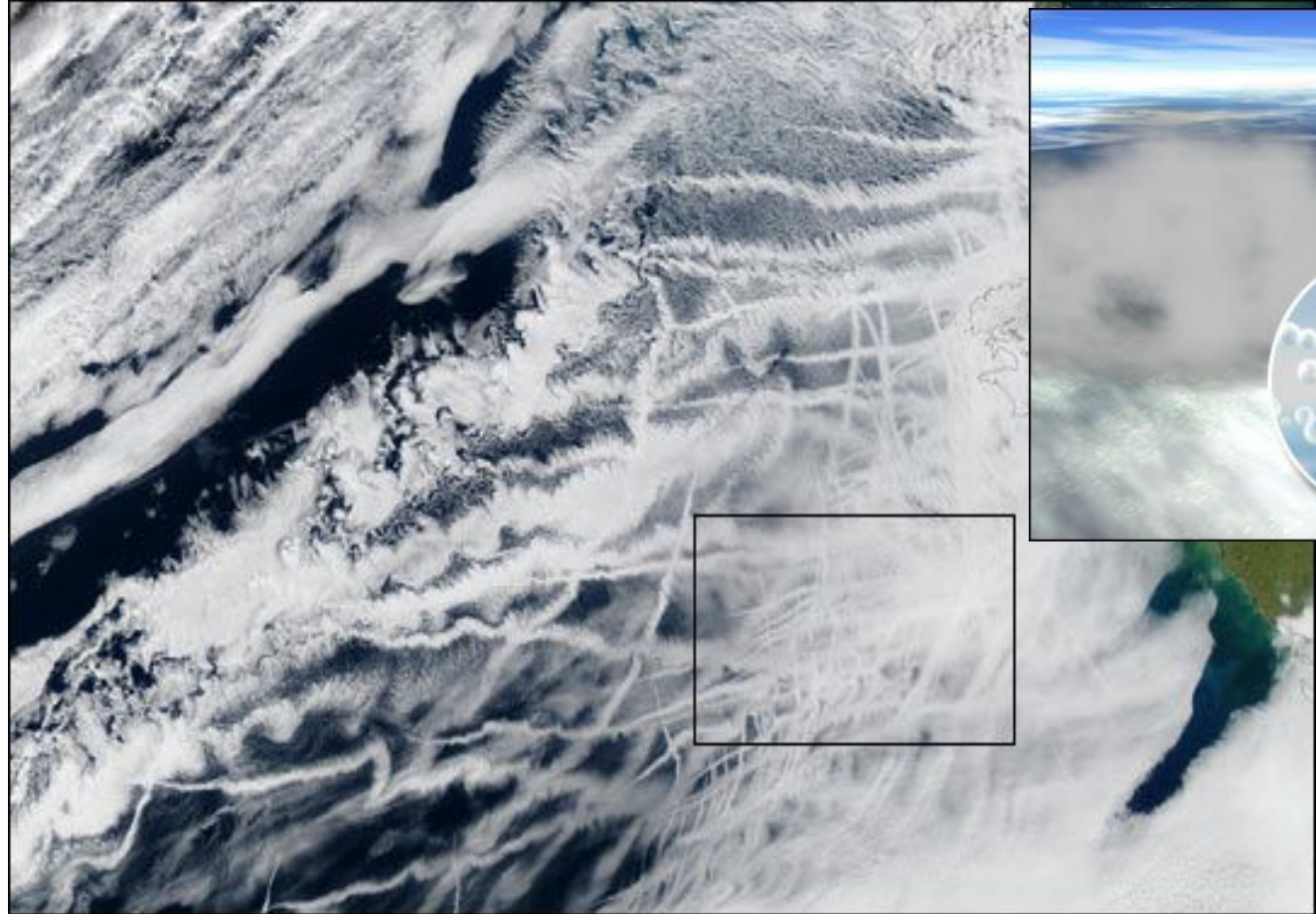
KOEHLER CURVES



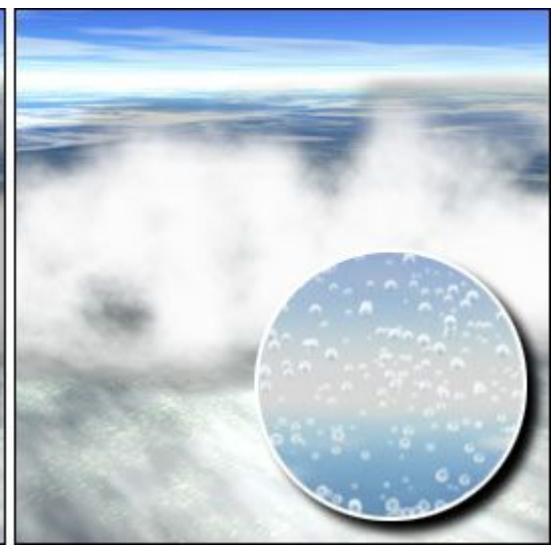
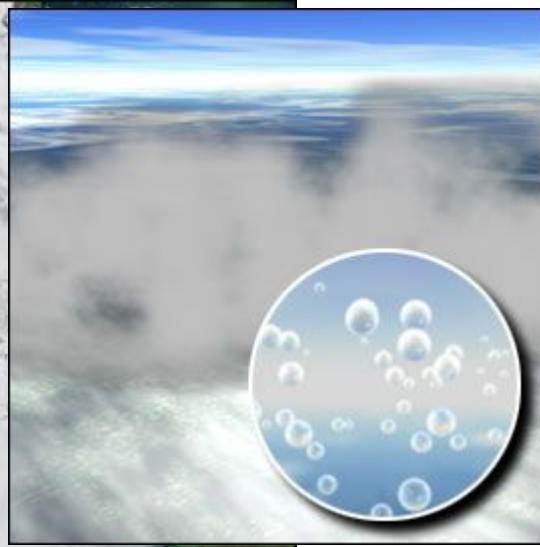
Kondensacja heterogeniczna:

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

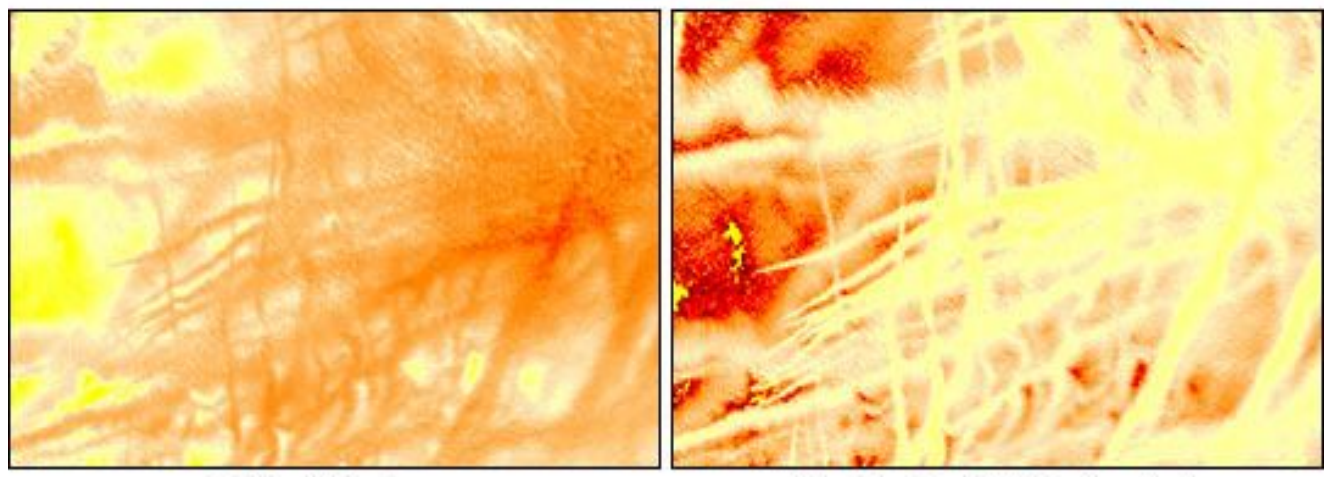
-efekty higroskopowe (sole rozpuszczalne) – obniżają ciśnienie nasycenia pary.



True Color

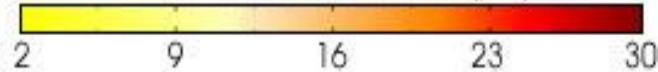
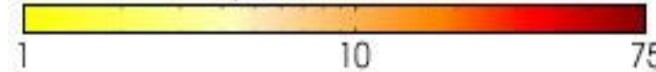


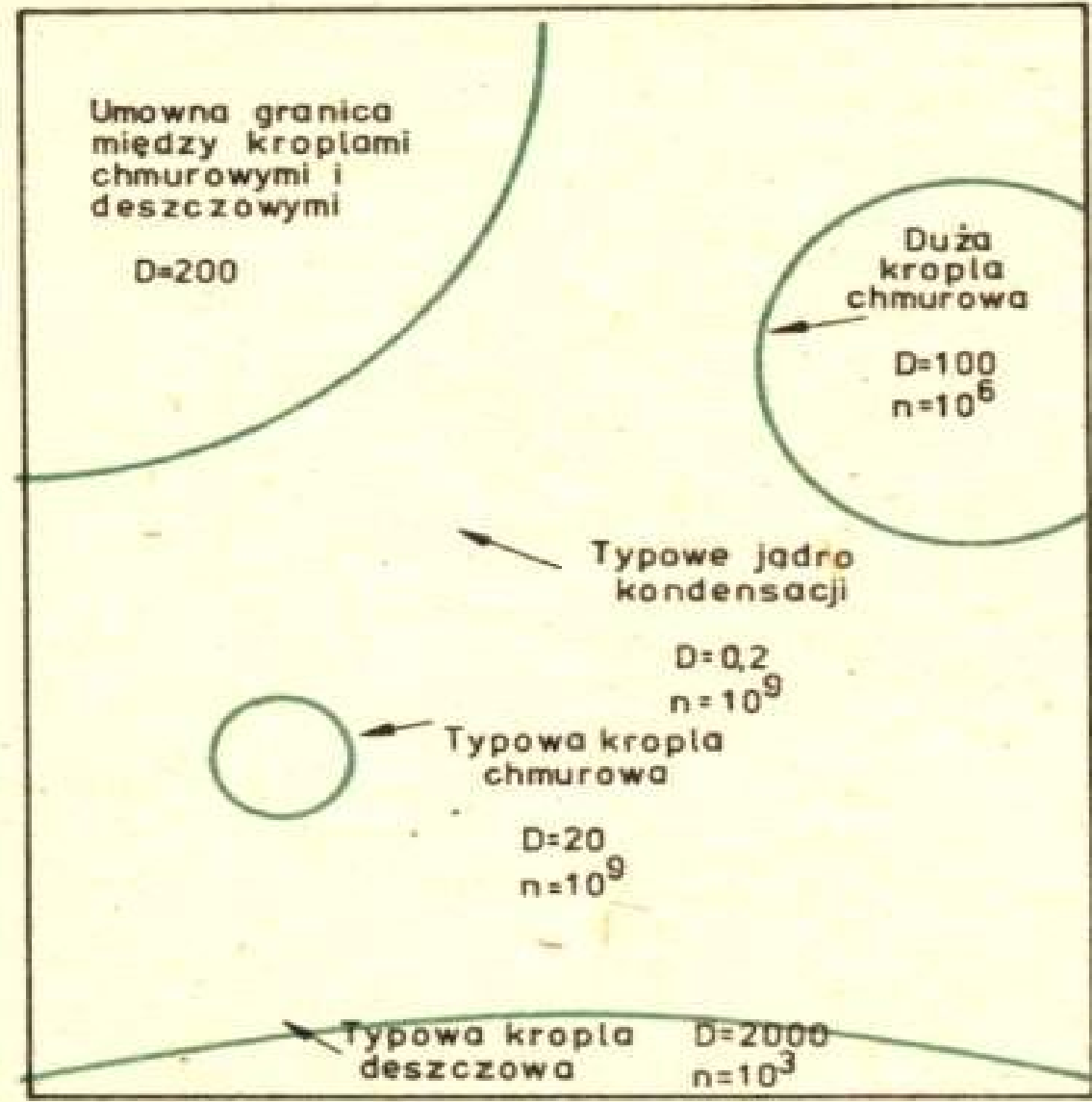
Wpływ aerozolu na budowę chmur (rozmiar kropelek) i w konsekwencji na ich własności radiacyjne: tzw. pośrednie efekty aerozolowe - pierwszy (albedo) drugi (czas trwania).



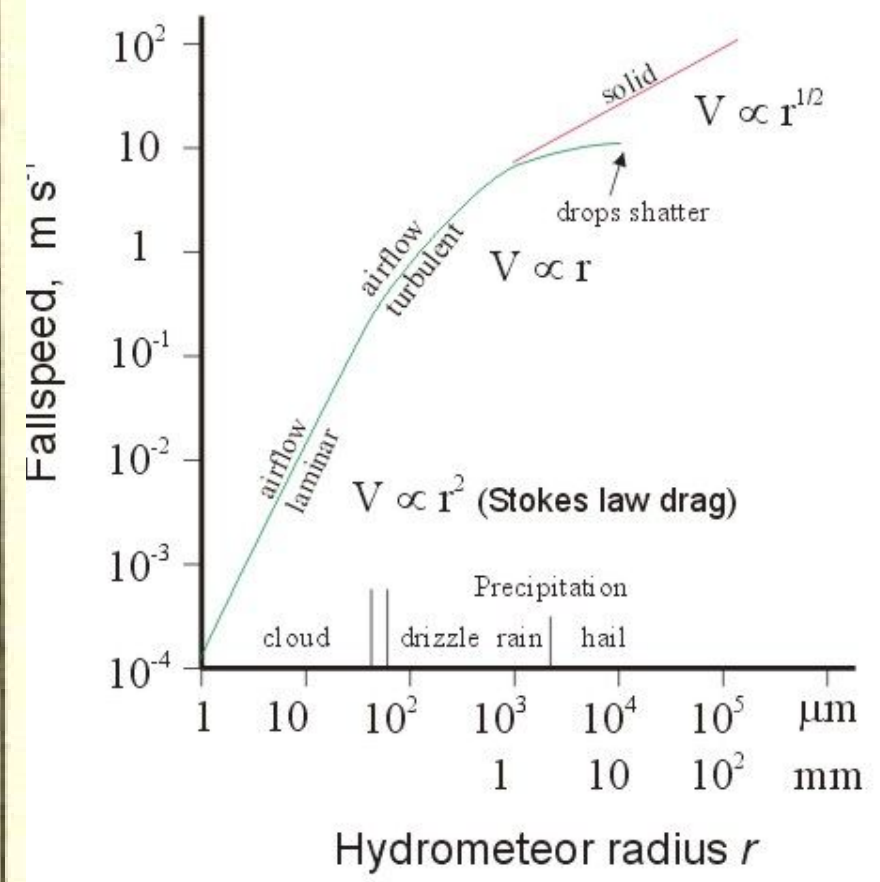
Optical Thickness

Effective Particle Radius (μm)

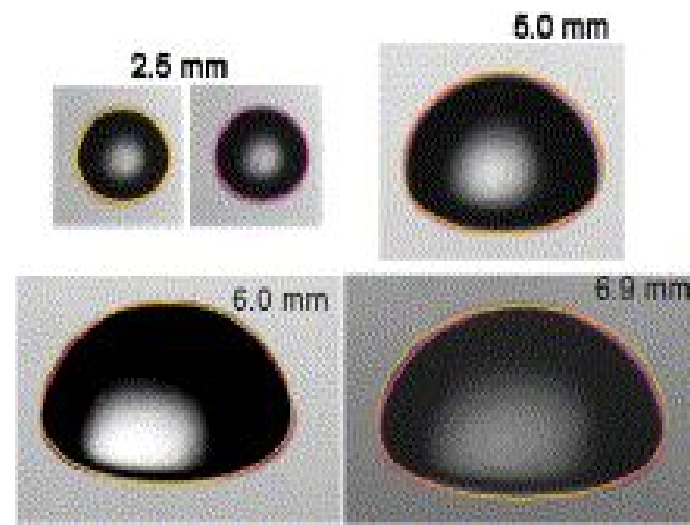


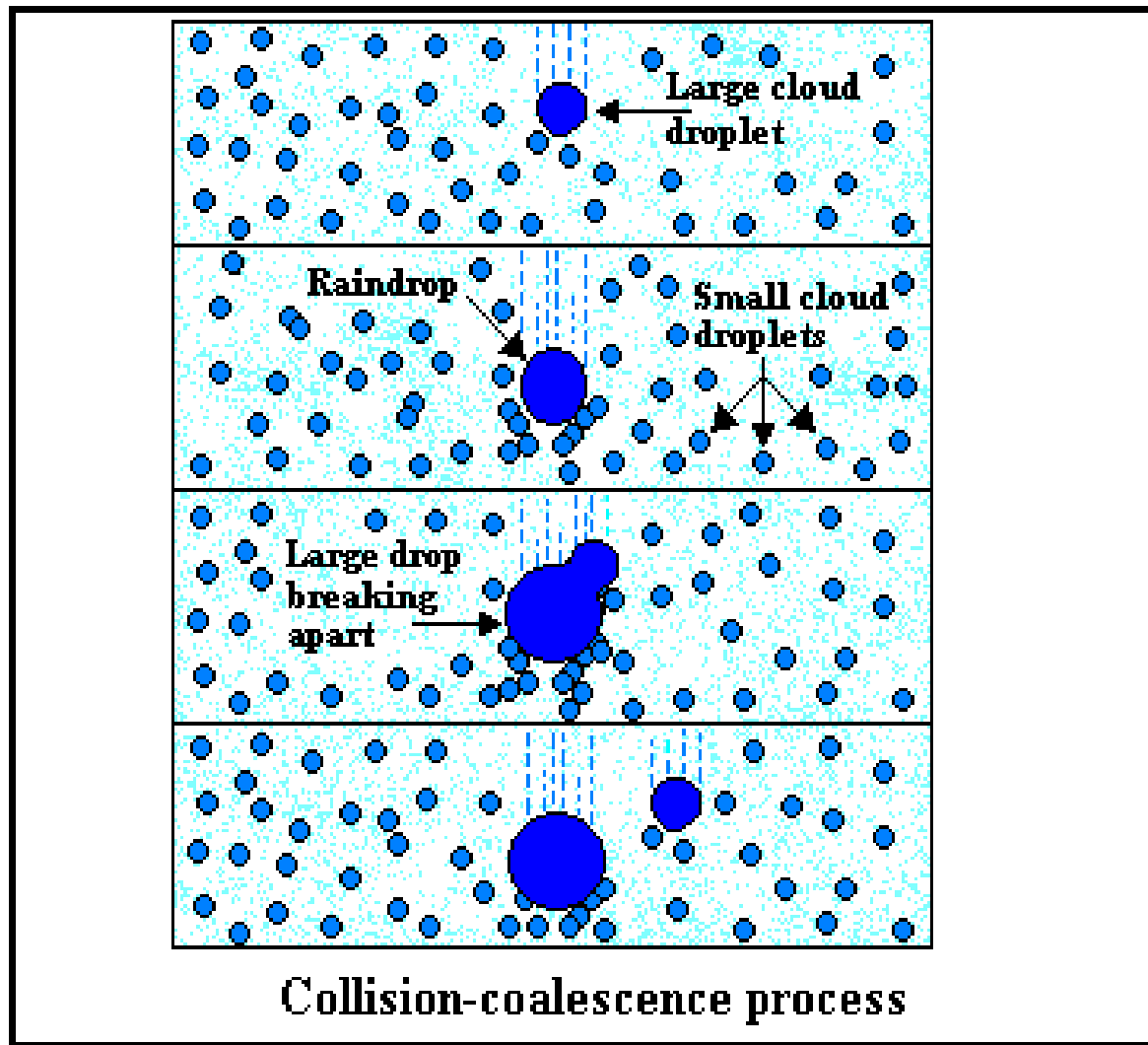


CLOUD-PARTICLE FALLSPEEDS



KROPLE CHMUROWE I OPADOWE





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 różnicowanych rozmiarach (różnych prędkościach opadania)!

Powstawanie opadu w chmurze – ewolucja rozmiarów kropeł w wyniku koalescencji/koagulacji (zderzeń i zlewania się kropli)

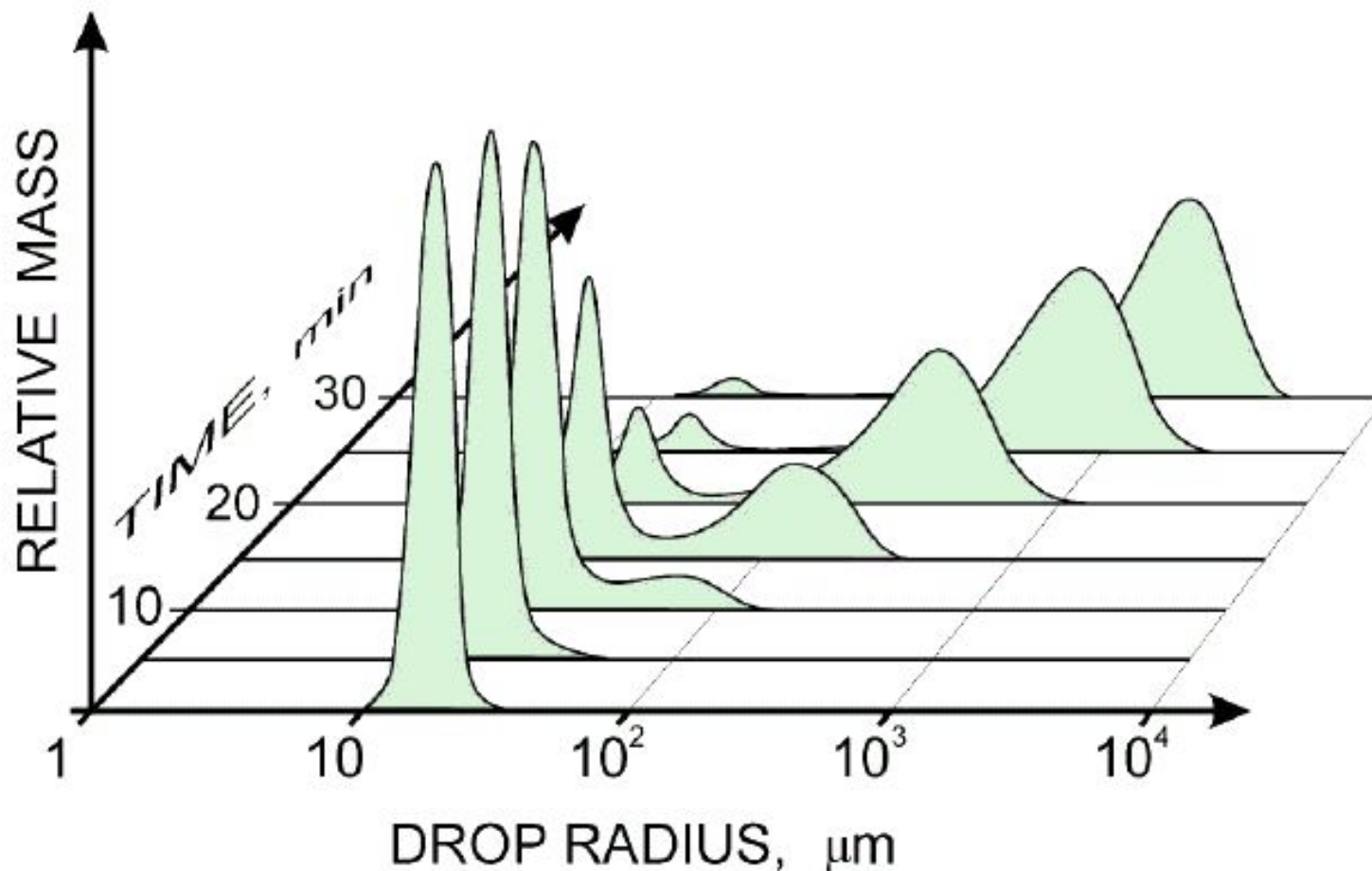
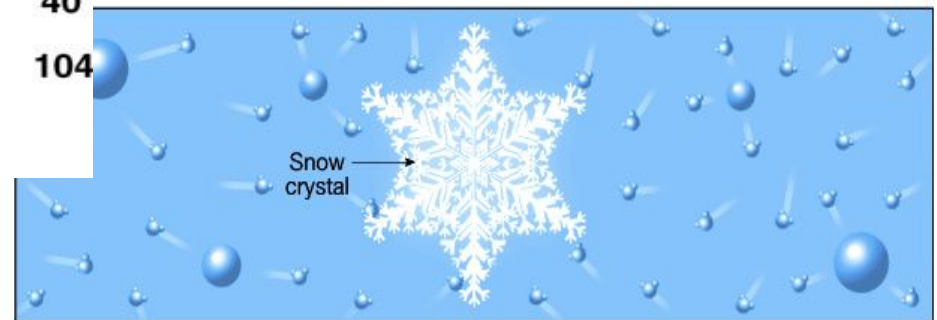
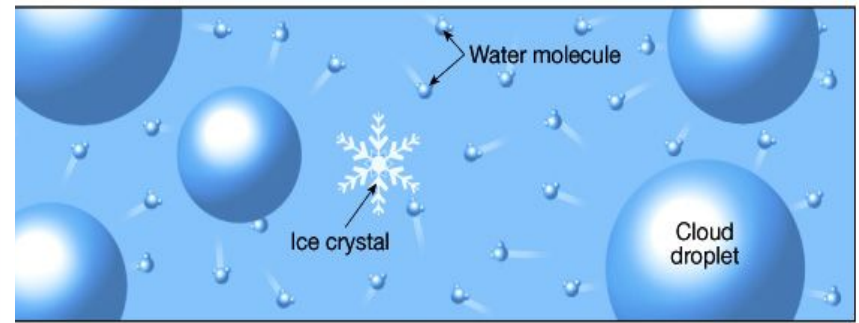
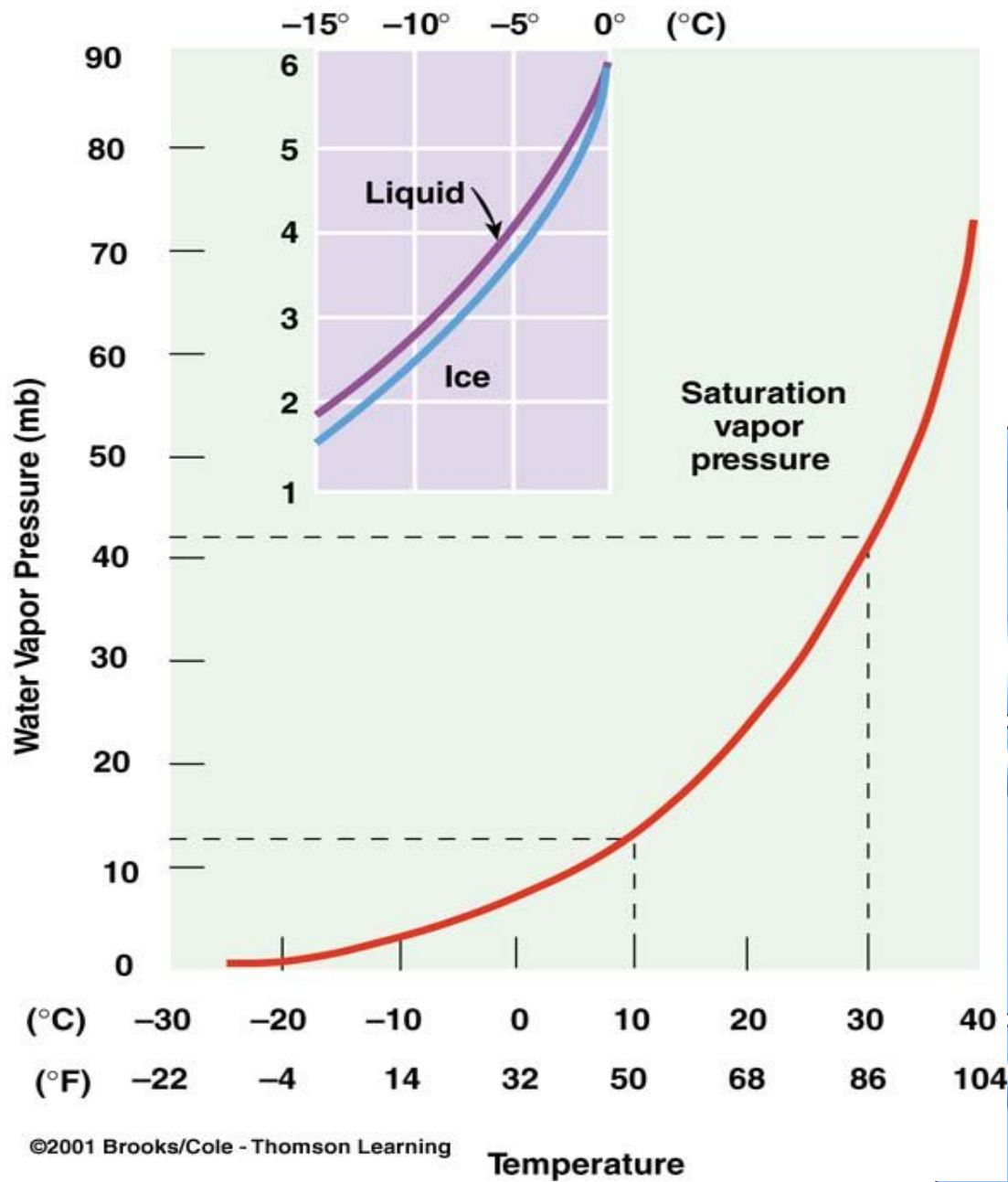


Figure 3 Illustration of the evolution of a droplet size distribution during the onset of the collision-coalescence process. Figure adapted from Berry & Reinhardt (1974) and Lamb (2001), courtesy of D. Lamb, Penn State University.

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



Wzrost kryształków
przez resublimację
kosztem parowania
przechłodzonych
kropelek

Wzrost kryształków
wskutek
zderzeń/wyłapywania
przechłodzonych
kropelek

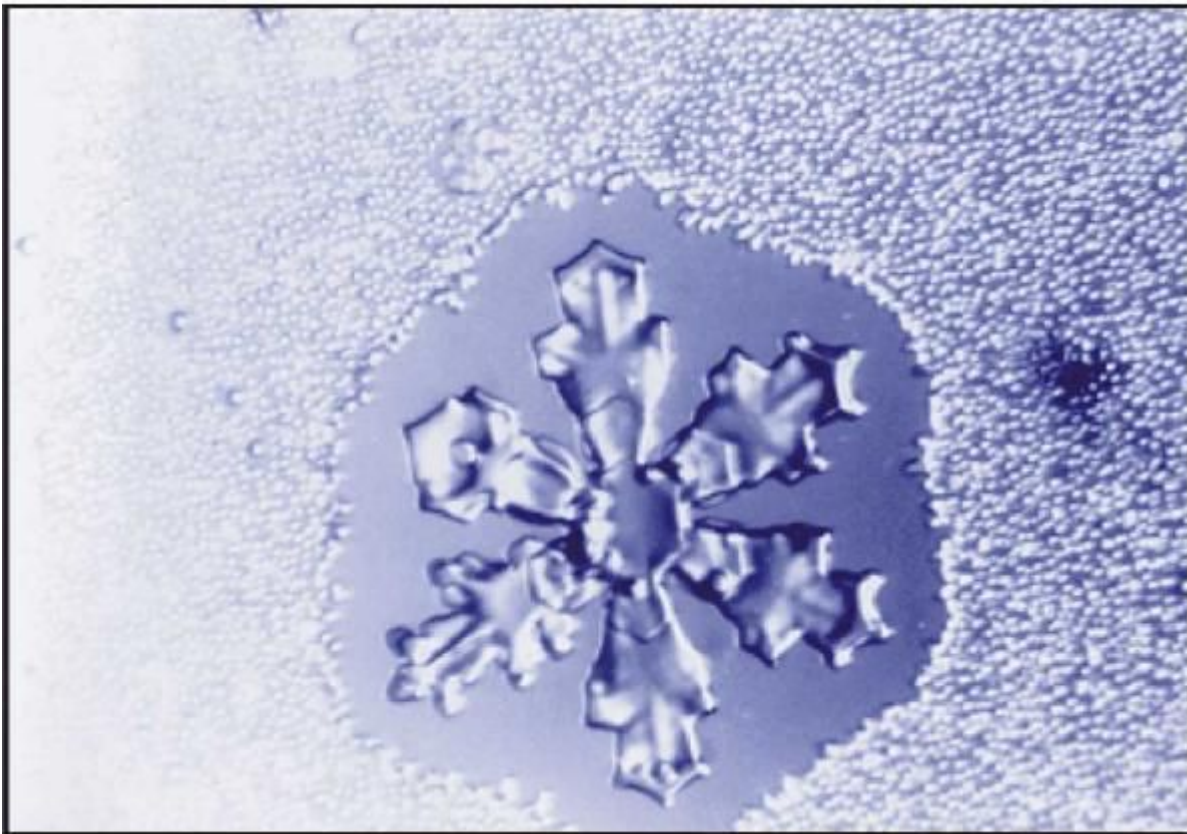
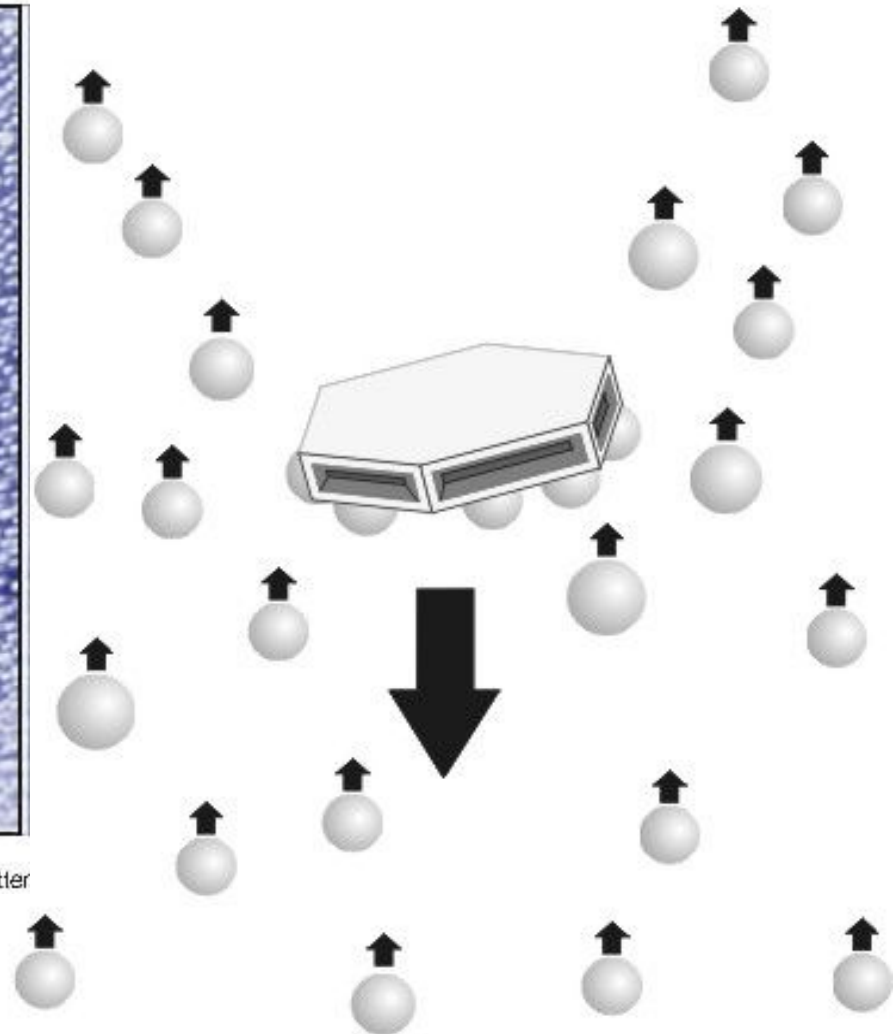
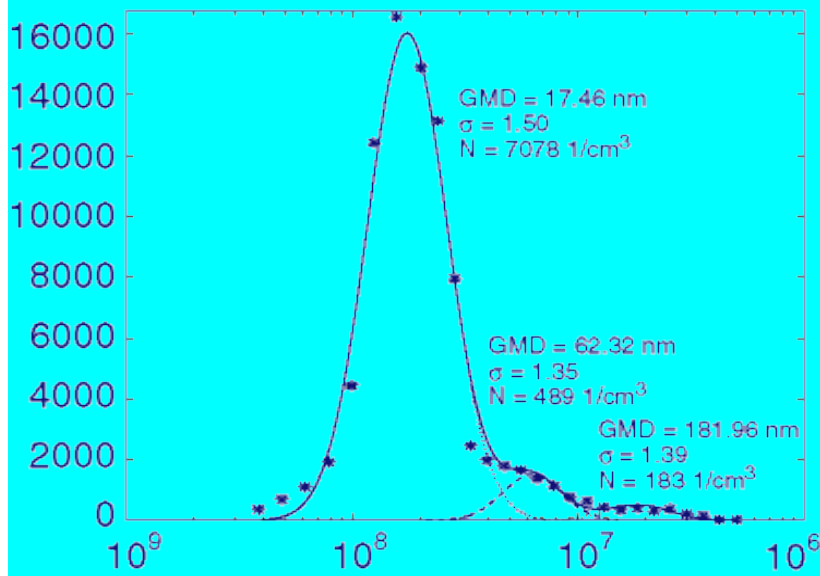


Photo by R. Pitter

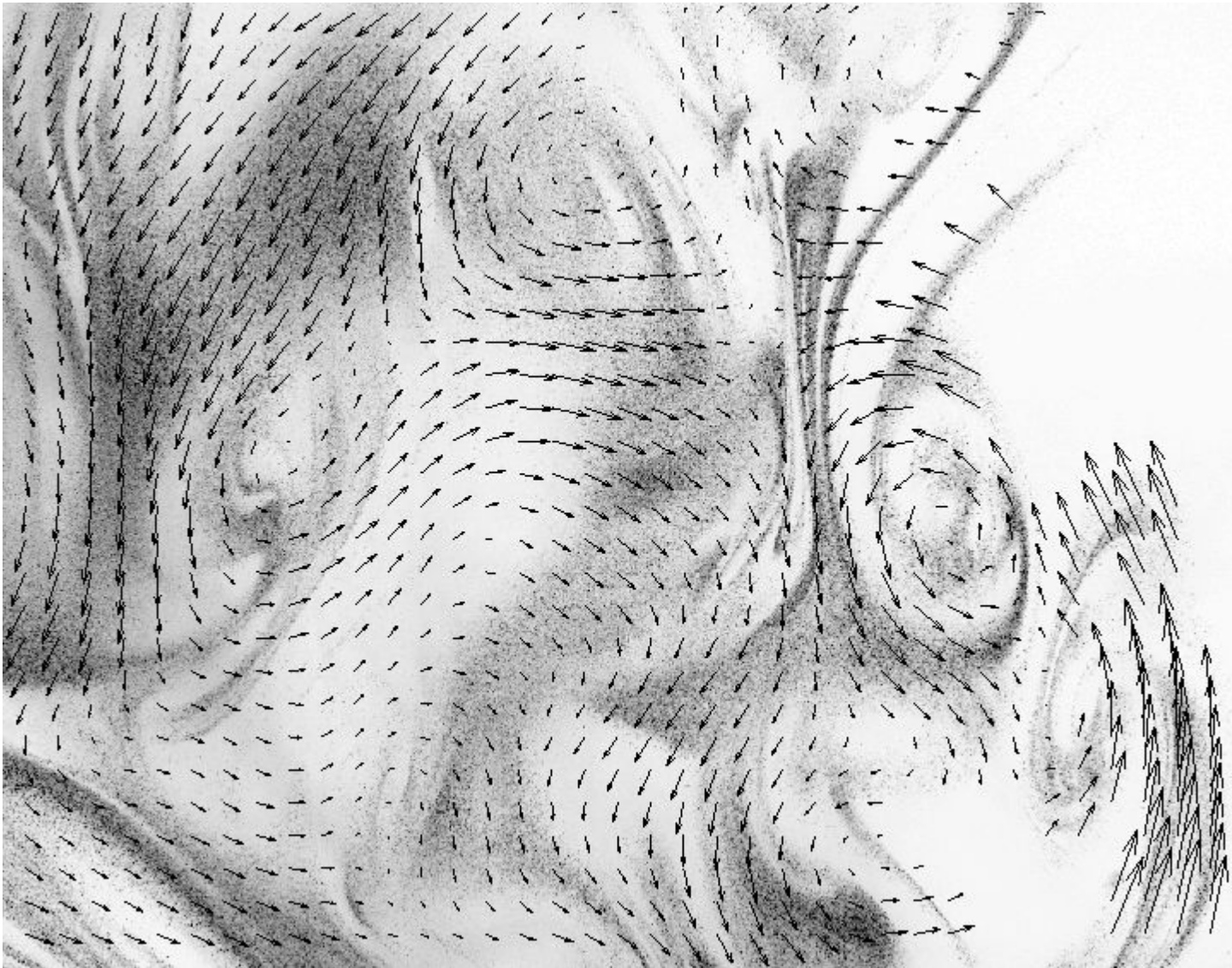


Hyytiälä 13.4.1996 15:39-15:49 p.m.



Jeszcze inny mechanizm:
gigantyczne jądra kondensacji.



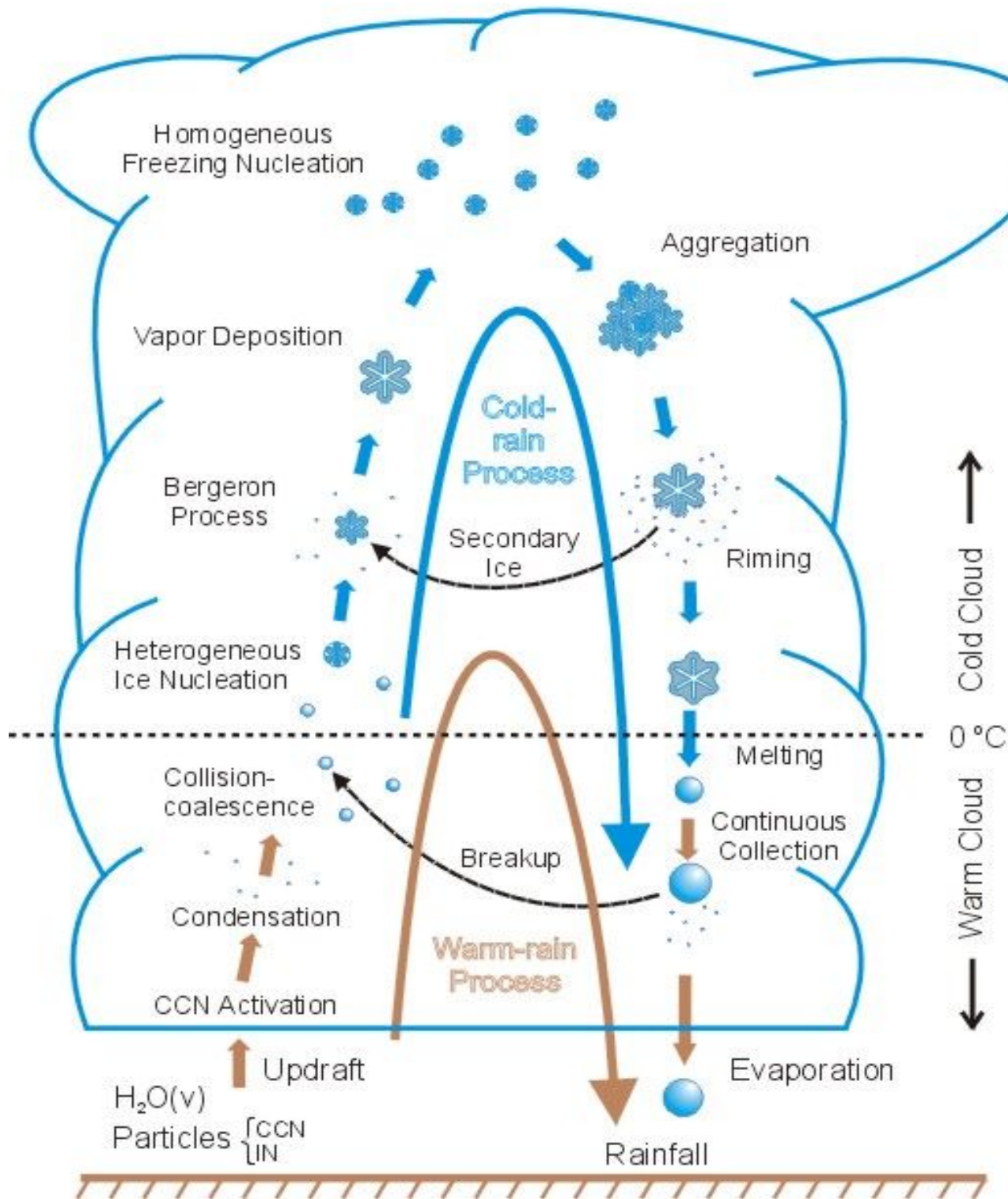


Jeszcze inne
mechanizmy
powstawania
opadu
związane z
turbulencją:

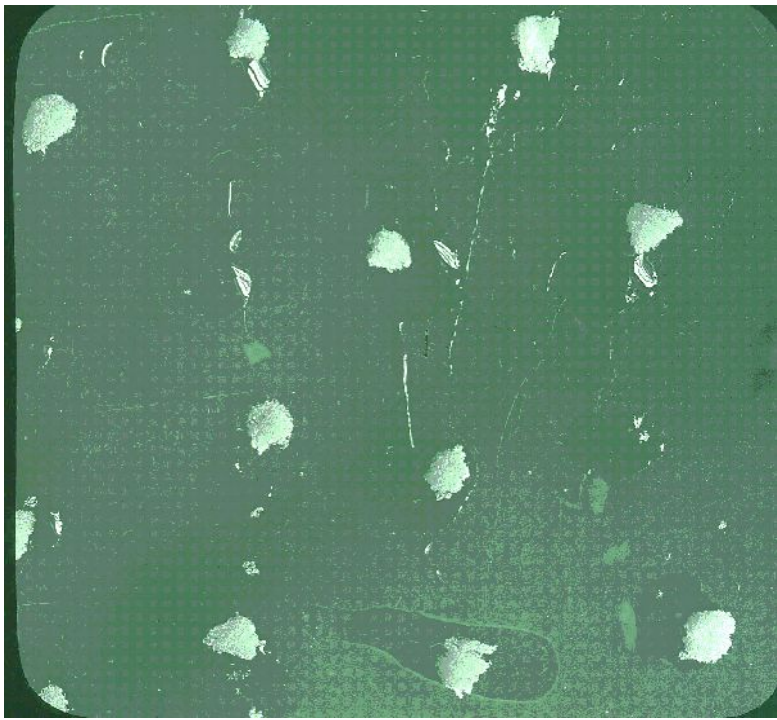
preferential
concentration,

mieszanie
jednorodne i
niejednorodne.

PRECIPITATION MECHANISMS



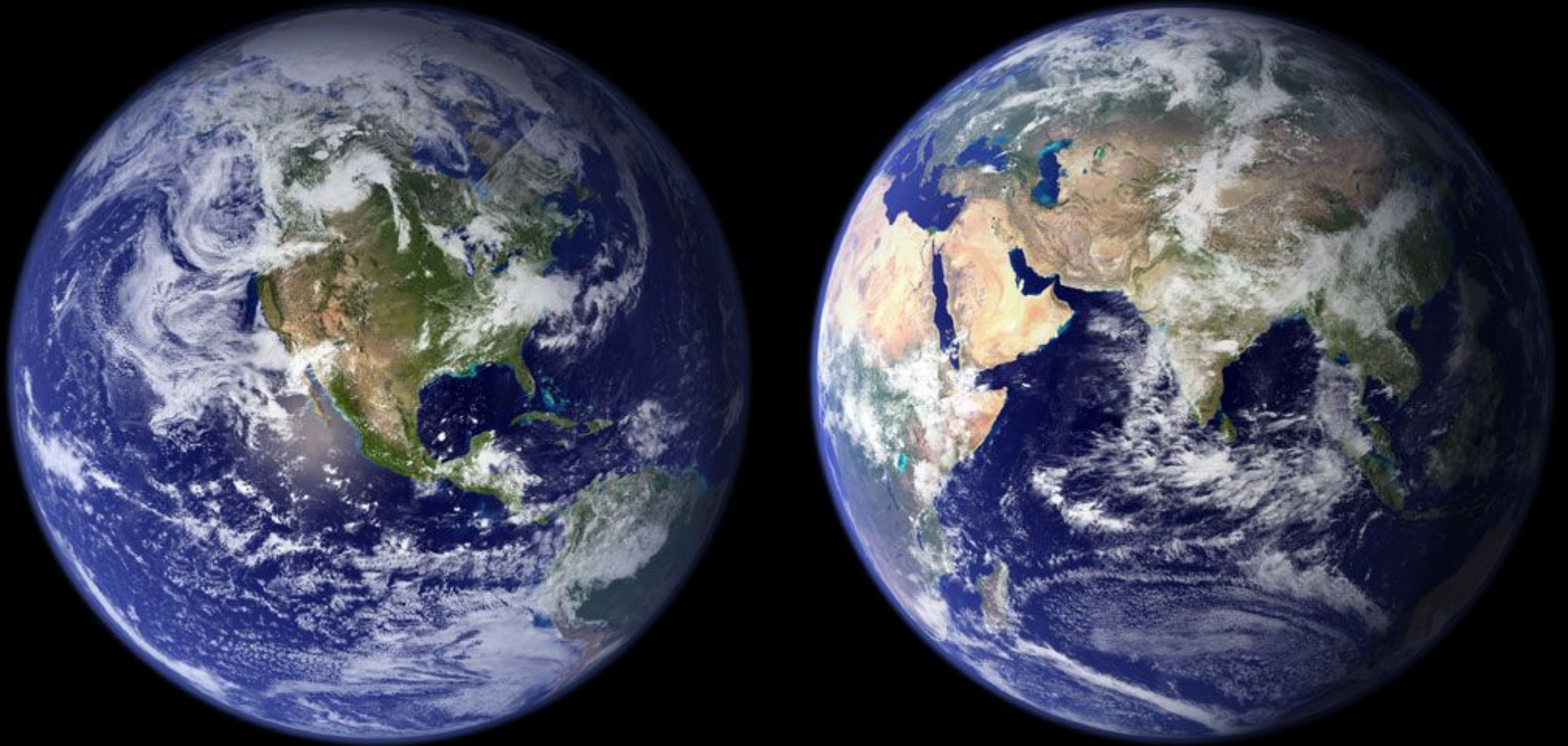
Mechanizmy opadowe



I co z tego
wynika :)



CHMURY I BŁĘKITNA PLANETA



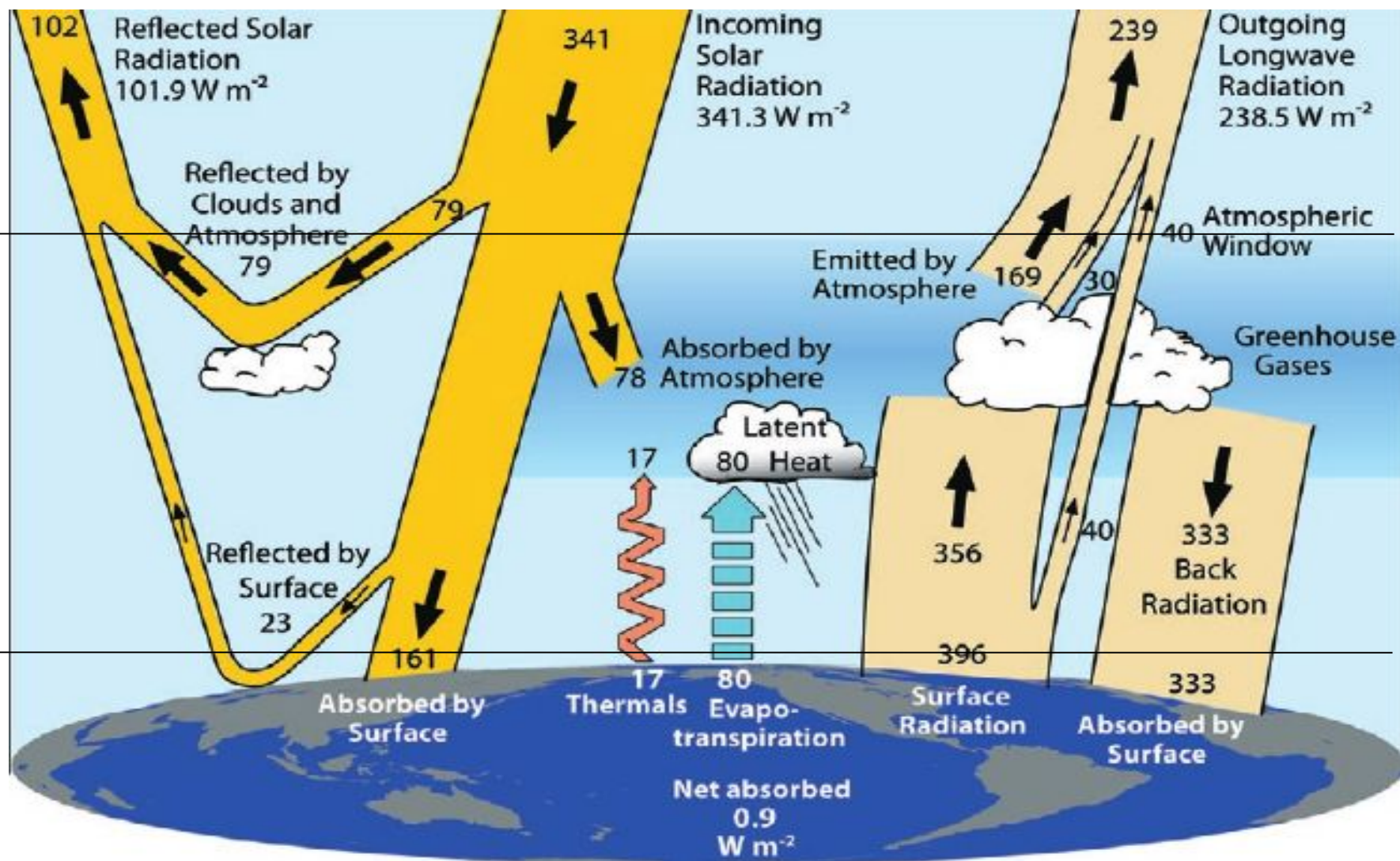
<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/BlueMarble/>

BILANS ENERGII UKŁADU ZIEMIA – ATMOSFERA – PRZESTRZEŃ KOSMICZNA w okresie 03/2000-05/2004: NIERÓWNOWAGA!!!! chmury i aerozole – największa niewiadoma

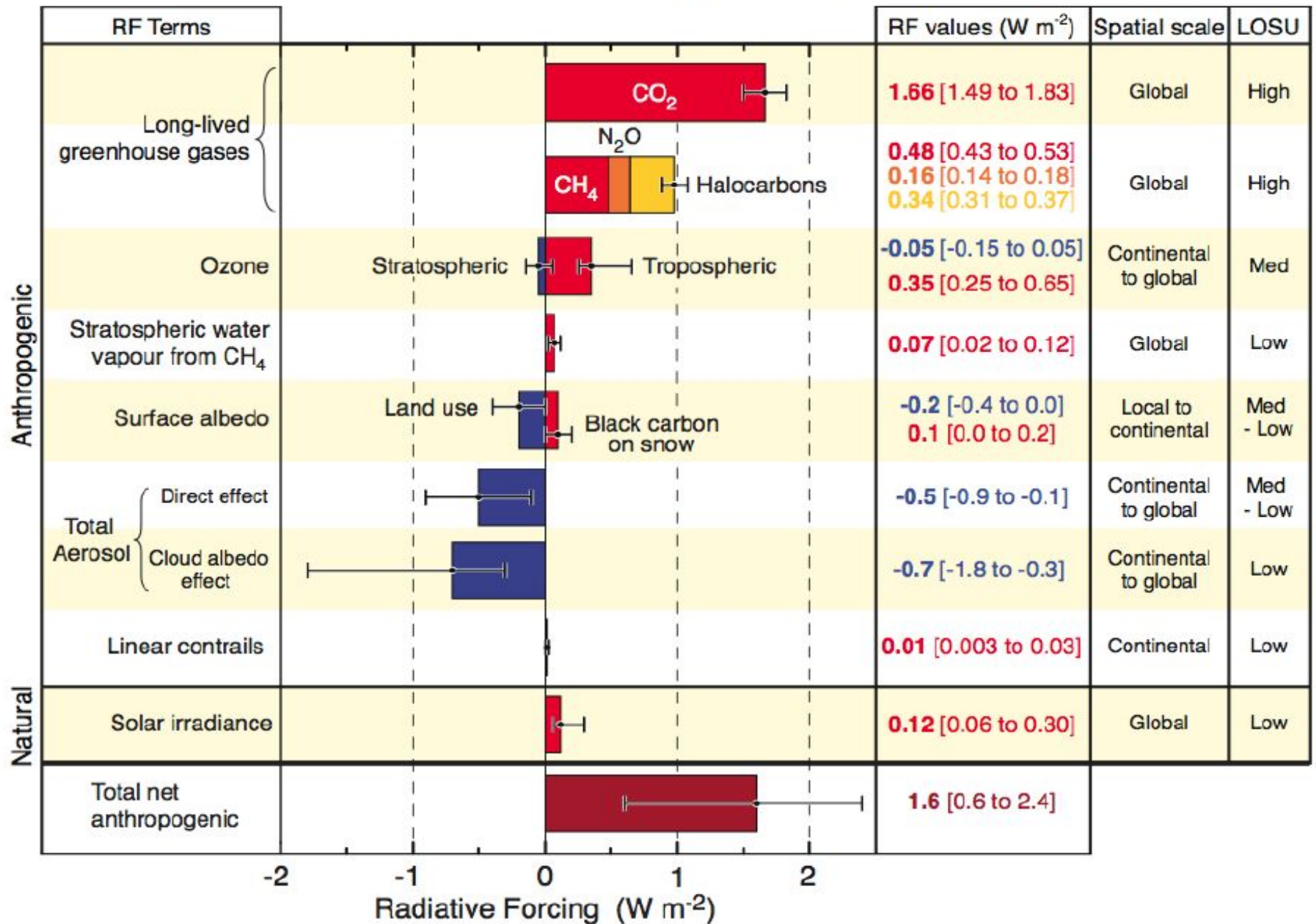
KOSMOS

ATMO-
SFERA

POWIERZ-
-CHNIA
ZIEMI



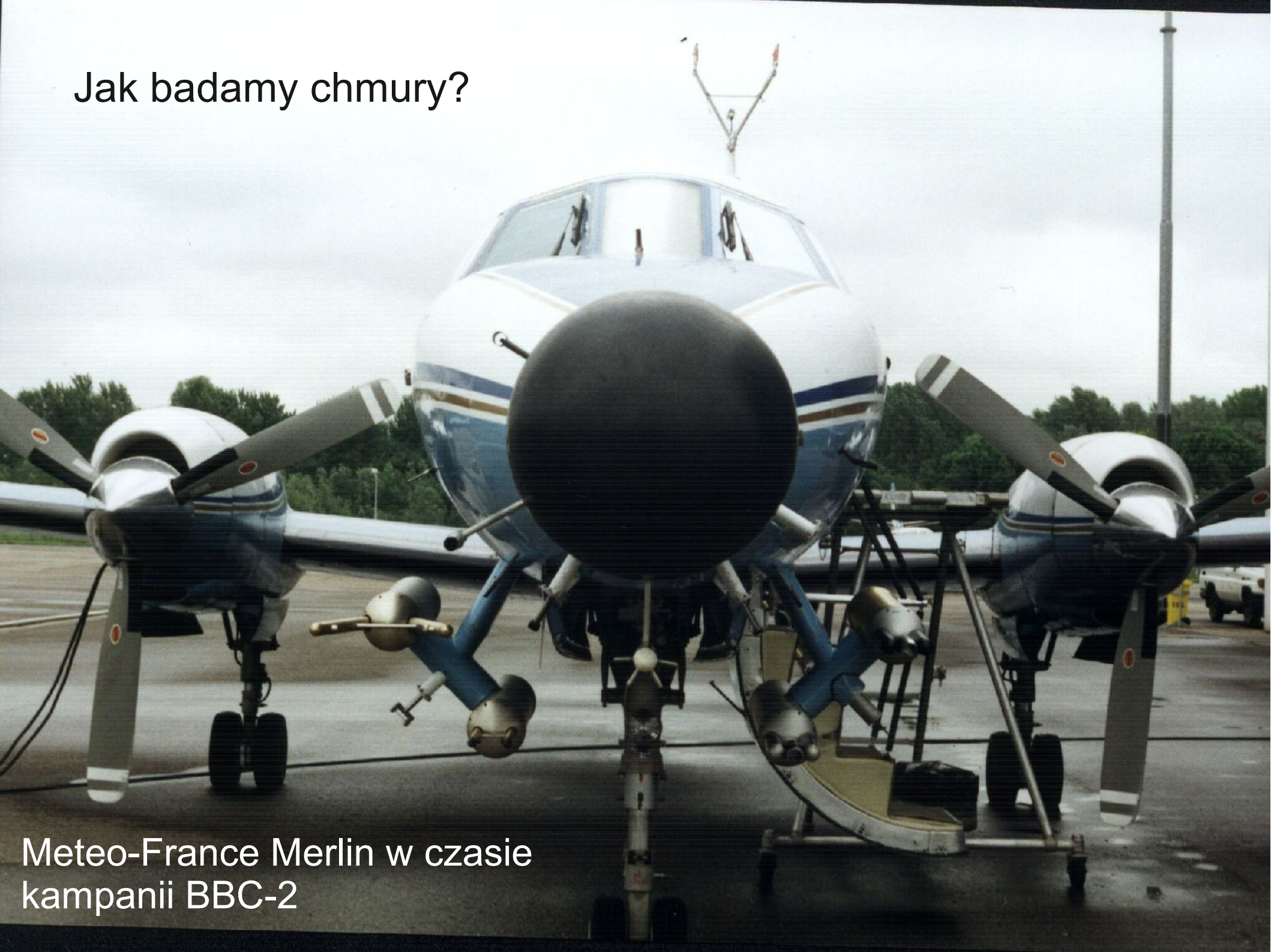
Radiative Forcing Components



©IPCC 2007: WG1-AR4

Wymuszanie radiacyjne będące skutkiem zmiany składu atmosfery oraz zmian innych czynników fizycznych od 1750r (www.ipcc.ch)

Jak badamy chmury?



Meteo-France Merlin w czasie kampanii BBC-2



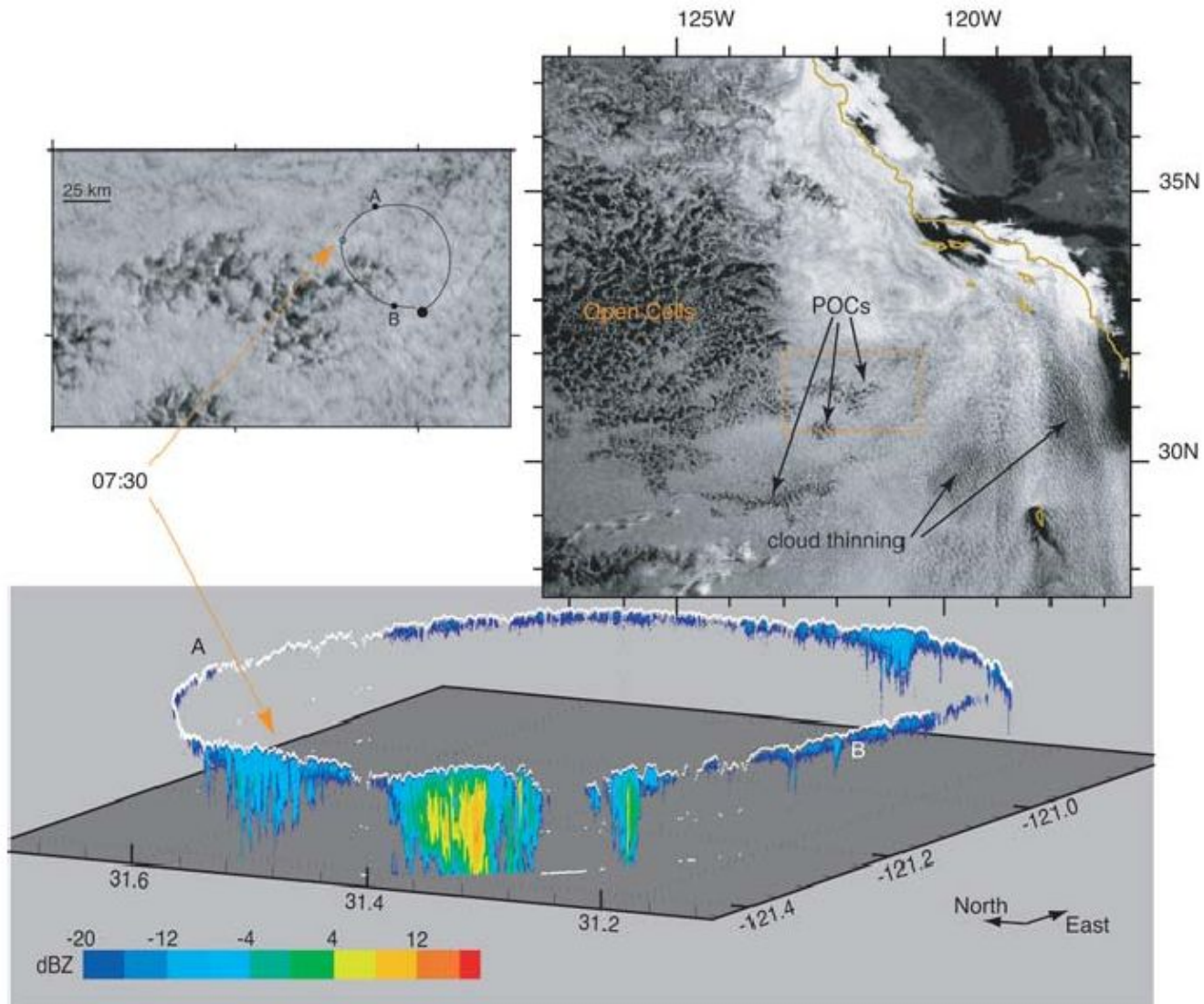
UFT-F

PVM
FFSSP

NCAR C-130 w czasie kampanii
DYCOMS-II



Pomiary na NCAR C-130



Stevens et al., 2005

FIG 3. (top right) Channel I ($0.6 \mu\text{m}$) reflectance over the northeast Pacific from GOES-10 at 0730 LT (1430 UTC) for 11 Jul 2002. (top left) Zoomed image of reflectance field from boxed region in regional image; overlaid on this image is a flight segment from RF02 that spans the time of the overpass and from which radar and lidar data is presented in top left panel. The zoomed image highlights a tilde-shaped POC boxed in the image. (bottom) Time–height radar reflectivities filled, with cloud top height as estimated by downward-looking lidar shown by white line. Regions where lidar detects no cloud are shown by a lidar trace at the surface. The time for which the satellite image is valid is indicated on the flight tracks.

Kampania pomiarowa – badanie mieszania chmur z otoczeniem

POST – Physics of Stratocumulus Top, California, 2008

aerozole
(jądra kondensacji)



mikrofizyka



temperatura,
wilgotność,
zawartość
wody,
turbulencja,

krople





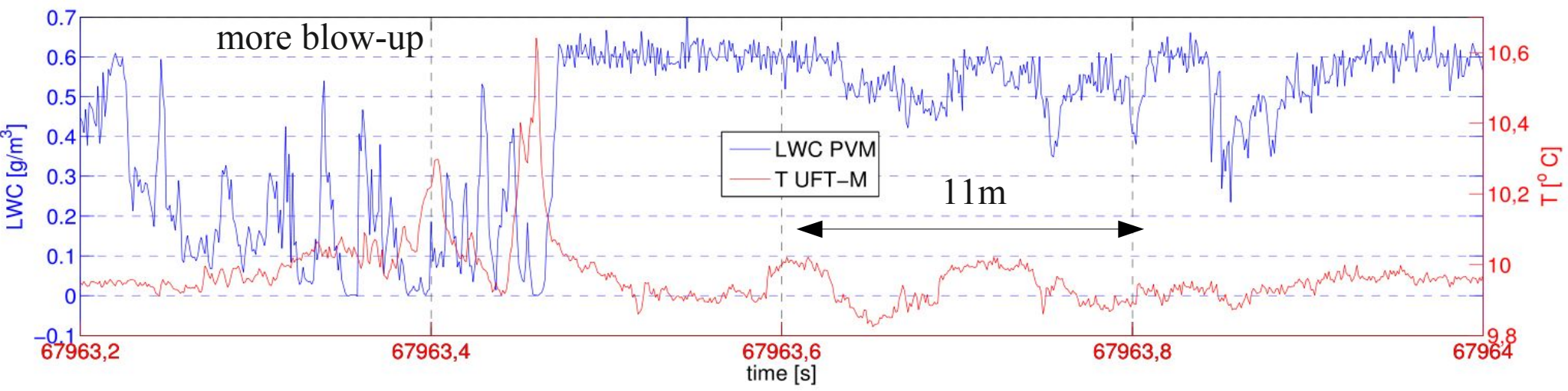
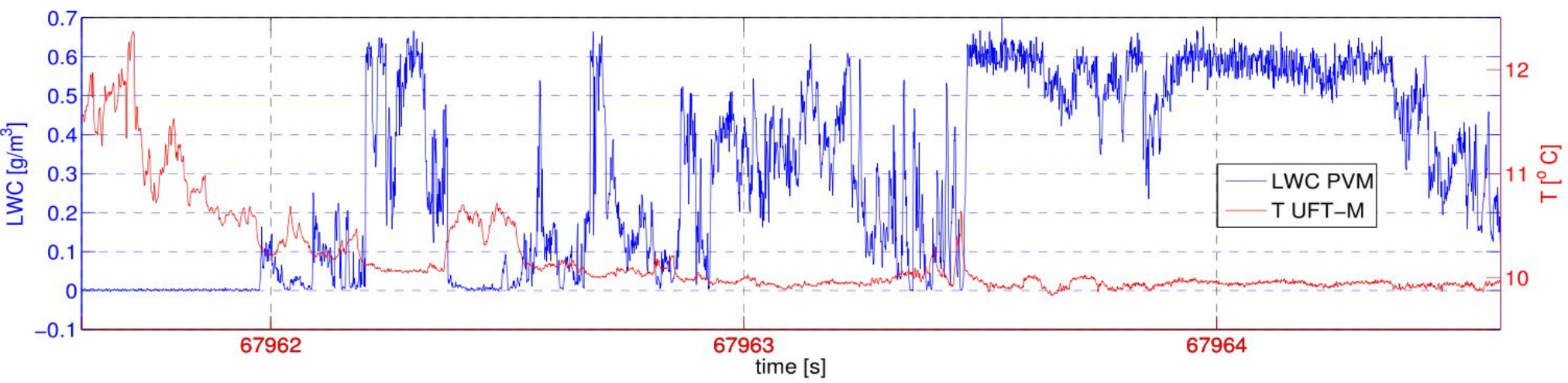
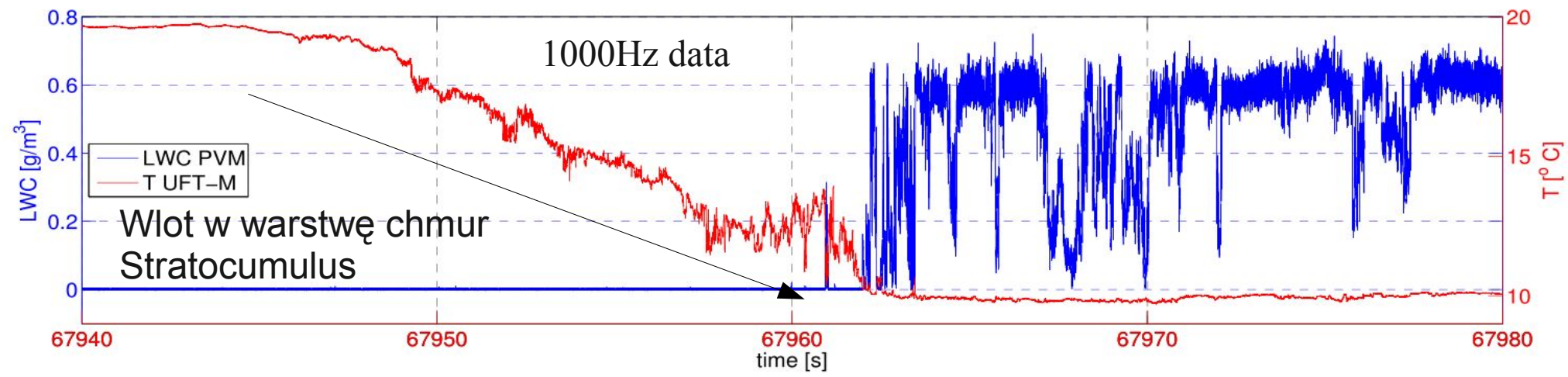
CIRPAS Twin-Otter gotowy do startu – kampania POST



Termometr UFT-M Uniwersytetu Warszawskiego na Twin-Otter

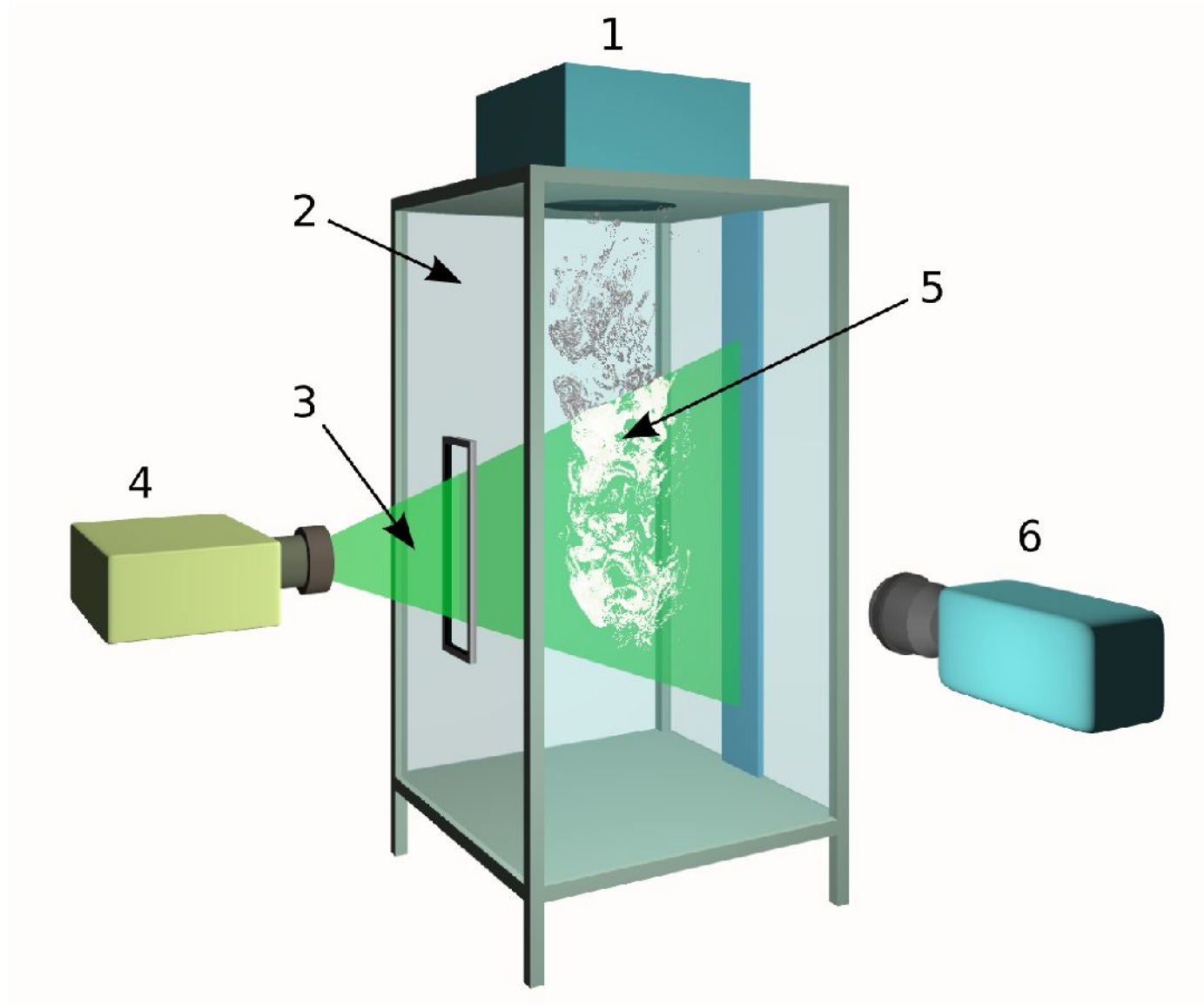
Przyrządy do
pomiarów
kropelek
i kryształków lodu.





Komora
chmurowa:

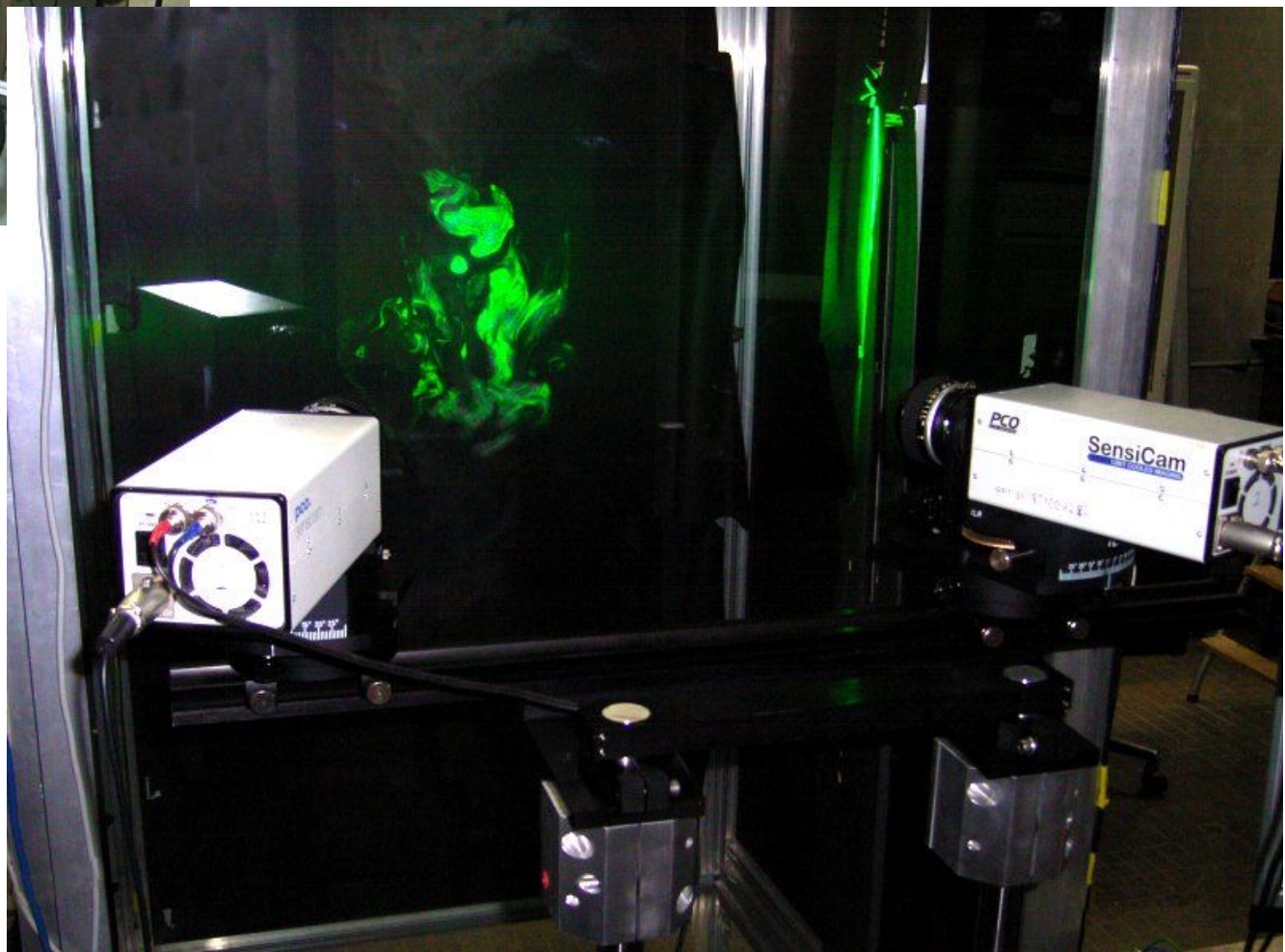
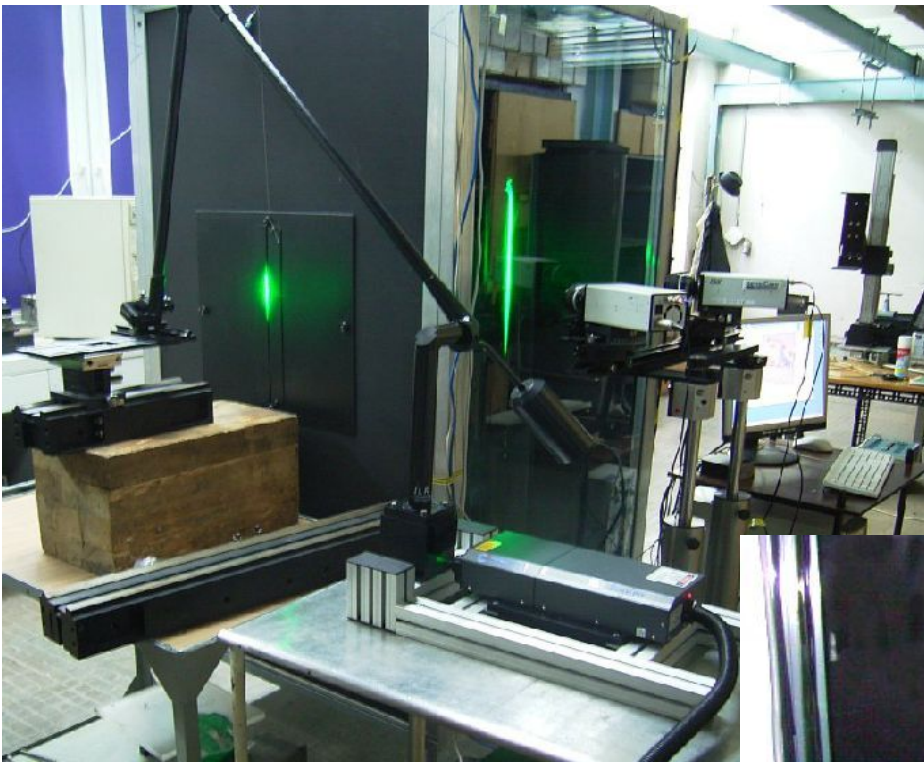
Tak badamy
kropelki i procesy
chmurowe w
laboratorium.



Schemat układu pomiarowego.

1 – generator chmury; 2-komora; 3 – płaszczyzna światła; 4 – laser impulsowy,
5 – chmura, 6 - kamera.

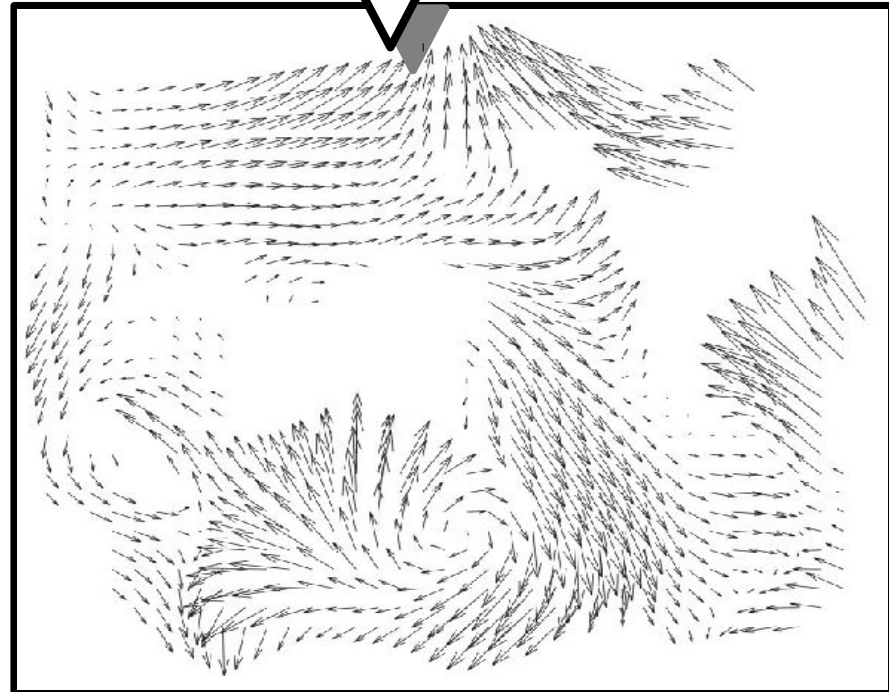
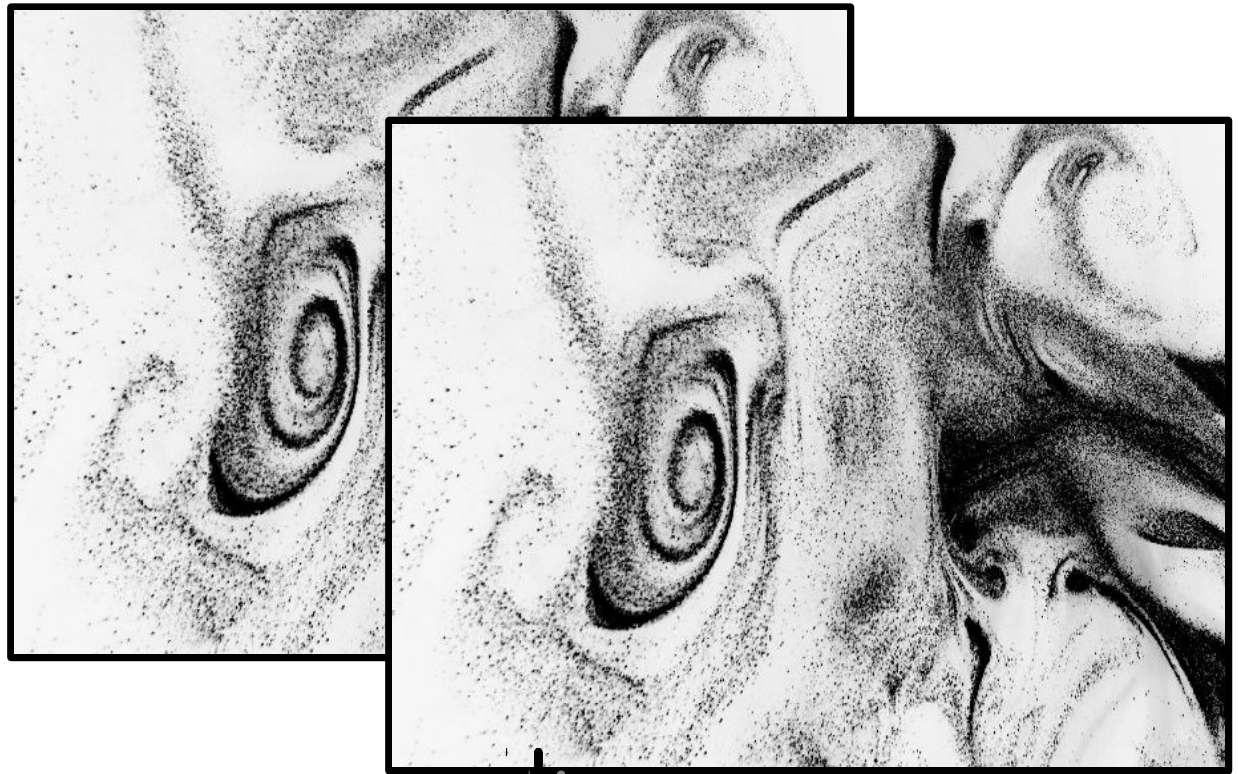
Fotografie układu laboratoryjnego.

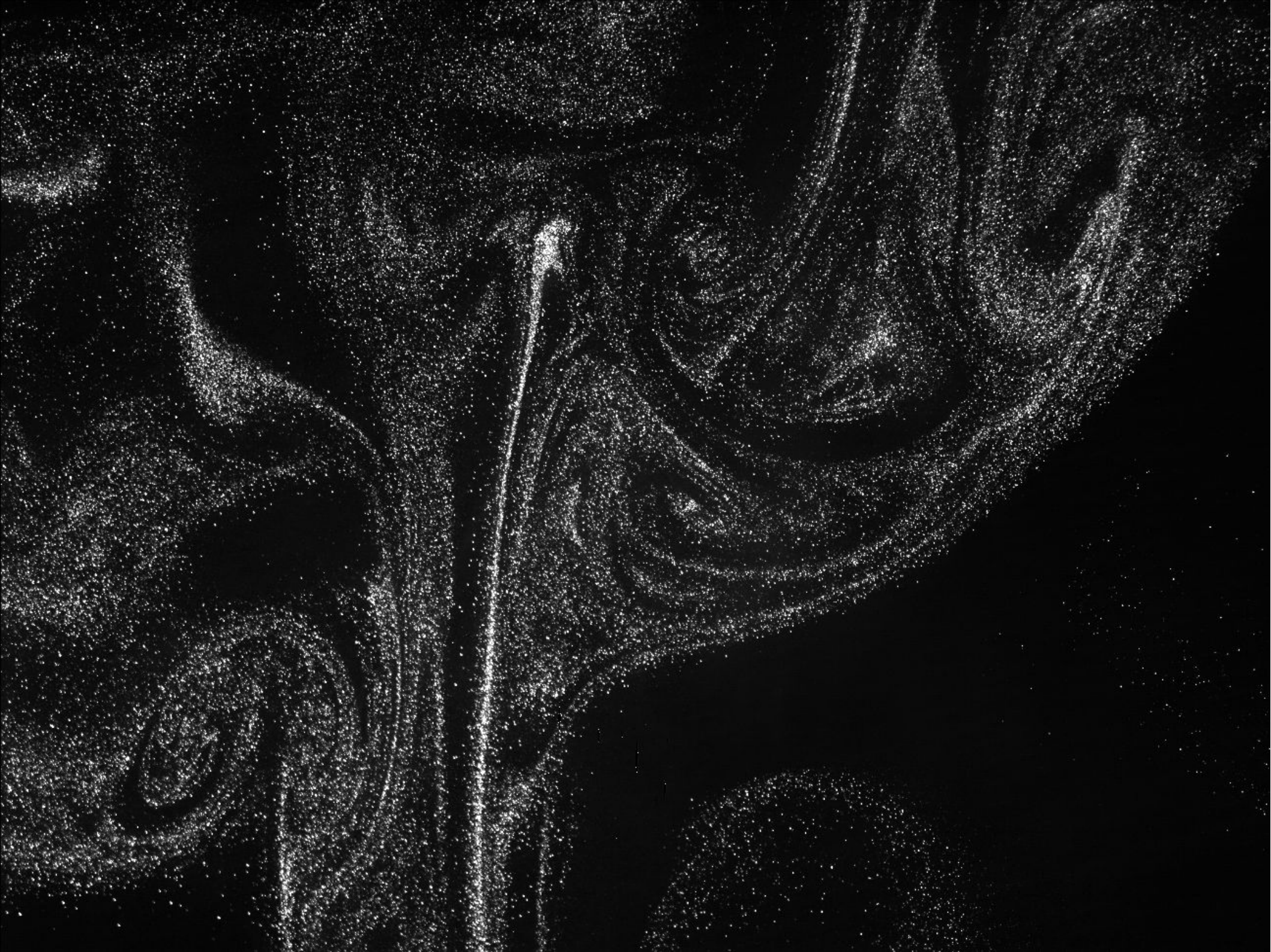


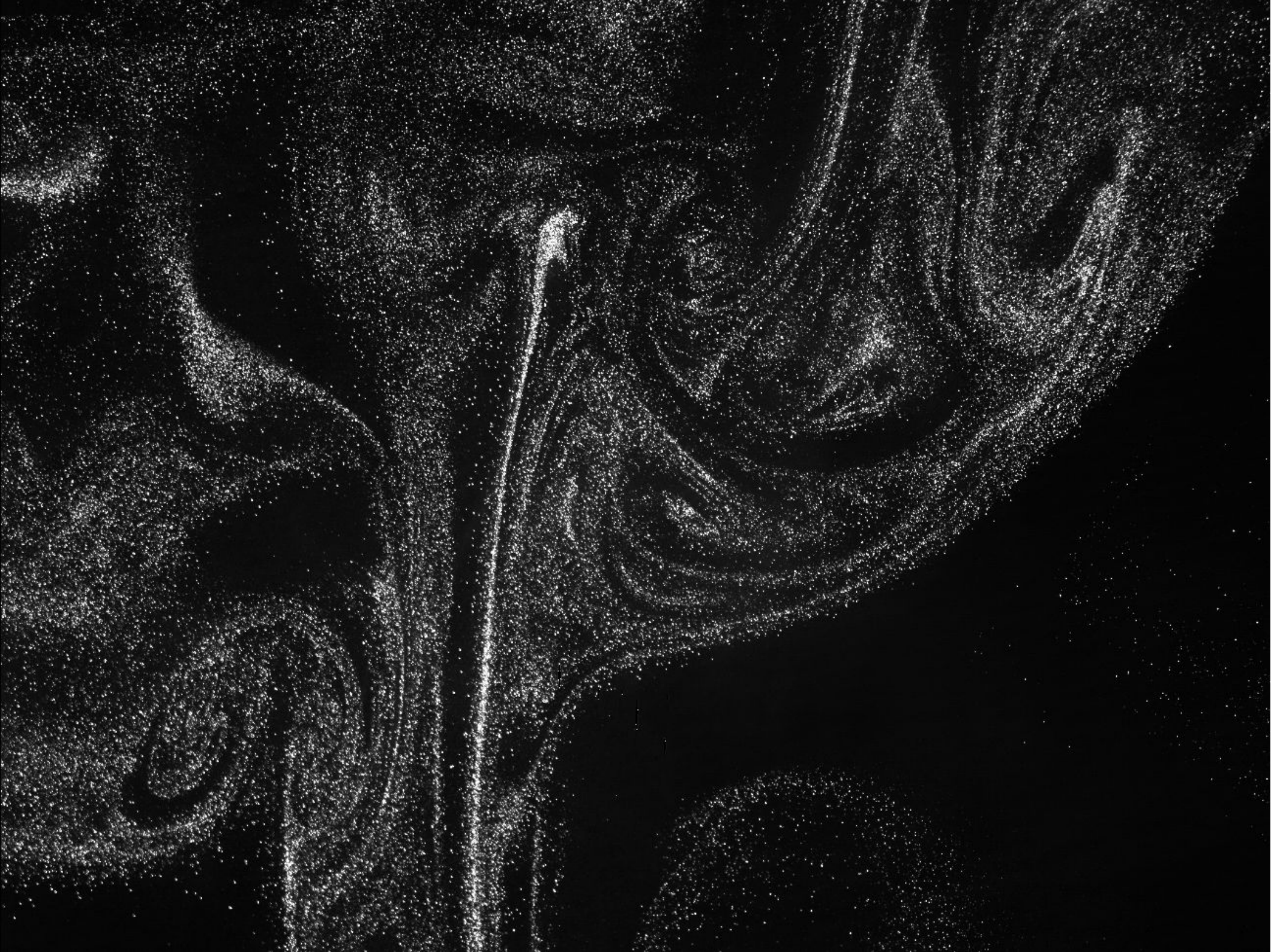
PIV – Particle Imaging Velocimetry

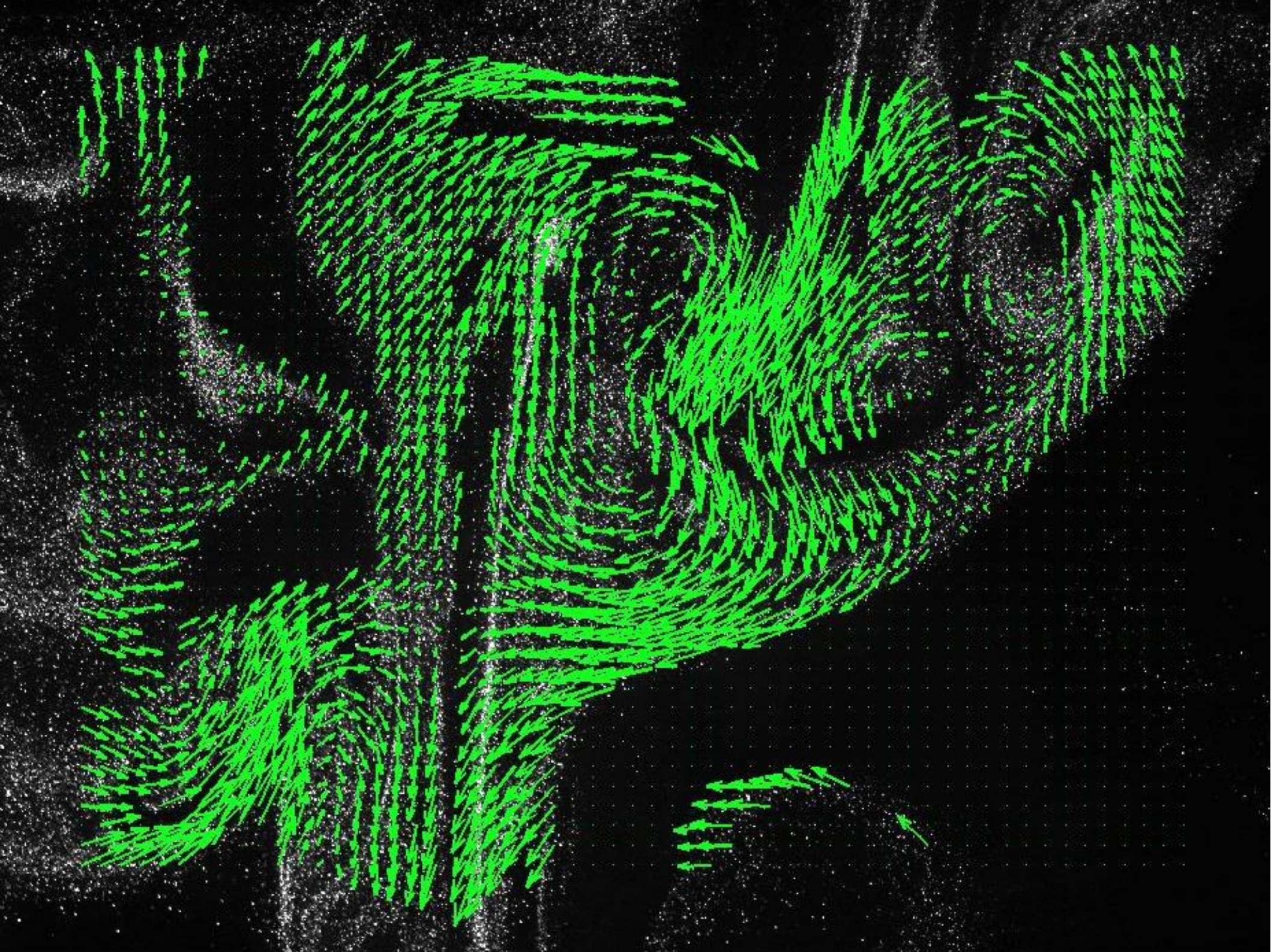
Zasada: wykonujemy dwie fotografie w znanym odstępie czasu.

Badając przesunięcie wzorów możemy określić prędkość przepływu.









SYMULACJE NUMERYCZNE CHMUR



$$B \equiv g \left[\frac{T - T_0}{T_0} + \varepsilon(q_v - q_{v0}) - q_c \right],$$

$$D/Dt \equiv \partial/\partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla$$

Równania mechaniki płynów, termodynamiki: prawa zachowania (pędu, energii, masy poszczególnych substancji – brak reakcji chemicznych...

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla\pi + \mathbf{k}B + \nu\nabla^2\mathbf{v},$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0,$$

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{L}{c_p} C_d + \mu_T \nabla^2 T,$$

$$\frac{Dq_v}{Dt} = -C_d + \mu_v \nabla^2 q_v,$$

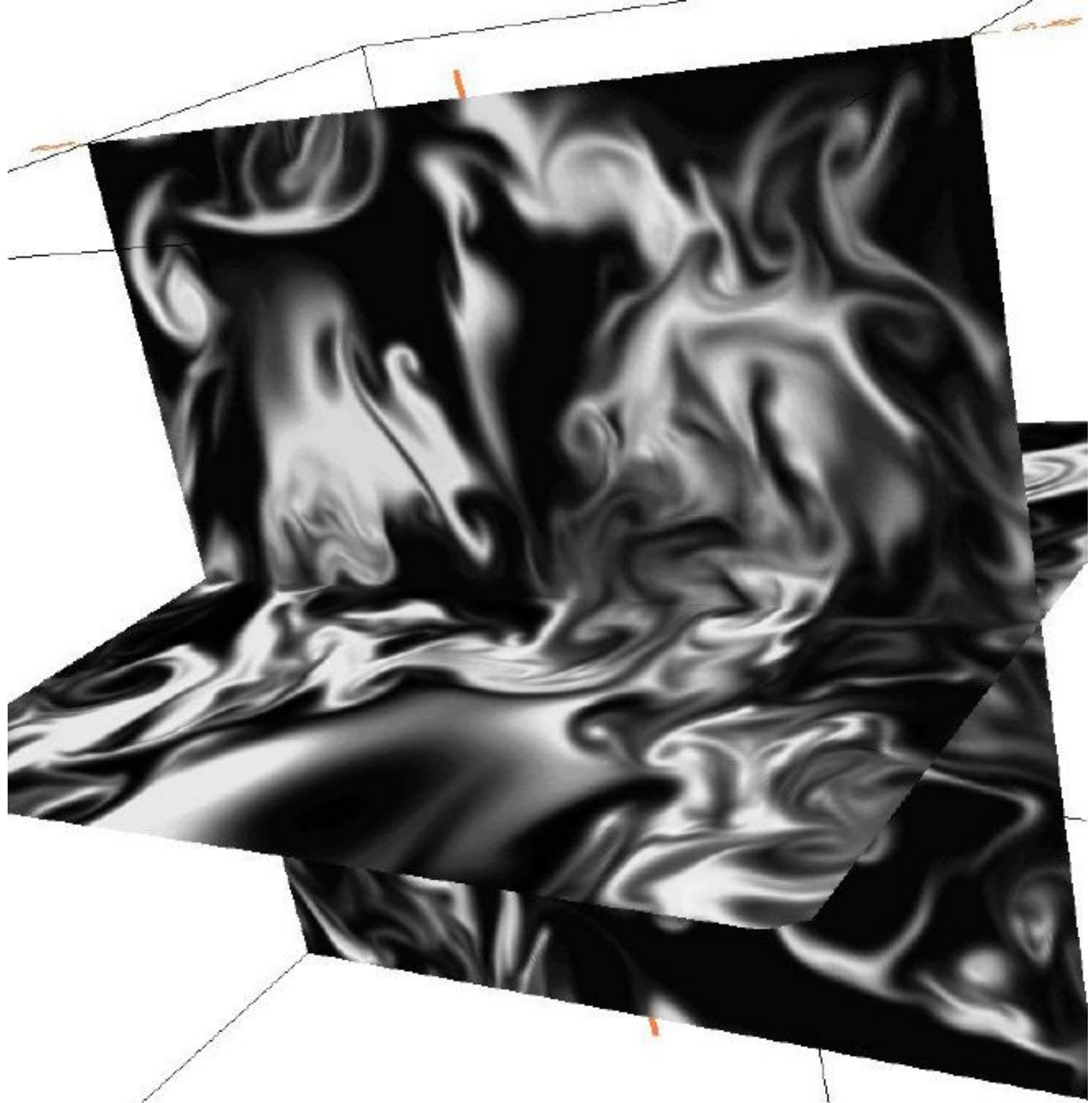
$$\frac{Dq_c}{Dt} = C_d.$$

$$\frac{D^*f}{D^*t} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(f \frac{dr}{dt} \right) + \eta,$$

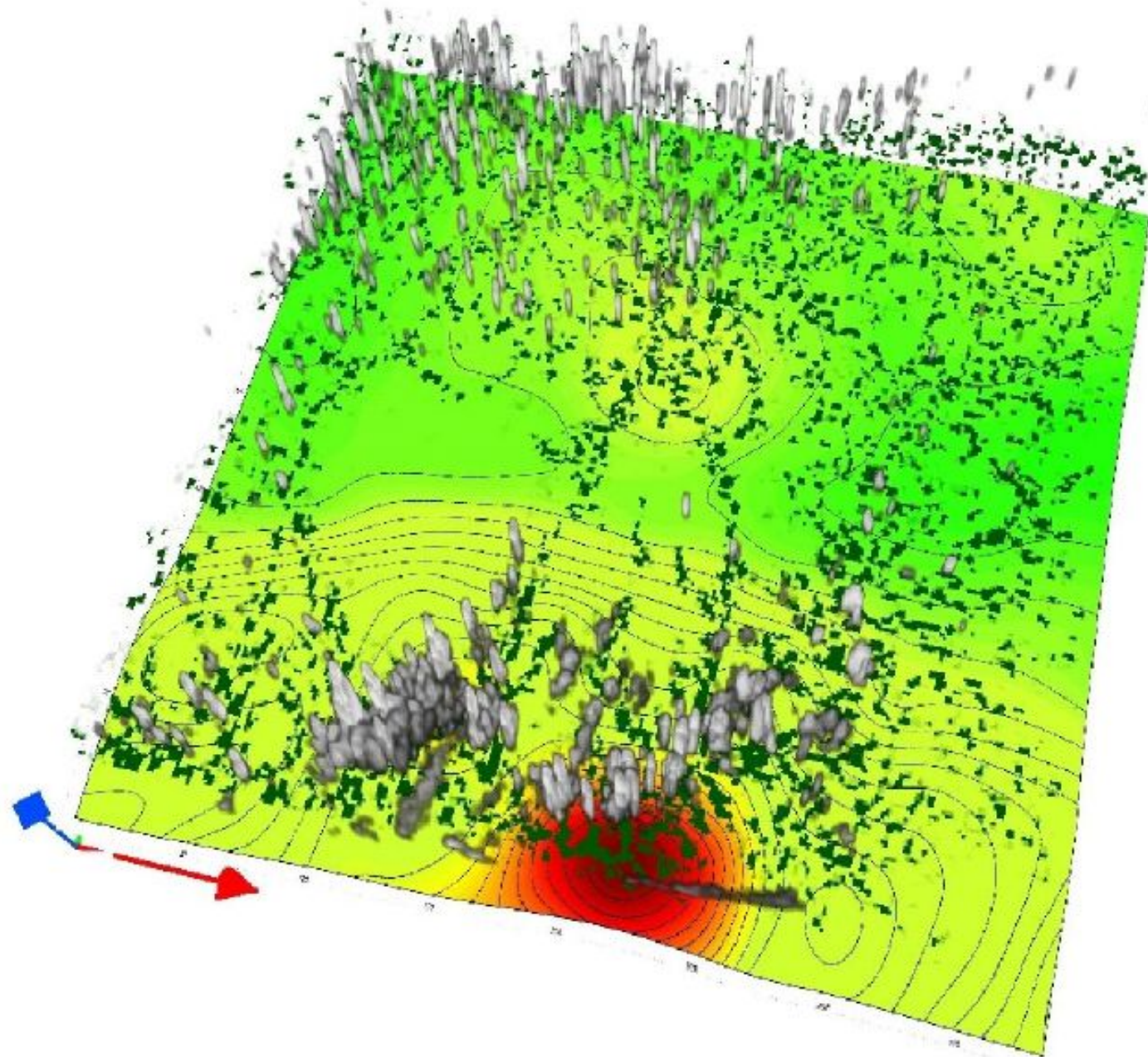
$$D^*/D^*t \equiv \partial/\partial t + (\mathbf{v} - \mathbf{k}v_t) \cdot \nabla$$

$$C_d = \int f \frac{dm}{dt} dr,$$

SYMULACJE
mieszania w
małych
skalach które
obserwujemy
z pokładu
samolotu i
badamy w
komorze
chmurowej

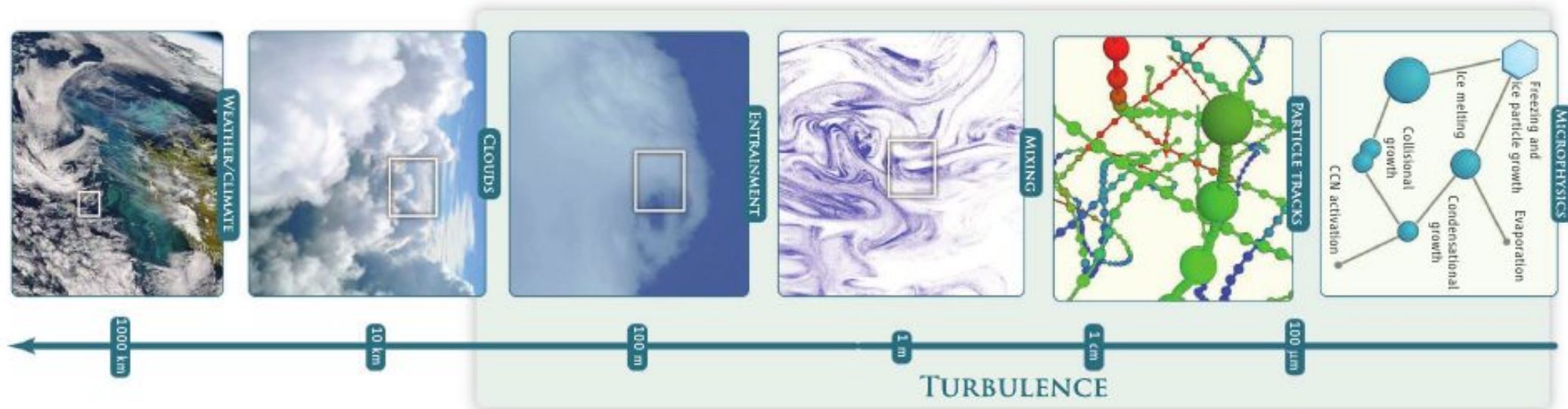


Symulacja zachmurzenia nad południową polską obliczona na komputerze BlueGene.



PODSUMOWANIE:

CREDIT: (MICROPHYSICS) F. STRATMANN; (TRAJECTORIES) E. BODENSCHATZ, SCIENCE MAGAZINE TABLE OF CONTENTS, 10 FEBRUARY 2006; (MIXING) S. MALINOWSKI, (ENTRAINMENT AND CLOUD) R. A. SHAW; (GLOBAL) NASA EARTH OBSERVATORY



Chmura to nie obiekt, „rzecz” a proces fizyczny: zawiesina kropelek i kryształków lodu powiązana skomplikowanymi oddziaływaniami z przepływem wokół, promieniowaniem w atmosferze.

Procesy chmurowe obejmują ogromny zakres skal, nie da się zrozumieć chmur patrząc tylko na wybrane skale i oddziaływania.

Dopiero dziś, łącząc techniki badań w atmosferze, badań laboratoryjnych, symulacji numerycznych jesteśmy na skraju zrozumienia tego jak „działają” chmury.

Dziękuję za uwagę.
Patrzmy w niebo w drodze do domu.
Tam są chmury....

