

# O modelowaniu komputerowym chmur i deszczu

Sylwester Arabas  
Uniwersytet Jagielloński

LIX Szkoła Matematyki Poglądowej  
18 lutego 2019 r.

# jak powstają chmury i opad?

WIKIPEDIA

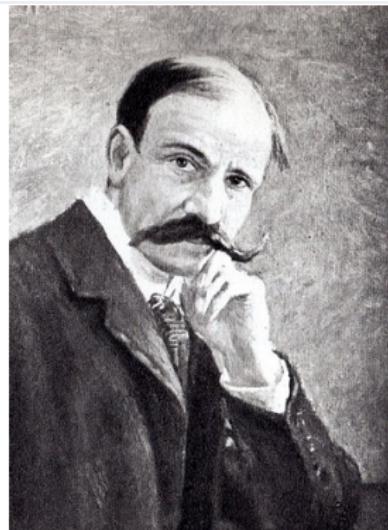
## Maurycy Pius Rudzki

**Maurycy Pius Rudzki** (b. 1862, d. 1916) was the first person to call himself a professor of geophysics. He held the Chair of Geophysics at the Jagiellonian University in Kraków, and established the Institute of Geophysics there in 1895. His research specialty was elastic anisotropy, as applied to wave propagation in the earth, and he established many of the fundamental results in that arena. [1]

## References

1. Sławiński, Michael A., WAVES AND RAYS IN ELASTIC CONTINUA, 2007: "Archived copy" (<https://archive.is/20120715001056/http://samizdat.mines.edu/wavesandrays/>). Archived from the original (<http://samizdat.mines.edu/wavesandrays/>) on 2012-07-15. Retrieved 2010-06-30.

**Maurycy Pius Rudzki**



# jak powstają chmury i opad?

„Zasady meteorologii” (1917)

<http://pbc.gda.pl/dlibra/docmetadata?id=18434>

...

# jak powstają chmury i opad?

„Zasady meteorologii” (1917)

<http://pbc.gda.pl/dlibra/docmetadata?id=18434>

*W swobodnej atmosferze do skroplenia potrzebne są „jądra skroplenia”, dokoła których para skupia się i zamienia w wodę ...*

# jak powstają chmury i opad?

„Zasady meteorologii” (1917)

<http://pbc.gda.pl/dlibra/docmetadata?id=18434>

*W swobodnej atmosferze do skroplenia potrzebne są „jądra skroplenia”, dokoła których para skupia się i zamienia w wodę ...*

*Po miastach powietrze zawiera dużo dymu, molekułów kwasów i.t.d.*

*Wszystko to są hygroskopijne ciała skupiające parę nawet wtedy, gdy powietrze nie jest jeszcze nasycone ...*

# jak powstają chmury i opad?

„Zasady meteorologii” (1917)

<http://pbc.gda.pl/dlibra/docmetadata?id=18434>

*W swobodnej atmosferze do skroplenia potrzebne są „jądra skroplenia”, dokoła których para skupia się i zamienia w wodę ...*

*Po miastach powietrze zawiera dużo dymu, molekułów kwasów i.t.d.*

*Wszystko to są hygroskopijne ciała skupiające parę nawet wtedy, gdy powietrze nie jest jeszcze nasycone ...*

*Wszystko, co dotychczas powiedzieliśmy, odnosi się jeno do samotnych kropel. Tymczasem, jak to słusznie zauważył M. Smoluchowski zwykle spada nie jedna kropla, ale całe mnóstwo...*

# jak powstają chmury i opad?

„Zasady meteorologii” (1917)

<http://pbc.gda.pl/dlibra/docmetadata?id=18434>

*W swobodnej atmosferze do skroplenia potrzebne są „jądra skroplenia”, dokoła których para skupia się i zamienia w wodę ...*

*Po miastach powietrze zawiera dużo dymu, molekułów kwasów i.t.d.*

*Wszystko to są hygroskopijne ciała skupiające parę nawet wtedy, gdy powietrze nie jest jeszcze nasycone ...*

*Wszystko, co dotychczas powiedzieliśmy, odnosi się jeno do samotnych kropel. Tymczasem, jak to słusznie zauważył M. Smoluchowski zwykle spada nie jedna kropla, ale całe mnóstwo...*

*Kontrast między rozmiarami kropel deszczowych, z których składają się chmury, a rozmiarami kropel deszczowych, jest tak wielki, że te ostatnie oczywiście nie mogą pochodzić wprost z kondensacji, tylko z łączenia się wielu małych kropelek...*

# Plan prezentacji

---

- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Modelowanie mikrofizyki chmur
- Porównanie z pomiarami

# Plan prezentacji

---

- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Modelowanie mikrofizyki chmur
- Porównanie z pomiarami

# Oddziaływanie aerozol – chmury – opad: procesy



- ▶ aktywacja kropelek na aerozolu
- ▶ kondensacja

# Oddziaływanie aerozol – chmury – opad: procesy



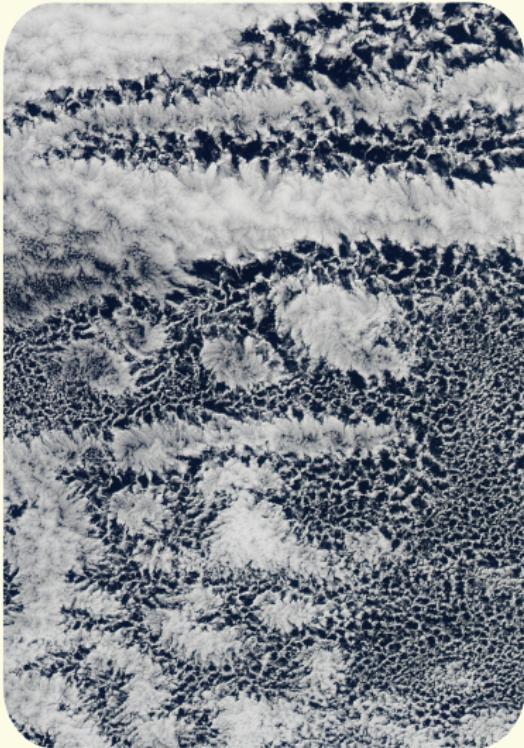
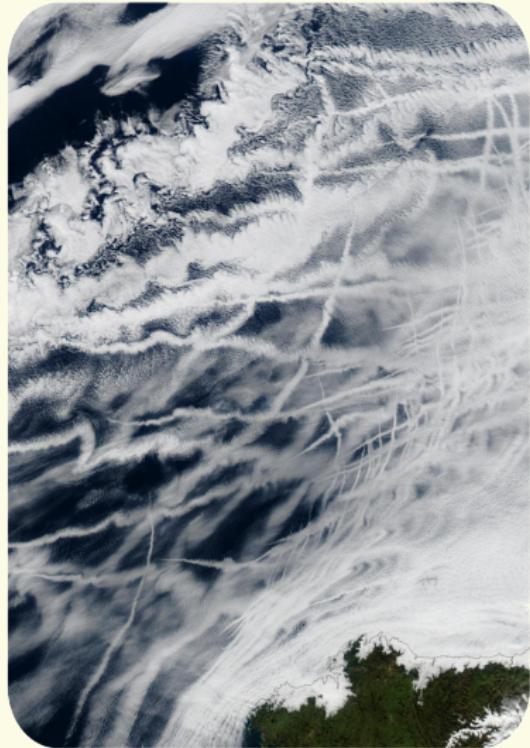
- ▶ aktywacja kropelek na aerozolu
- ▶ kondensacja
- ▶ zderzenia pomiędzy kropelkami
- ▶ procesy chemiczne zachodzące w kropelkach

# Oddziaływanie aerozol – chmury – opad: procesy

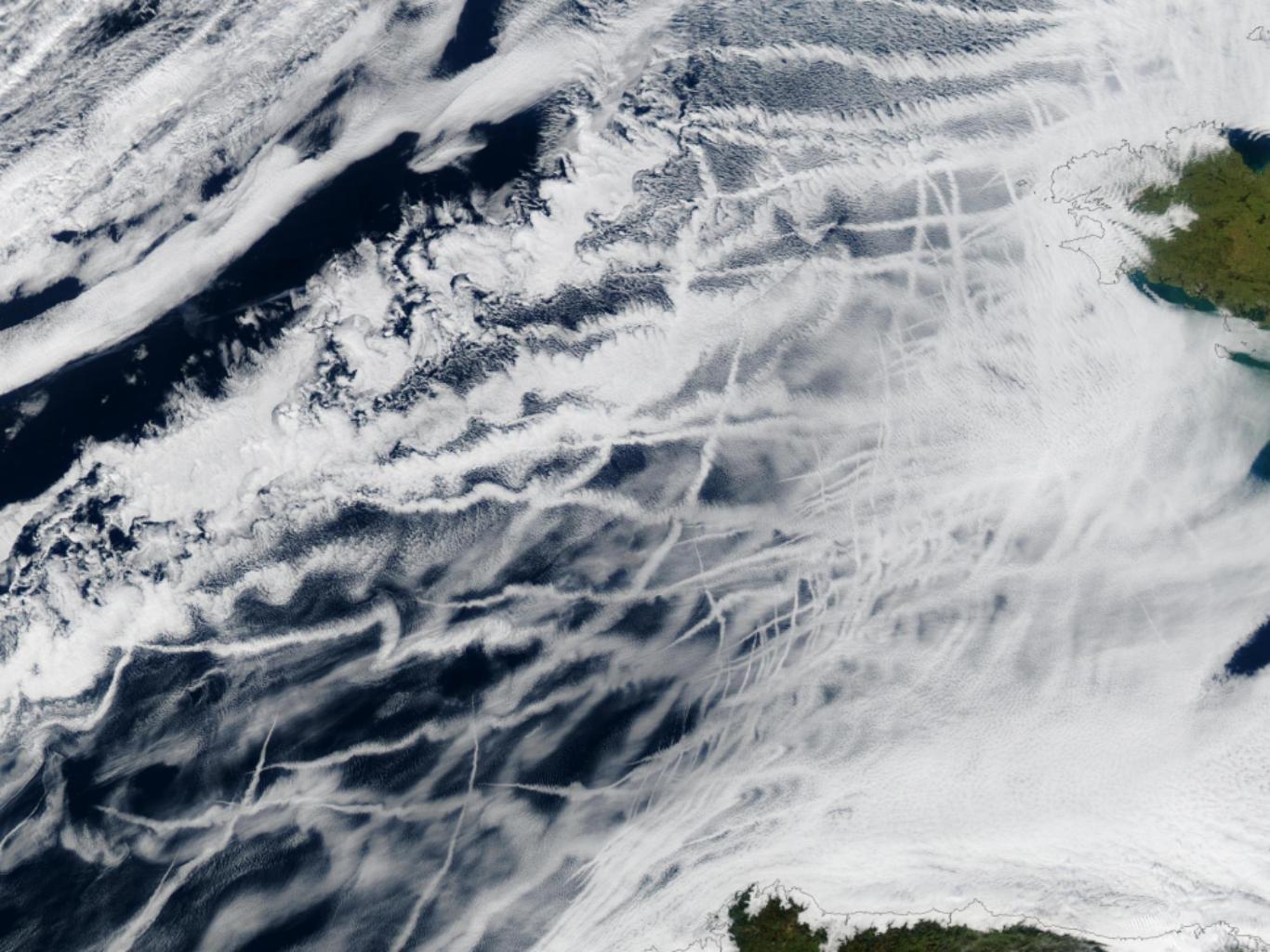


- ▶ aktywacja kropelek na aerozolu
- ▶ kondensacja
- ▶ zderzenia pomiędzy kropelkami
- ▶ procesy chemiczne zachodzące w kropelkach
- ▶ opad
- ▶ wymywanie aerozolu
- ▶ odparowywanie kropelek

## Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: przykłady

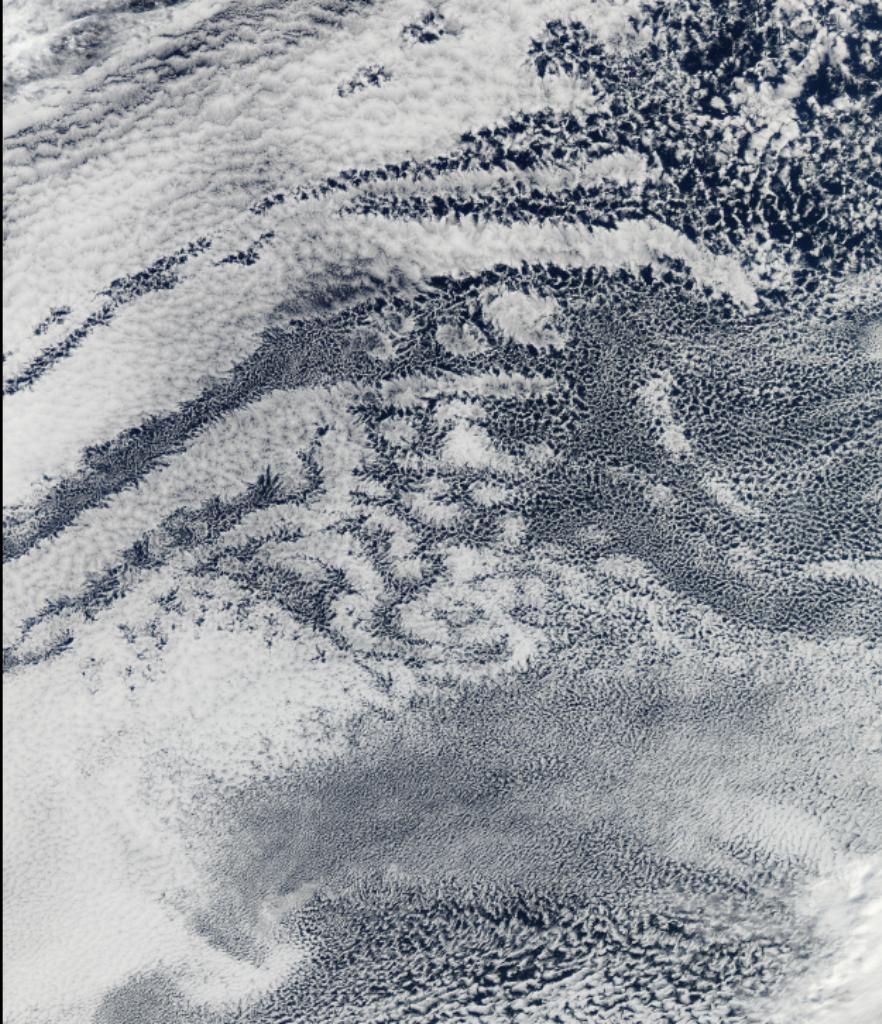


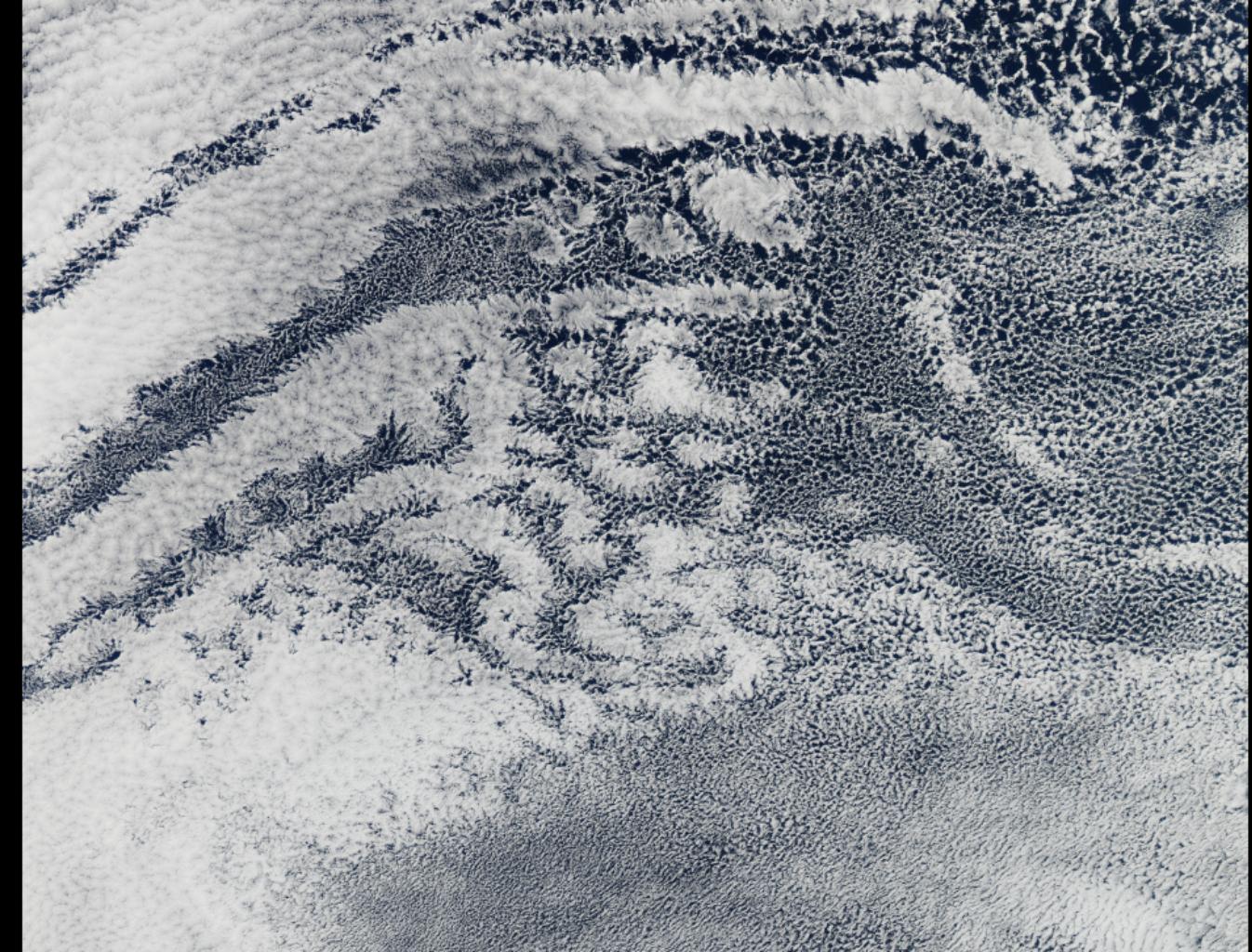
źródło: NASA (27 I 2003 – Zatoka Biskajska; 17 IV 2010 – Pacyfik u wybrzeży Peru)

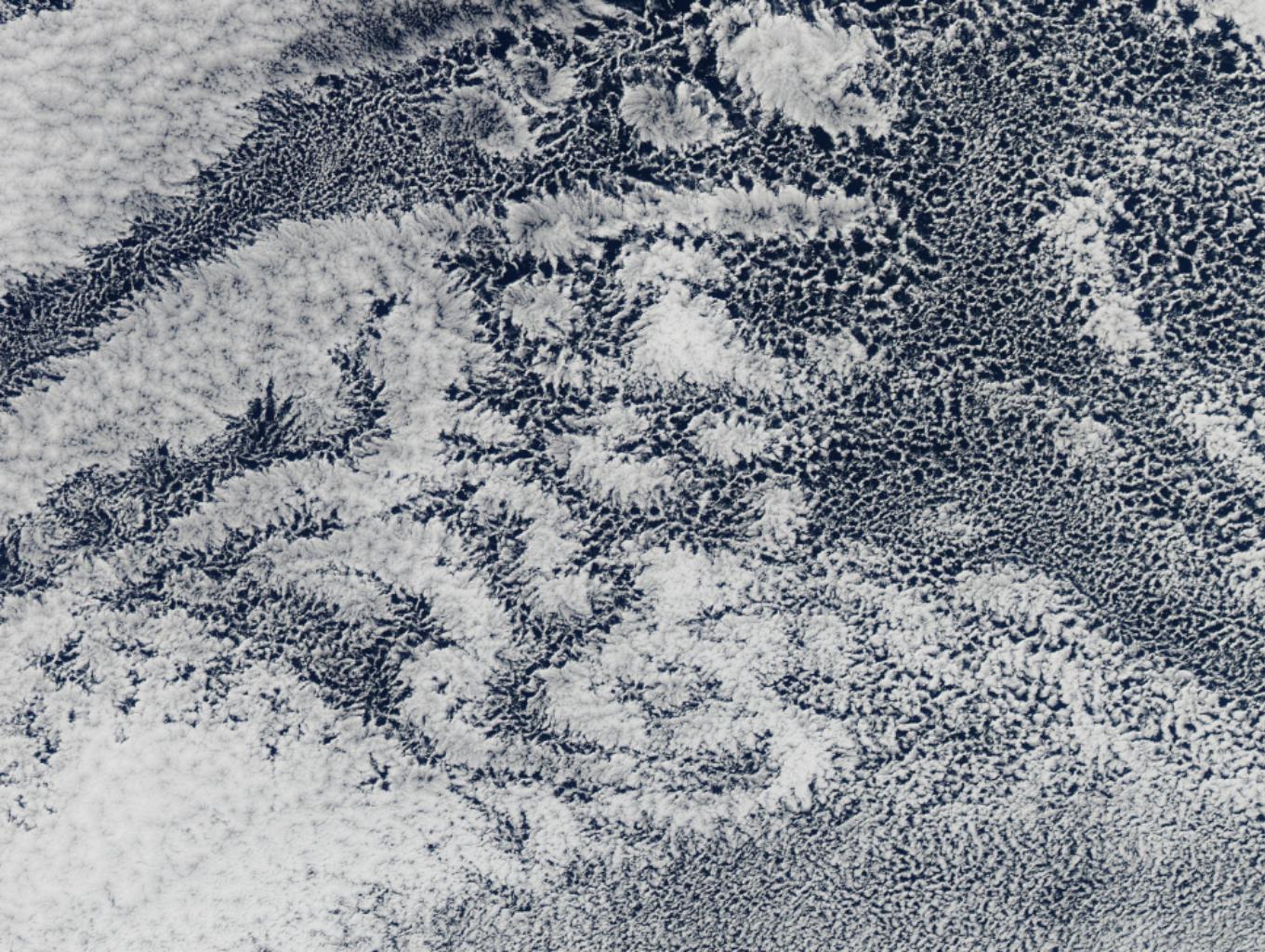


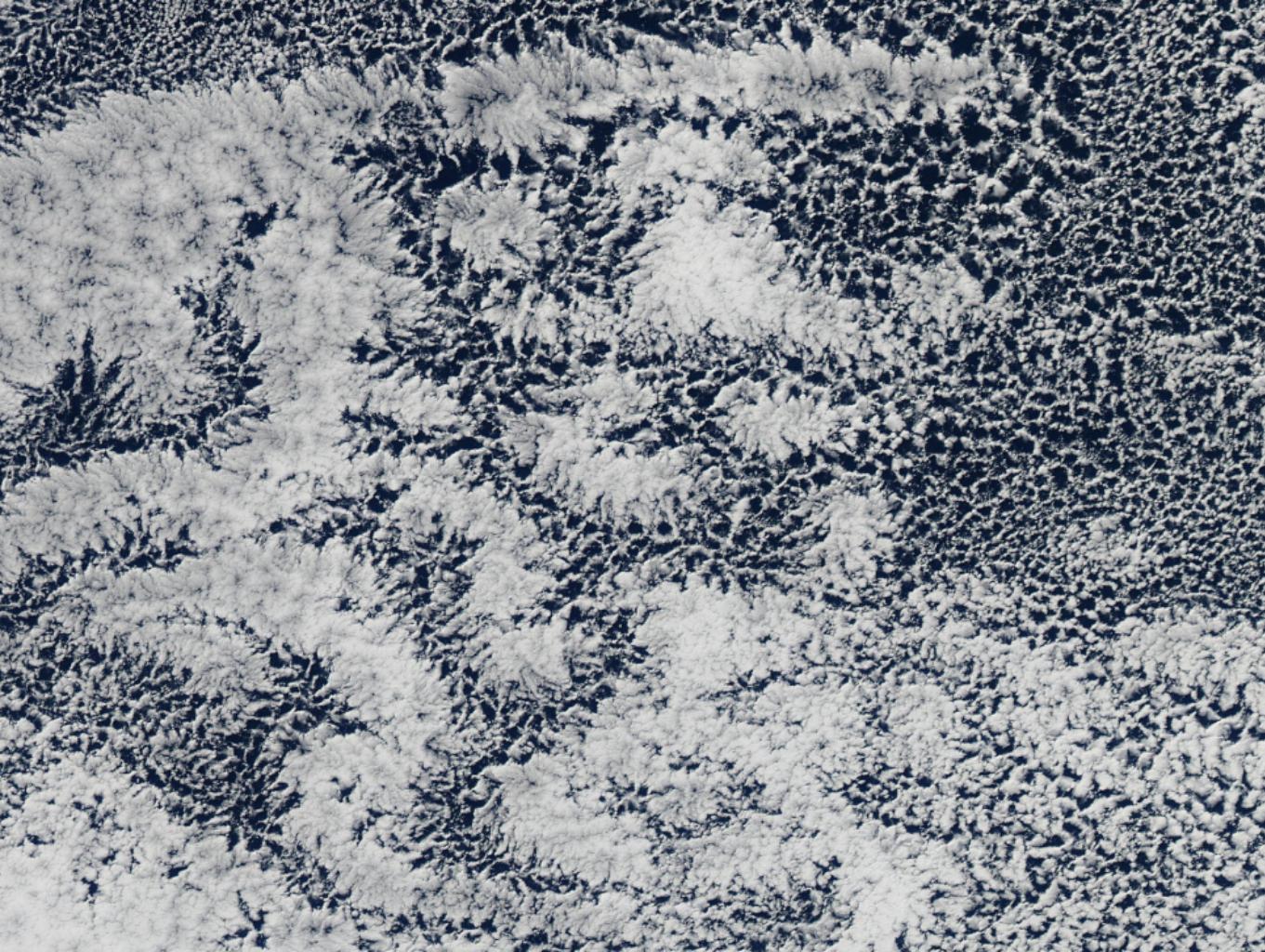


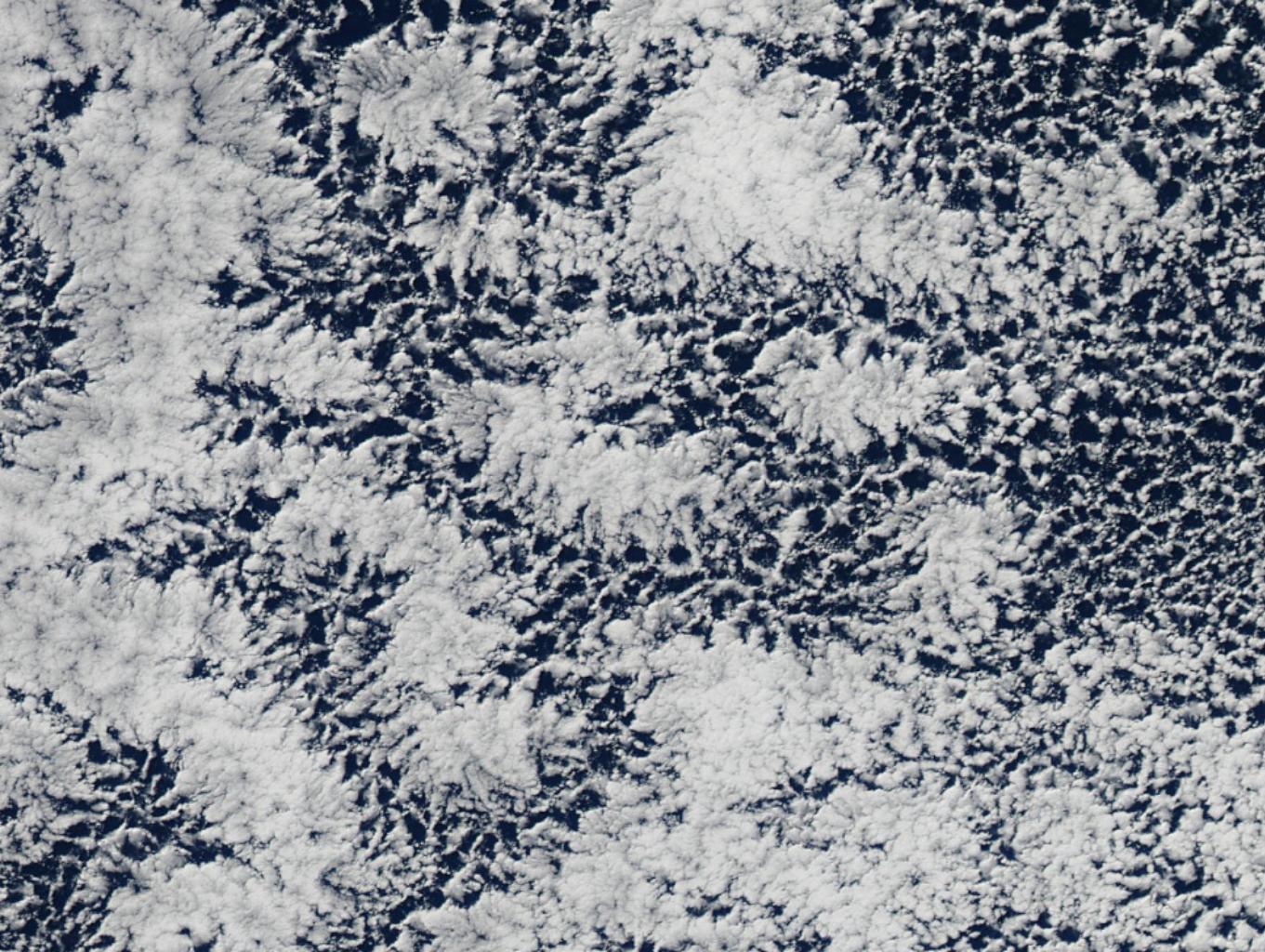
źródło: NASA

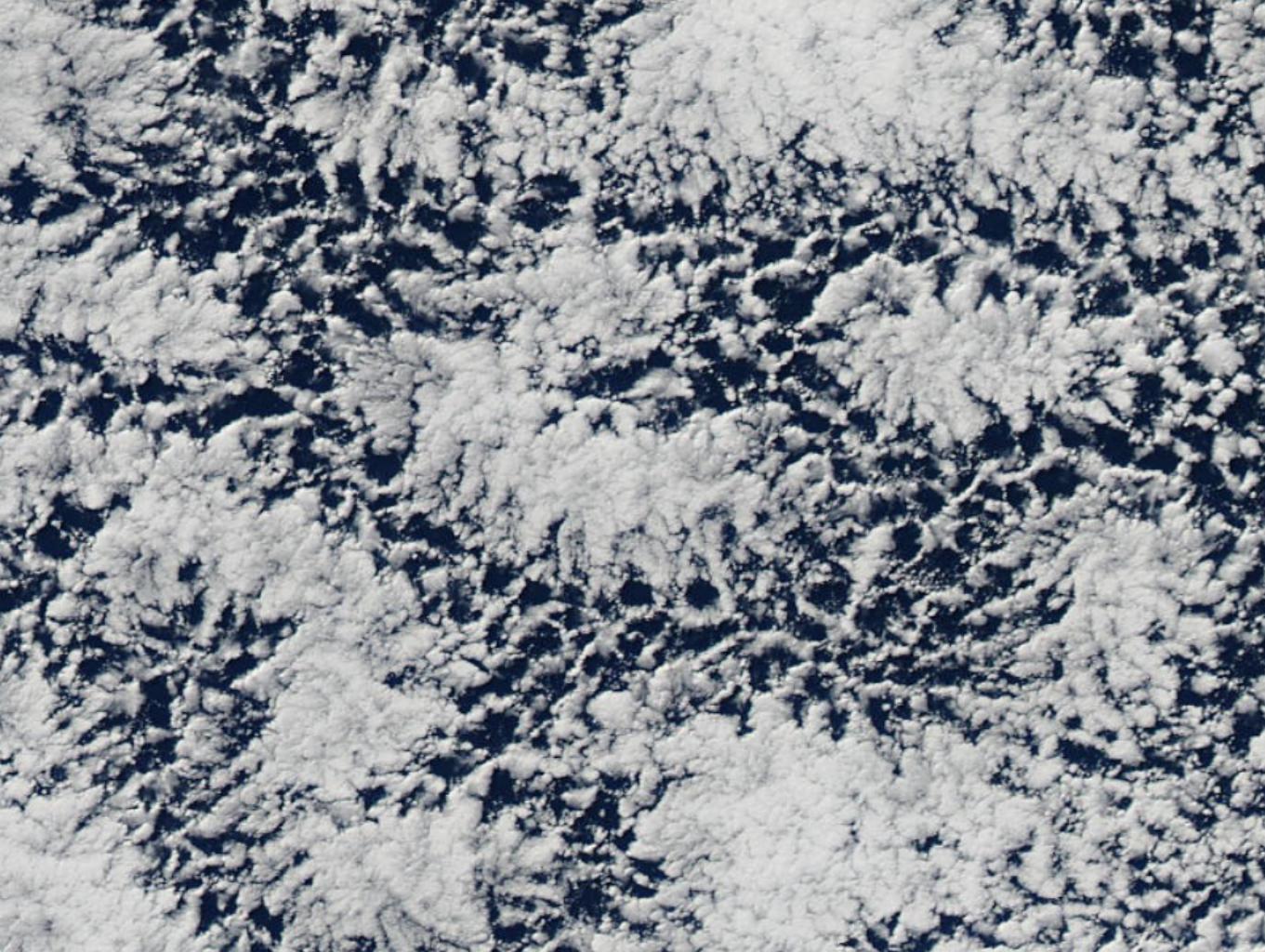




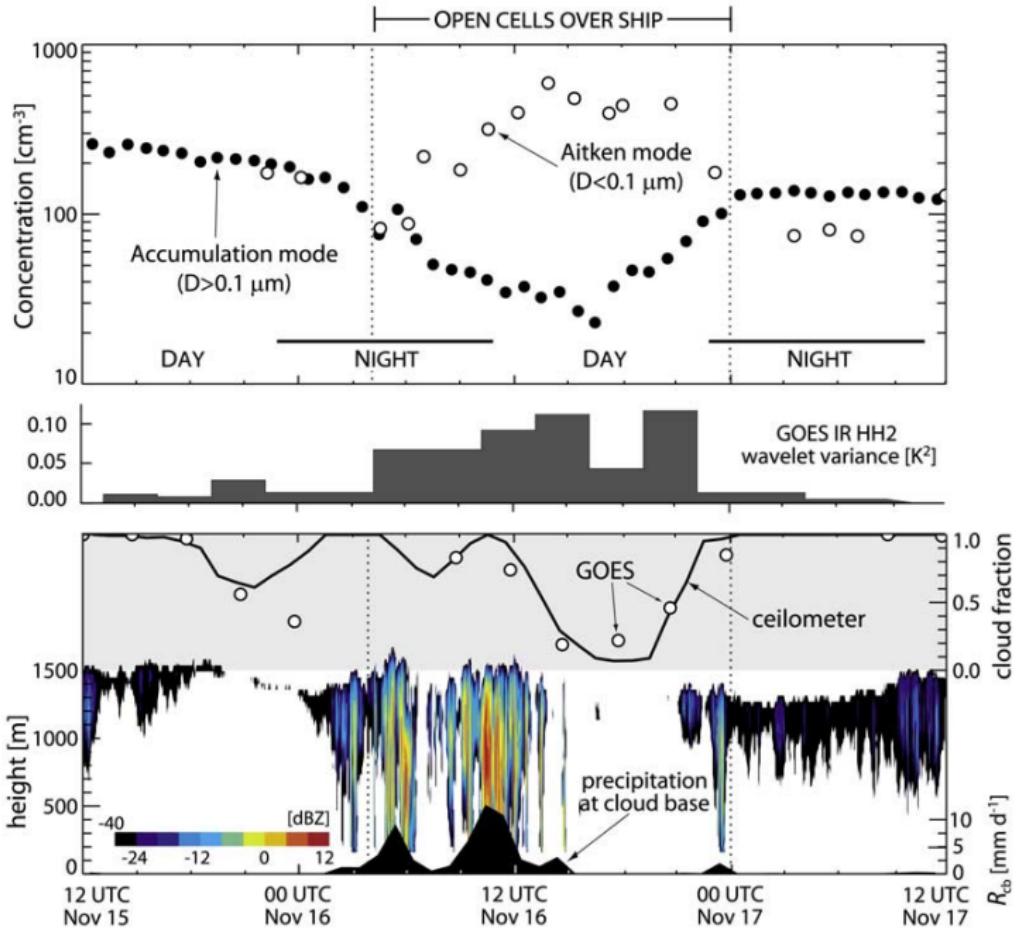












# Plan prezentacji

---

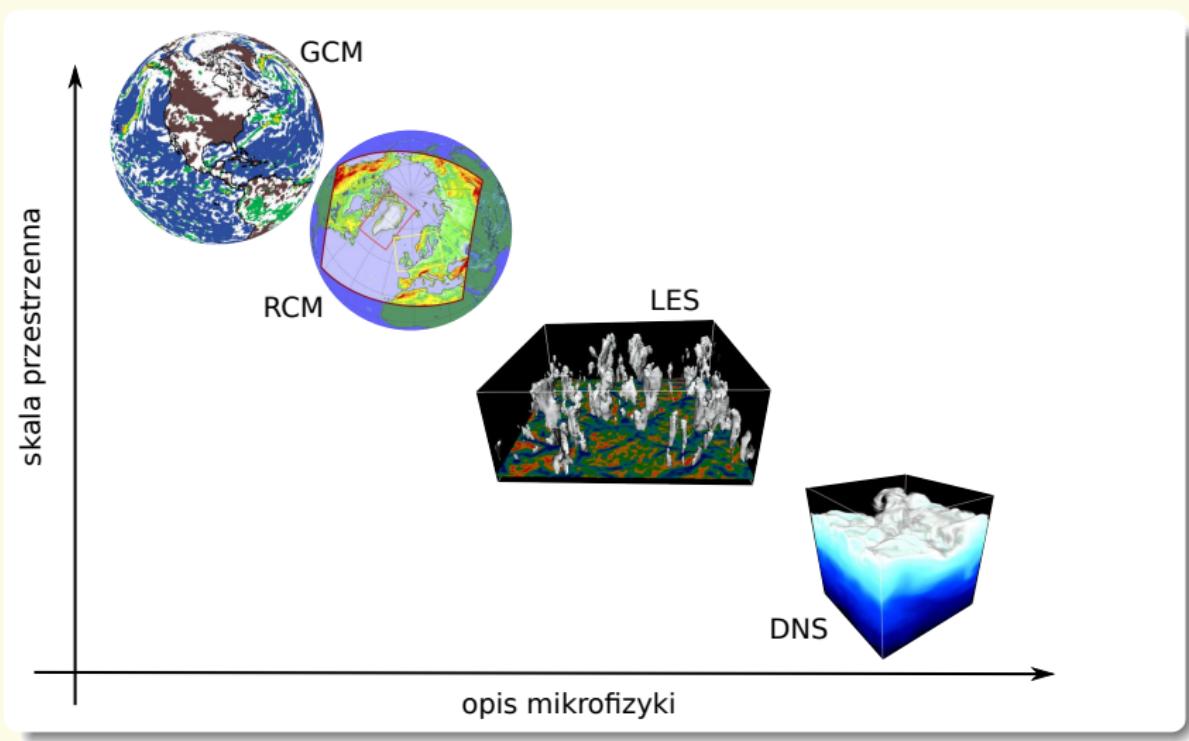
- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Modelowanie mikrofizyki chmur
- Porównanie z pomiarami

# Plan prezentacji

---

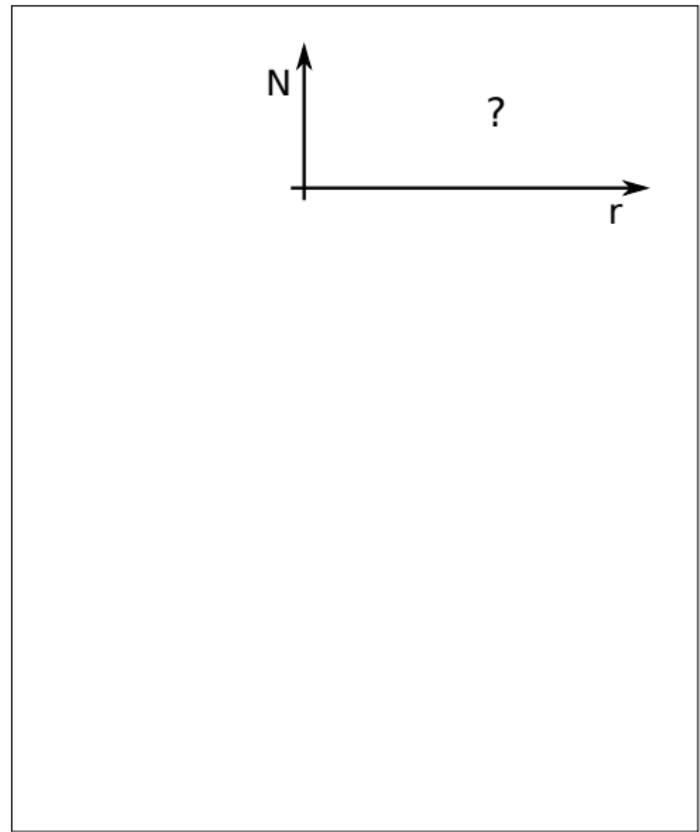
- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Modelowanie mikrofizyki chmur
- Porównanie z pomiarami

# Reprezentacja mikrofizyki a skala modeli



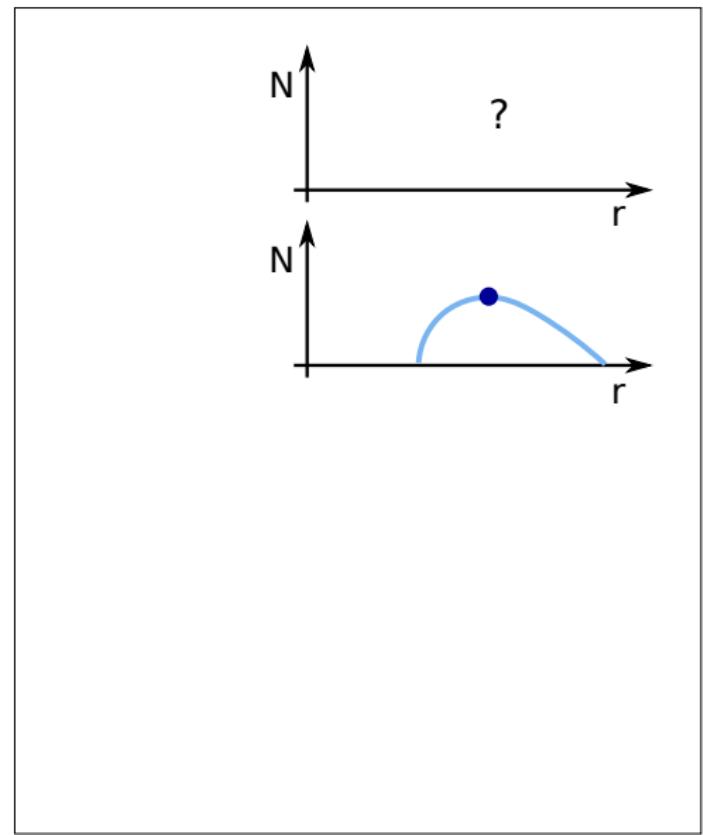
# Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

- ▶ opis zgrubny  
jedno-momentowy (bulk)



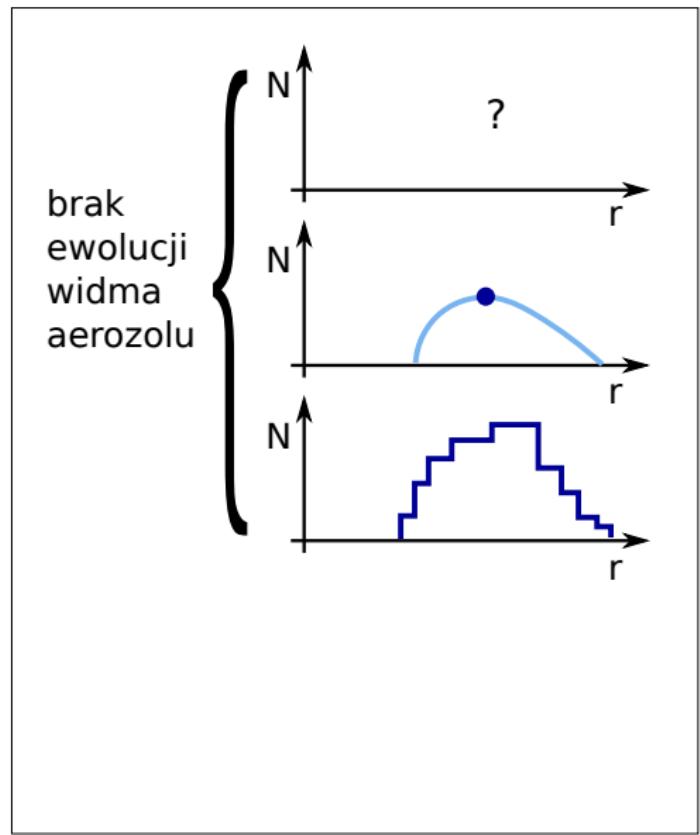
## Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

- ▶ opis zgrubny  
jedno-momentowy (bulk)
- ▶ opis zgrubny  
wielo-momentowy



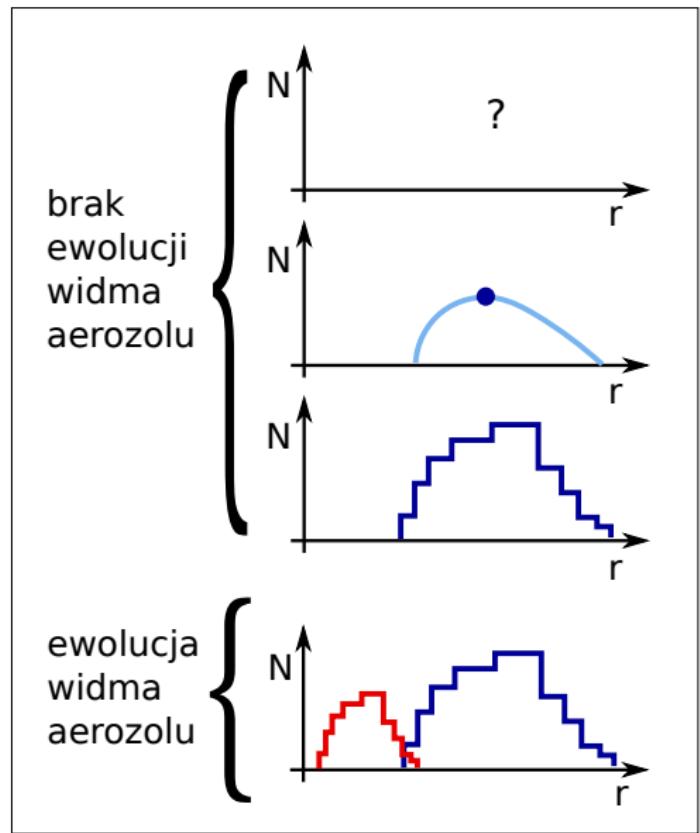
# Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

- ▶ opis zgrubny jedno-momentowy (bulk)
- ▶ opis zgrubny wielo-momentowy
- ▶ opis widmowy jednowymiarowy (bin)



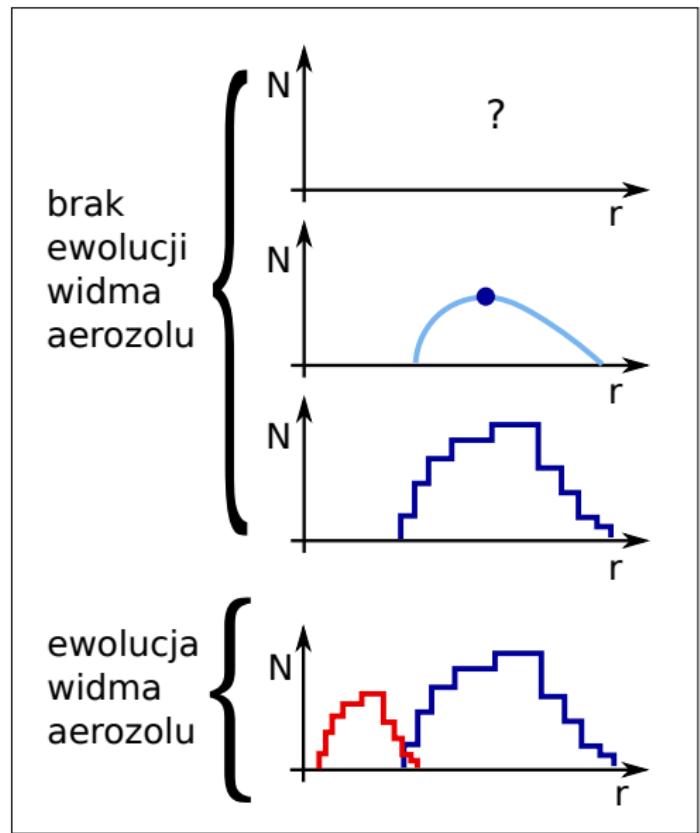
# Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

- ▶ opis zgrubny jedno-momentowy (bulk)
- ▶ opis zgrubny wielo-momentowy
- ▶ opis widmowy jednowymiarowy (bin)
- ▶ opis widmowy wielowymiarowy
  - ▶ realizacja Eulerowska
  - ▶ realizacja Lagranżowska

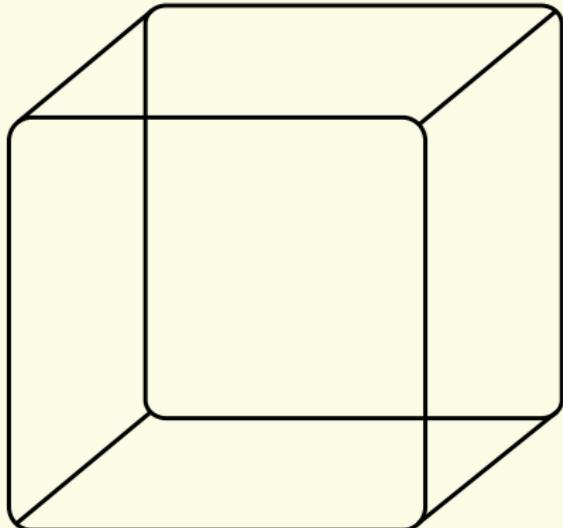


# Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

- ▶ opis zgrubny jedno-momentowy (bulk)
- ▶ opis zgrubny wielo-momentowy
- ▶ opis widmowy jednowymiarowy (bin)
- ▶ opis widmowy wielowymiarowy
  - ▶ realizacja Eulerowska
  - ▶ **realizacja Lagranżowska**

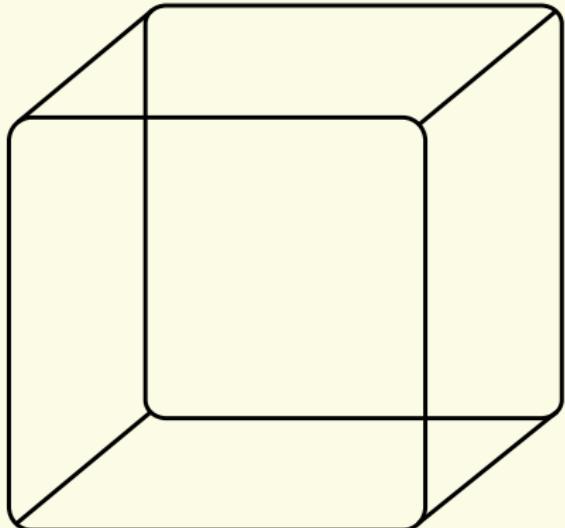


# Lagranżowski opis mikrofizyki



W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

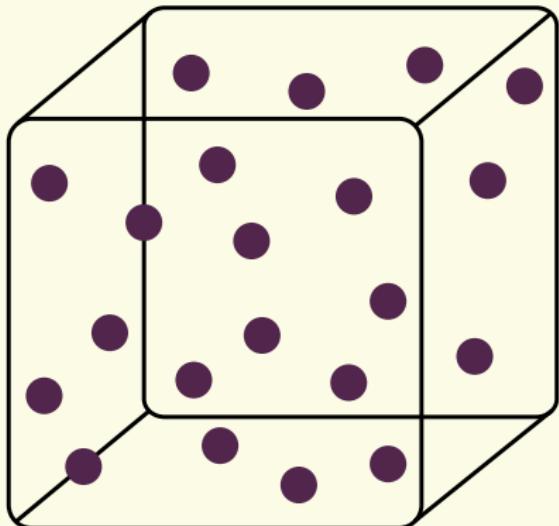
# Lagranżowski opis mikrofizyki



W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

# Lagranżowski opis mikrofizyki

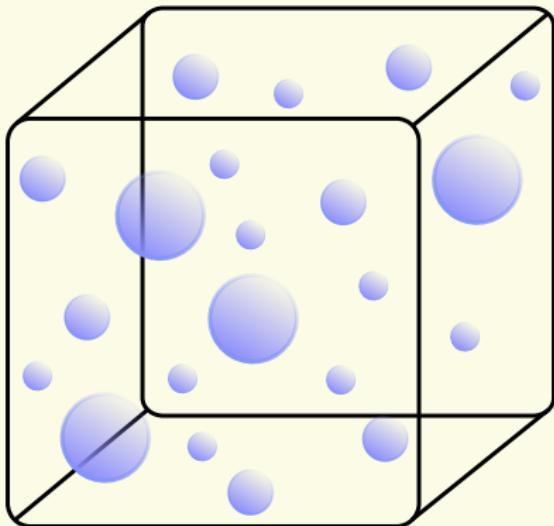


W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie

# Lagranżowski opis mikrofizyki

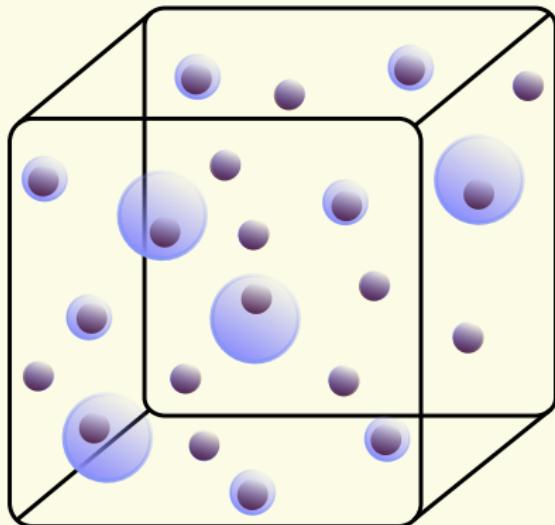


W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie
- ▶ promień mokry

# Lagranżowski opis mikrofizyki

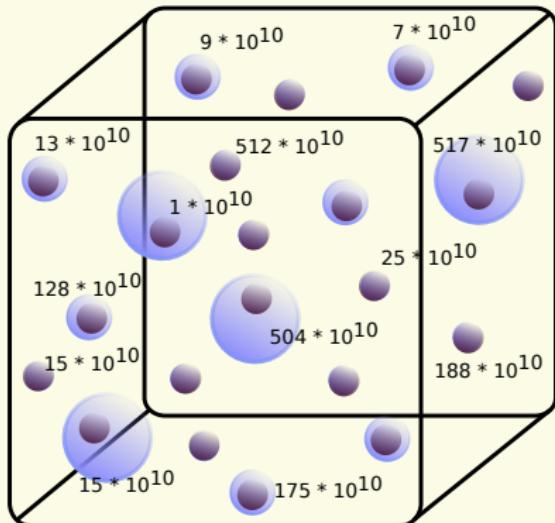


W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie
- ▶ promień mokry
- ▶ promień suchy

# Lagranżowski opis mikrofizyki

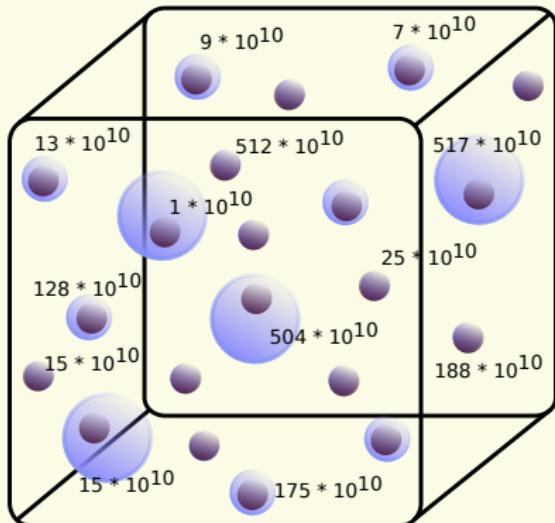


W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie
- ▶ promień mokry
- ▶ promień suchy
- ▶ krotność

# Lagranżowski opis mikrofizyki

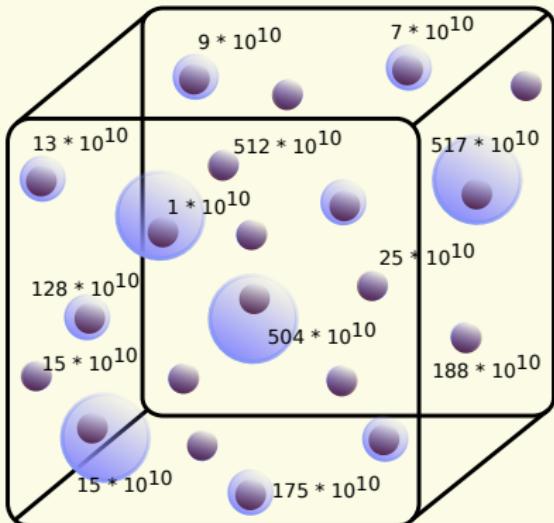


W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie
- ▶ promień mokry
- ▶ promień suchy
- ▶ krotność
- ▶ ...

# Lagranżowski opis mikrofizyki



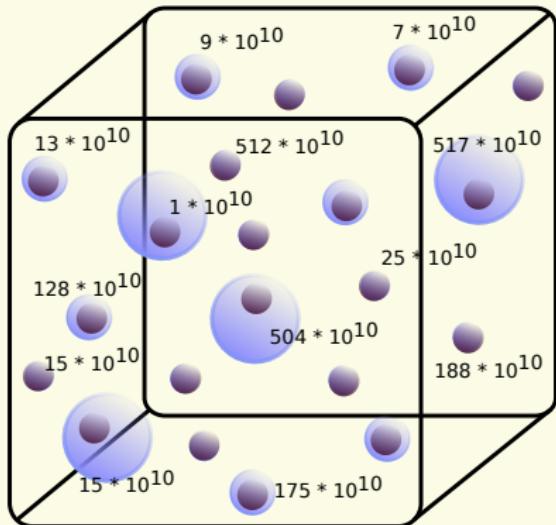
W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie
- ▶ promień mokry
- ▶ promień suchy
- ▶ krotność
- ▶ ...

Łatwość dodawania kolejnych atrybutów

# Lagranżowski opis mikrofizyki



W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie
- ▶ promień mokry
- ▶ promień suchy
- ▶ krotność
- ▶ ...

Łatwość dodawania kolejnych atrybutów (ważne przy opisie reakcji chemicznych zachodzących w kropelkach)

# Lagranżowski opis $\mu$ -fizyki a dynamika płynu

Euler. / PDE

Lagr. / ODE

# Lagranżowski opis $\mu$ -fizyki a dynamika płynu

Euler. / PDE	Lagr. / ODE
adwekcja ciepła adwekcja wilgoci	transport cząstek

# Lagranżowski opis $\mu$ -fizyki a dynamika płynu

Euler. / PDE	Lagr. / ODE
adwekcja ciepła	transport cząstek
adwekcja wilgoci	wzrost kondensacyjny wzrost koagulacyjny osiadanie

# Lagranżowski opis $\mu$ -fizyki a dynamika płynu

Euler. / PDE	Lagr. / ODE
adwekcja ciepła adwekcja wilgoci	transport cząstek wzrost kondensacyjny wzrost koagulacyjny osiadanie
$\partial_t(\rho_d r) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho_d r) = \rho_d \dot{r}$ $\partial_t(\rho_d \theta) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho_d \theta) = \rho_d \dot{\theta}$	$\dot{r} = \sum_{cząstki \in \Delta V} \dots$ $\dot{\theta} = \sum_{cząstki \in \Delta V} \dots$

# Lagranżowski opis $\mu$ -fizyki a dynamika płynu

Euler. / PDE	Lagr. / ODE
adwekcja ciepła	transport cząstek
adwekcja wilgoci	wzrost kondensacyjny wzrost koagulacyjny osiadanie
$\partial_t(\rho_d r) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho_d r) = \rho_d \dot{r}$	$\dot{r} = \sum_{cząstki \in \Delta V} \dots$
$\partial_t(\rho_d \theta) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho_d \theta) = \rho_d \dot{\theta}$	$\dot{\theta} = \sum_{cząstki \in \Delta V} \dots$
adwekcja gazów śladowych	reakcje chemiczne w kroplach
...	...

## Lagranżowski opis $\mu$ -fizyki a koagulacja (Shima et al. 2009)

- dla  $n$  "super kropelek" w objętości  $\Delta V$  w czasie  $\Delta t$

## Lagranżowski opis $\mu$ -fizyki a koagulacja (Shima et al. 2009)

- ▶ dla  $n$  “super kropelek” w objętości  $\Delta V$  w czasie  $\Delta t$
- ▶ każdej reprezentującej  $\xi$  cząstek (aerozolu/chmury/opadu)

## Lagranżowski opis $\mu$ -fizyki a koagulacja (Shima et al. 2009)

- ▶ dla  $n$  "super kropelek" w objętości  $\Delta V$  w czasie  $\Delta t$
- ▶ każdej reprezentującej  $\xi$  cząstek (aerozolu/chmury/opadu)
- ▶ prawdopodobieństwo zderzenia i-tej i j-tej super-kropelki:

$$P_{ij} = \max(\xi_i, \xi_j) \cdot E(r_i, r_j) \cdot \pi(r_i + r_j)^2 \cdot |v_i - v_j| \cdot \frac{\Delta t}{\Delta V}$$

gdzie  $r$  – promień kropli,  $E(r_i, r_j)$  – wsp. wychwytu,  $v$  – prędkości kropel

## Lagranżowski opis $\mu$ -fizyki a koagulacja (Shima et al. 2009)

- ▶ dla  $n$  "super kropelek" w objętości  $\Delta V$  w czasie  $\Delta t$
- ▶ każdej reprezentującej  $\xi$  cząstek (aerozolu/chmury/opadu)
- ▶ prawdopodobieństwo zderzenia i-tej i j-tej super-kropelki:

$$P_{ij} = \max(\xi_i, \xi_j) \cdot E(r_i, r_j) \cdot \pi(r_i + r_j)^2 \cdot |v_i - v_j| \cdot \frac{\Delta t}{\Delta V}$$

gdzie  $r$  – promień kropli,  $E(r_i, r_j)$  – wsp. wychwytu,  $v$  – prędkości kropel

- ▶ dwie (spójne) możliwości reprezentacji zderzeń w symulacji Monte-Carlo:
  - ▶ część z  $\xi$  cząstek (określona przez  $P_{ij}$ ) zderza i łączy się co  $\Delta t$
  - ▶  $\min(\xi_i, \xi_j)$  kropel zdarza się i łączy raz na wiele (określone przez  $P_{ij}$ )  $\Delta t$   
→ stała liczba super-kropelek (reprezentacja rozmiarów po zderzeniu)!

## Lagranżowski opis $\mu$ -fizyki a koagulacja (Shima et al. 2009)

- ▶ dla  $n$  "super kropelek" w objętości  $\Delta V$  w czasie  $\Delta t$
- ▶ każdej reprezentującej  $\xi$  cząstek (aerozolu/chmury/opadu)
- ▶ prawdopodobieństwo zderzenia i-tej i j-tej super-kropelki:

$$P_{ij} = \max(\xi_i, \xi_j) \cdot E(r_i, r_j) \cdot \pi(r_i + r_j)^2 \cdot |v_i - v_j| \cdot \frac{\Delta t}{\Delta V}$$

gdzie  $r$  – promień kropli,  $E(r_i, r_j)$  – wsp. wychwytu,  $v$  – prędkości kropel

- ▶ dwie (spójne) możliwości reprezentacji zderzeń w symulacji Monte-Carlo:
  - ▶ część z  $\xi$  cząstek (określona przez  $P_{ij}$ ) zderza i łączy się co  $\Delta t$
  - ▶  $\min(\xi_i, \xi_j)$  kropel zdarza się i łączy raz na wiele (określone przez  $P_{ij}$ )  $\Delta t$   
→ stała liczba super-kropelek (reprezentacja rozmiarów po zderzeniu)!
- ▶ realizacja stochastyczna Monte-Carlo (losowanie vs.  $P_{ij}$ )

## Lagranżowski opis $\mu$ -fizyki a koagulacja (Shima et al. 2009)

- ▶ dla  $n$  "super kropelek" w objętości  $\Delta V$  w czasie  $\Delta t$
- ▶ każdej reprezentującej  $\xi$  cząstek (aerozolu/chmury/opadu)
- ▶ prawdopodobieństwo zderzenia i-tej i j-tej super-kropelki:

$$P_{ij} = \max(\xi_i, \xi_j) \cdot E(r_i, r_j) \cdot \pi(r_i + r_j)^2 \cdot |v_i - v_j| \cdot \frac{\Delta t}{\Delta V} \cdot \frac{n \cdot (n-1)}{2} / [\frac{n}{2}]$$

gdzie  $r$  – promień kropli,  $E(r_i, r_j)$  – wsp. wychwytu,  $v$  – prędkości kropel

- ▶ dwie (spójne) możliwości reprezentacji zderzeń w symulacji Monte-Carlo:
  - ▶ część z  $\xi$  cząstek (określona przez  $P_{ij}$ ) zderza i łączy się co  $\Delta t$
  - ▶  $\min(\xi_i, \xi_j)$  kropel zdarza się i łączy raz na wiele (określone przez  $P_{ij}$ )  $\Delta t$   
 $\leadsto$  stała liczba super-kropelek (reprezentacja rozmiarów po zderzeniu)!
- ▶ realizacja stochastyczna Monte-Carlo (losowanie vs.  $P_{ij}$ )
- ▶ sprawdzanie  $[n/2]$  losowych par  $(i,j)$  zamiast wszystkich par  $(i,j)$   
koszt:  $O(n^2) \leadsto O(n)$ , prawdop. skalowane przez  $\frac{n \cdot (n-1)}{2} / [\frac{n}{2}]$

## Lagranżowski opis $\mu$ -fizyki a koagulacja (Shima et al. 2009)

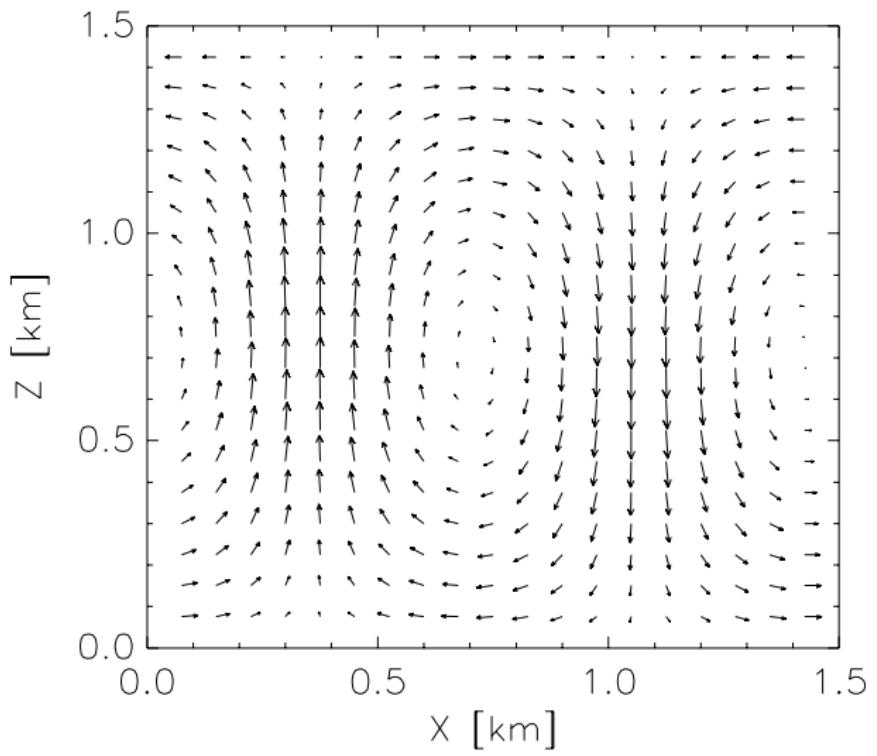
- ▶ dla  $n$  "super kropelek" w objętości  $\Delta V$  w czasie  $\Delta t$
- ▶ każdej reprezentującej  $\xi$  cząstek (aerozolu/chmury/opadu)
- ▶ prawdopodobieństwo zderzenia i-tej i j-tej super-kropelki:

$$P_{ij} = \max(\xi_i, \xi_j) \cdot E(r_i, r_j) \cdot \pi(r_i + r_j)^2 \cdot |v_i - v_j| \cdot \frac{\Delta t}{\Delta V} \cdot \frac{n \cdot (n-1)}{2} / [\frac{n}{2}]$$

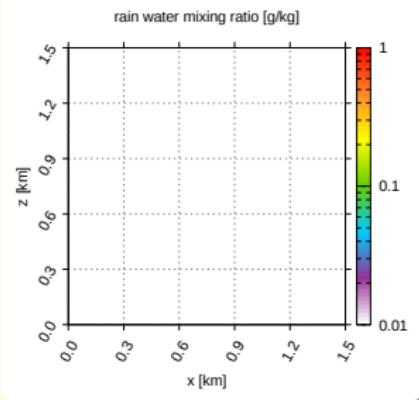
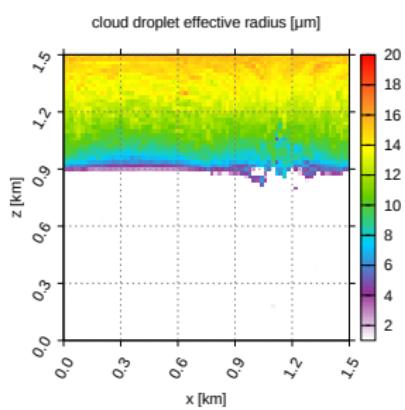
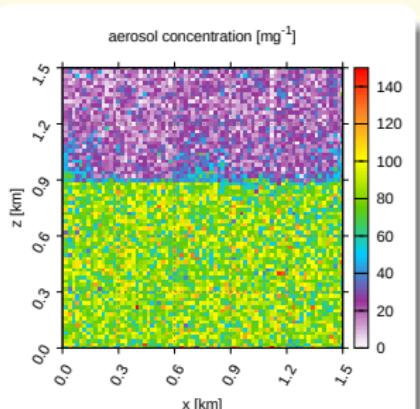
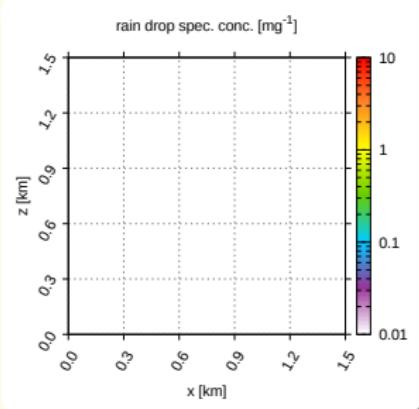
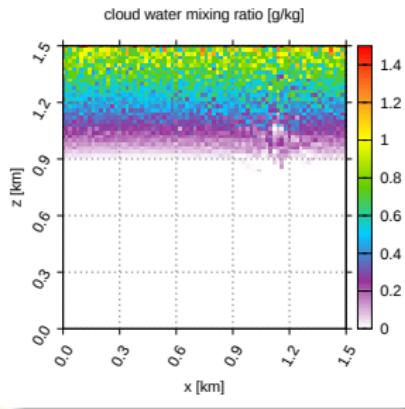
gdzie  $r$  – promień kropli,  $E(r_i, r_j)$  – wsp. wychwytu,  $v$  – prędkości kropel

- ▶ dwie (spójne) możliwości reprezentacji zderzeń w symulacji Monte-Carlo:
  - ▶ część z  $\xi$  cząstek (określona przez  $P_{ij}$ ) zderza i łączy się co  $\Delta t$
  - ▶  $\min(\xi_i, \xi_j)$  kropel zdarza się i łączy raz na wiele (określone przez  $P_{ij}$ )  $\Delta t$   
 $\leadsto$  stała liczba super-kropelek (reprezentacja rozmiarów po zderzeniu)!
- ▶ realizacja stochastyczna Monte-Carlo (losowanie vs.  $P_{ij}$ )
- ▶ sprawdzanie  $[n/2]$  losowych par (i,j) zamiast wszystkich par (i,j)  
koszt:  $O(n^2) \leadsto O(n)$ , prawdop. skalowane przez  $\frac{n \cdot (n-1)}{2} / [\frac{n}{2}]$
- ▶ alternatywa Eulerowska (i nie stochastyczna): równanie Smoluchowskiego

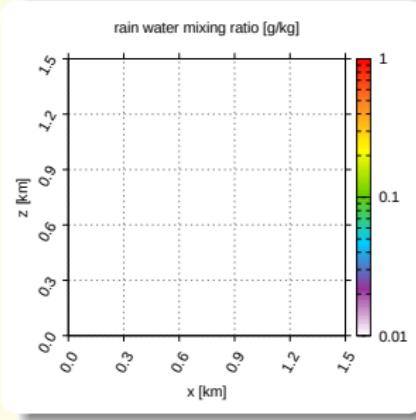
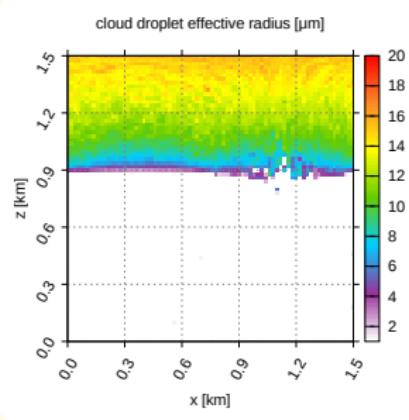
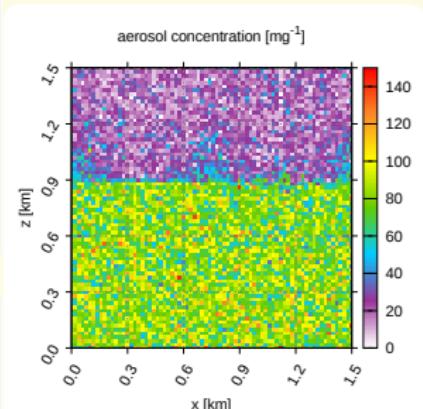
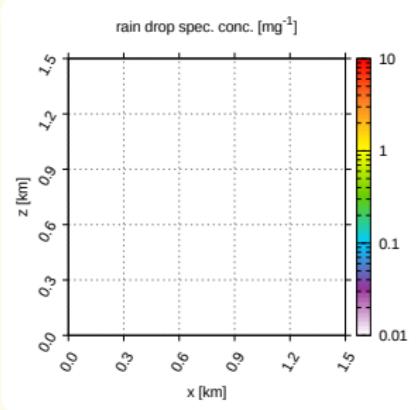
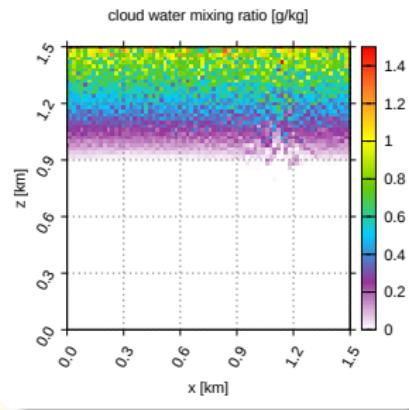
## przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



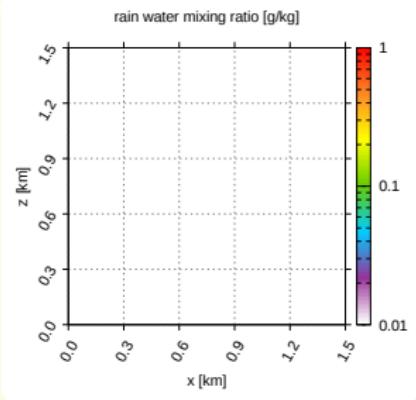
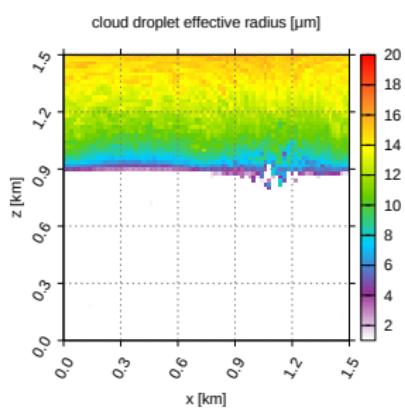
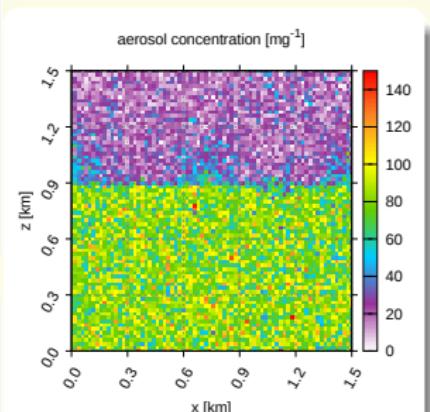
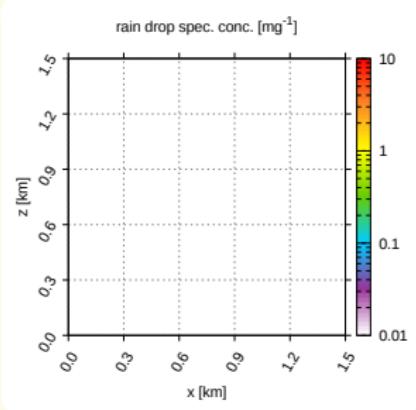
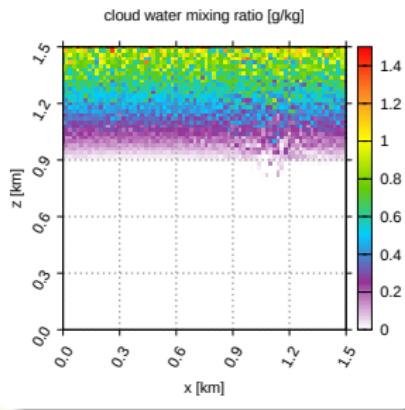
# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



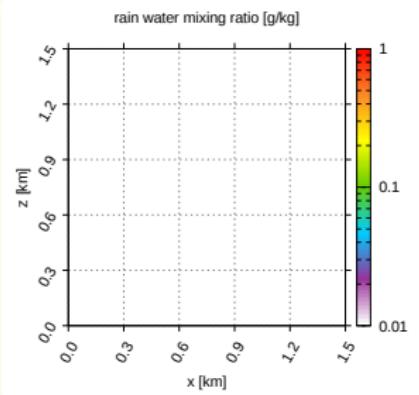
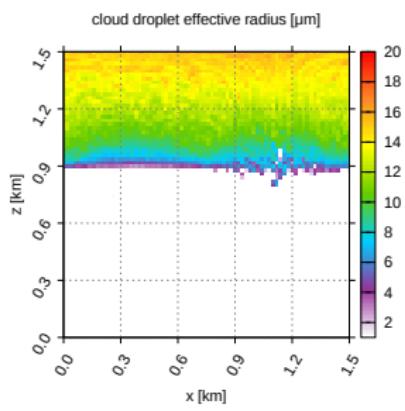
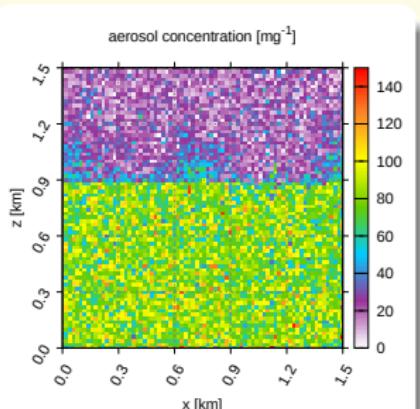
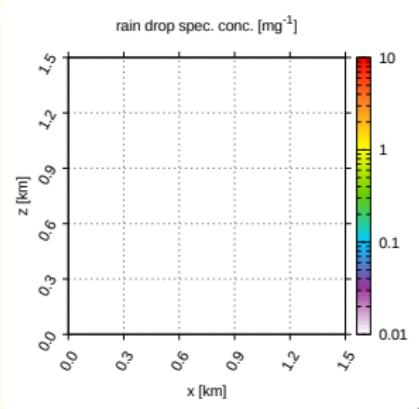
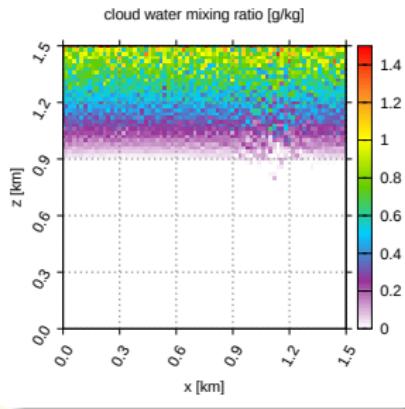
# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



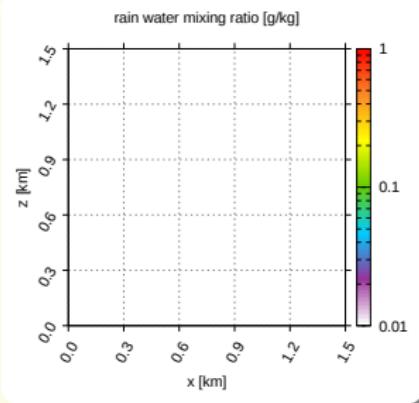
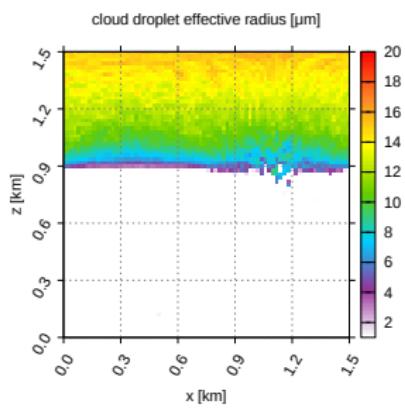
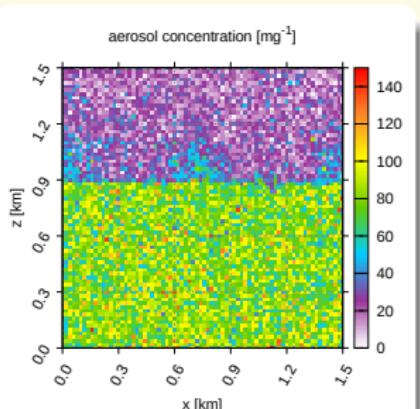
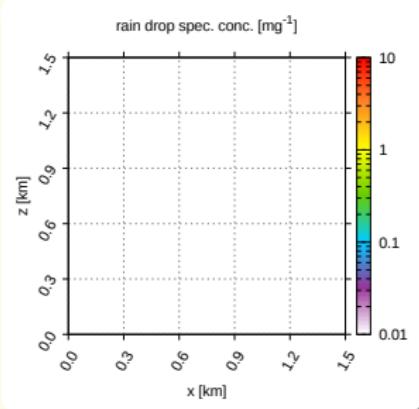
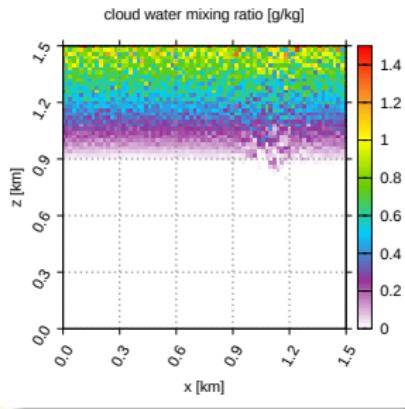
# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



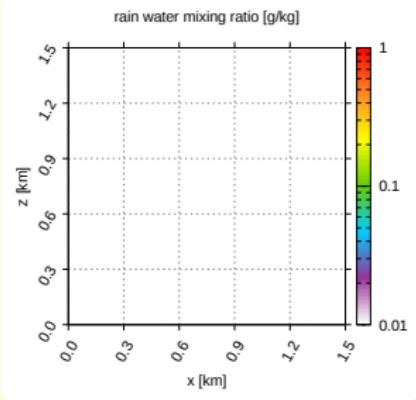
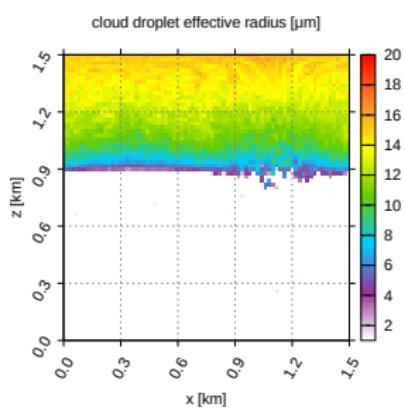
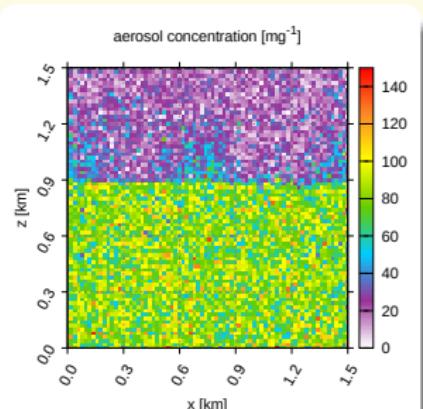
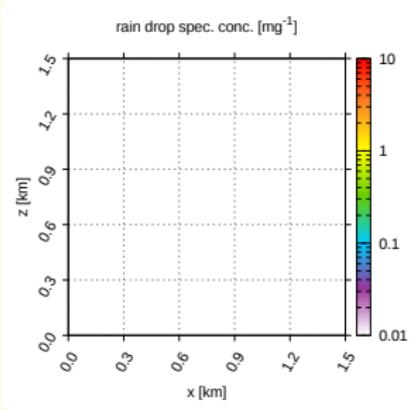
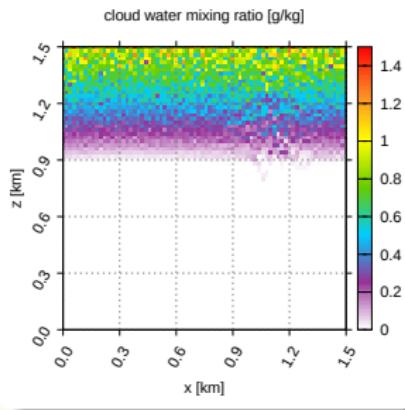
# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



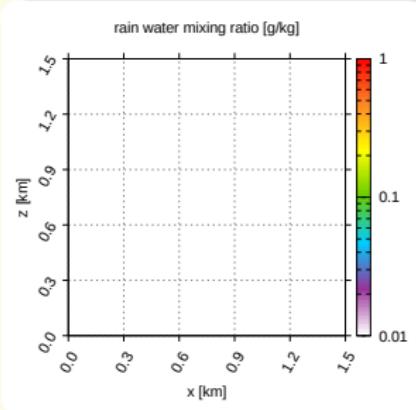
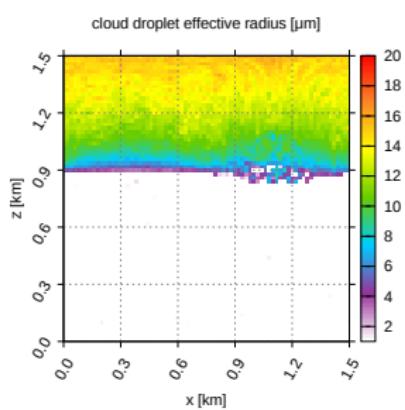
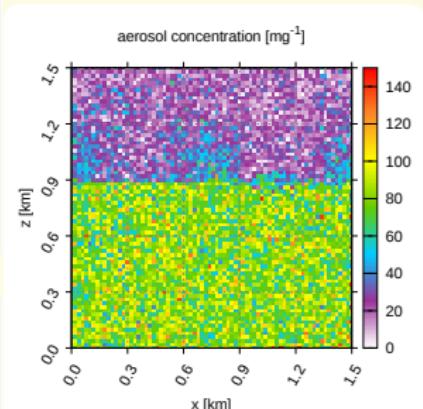
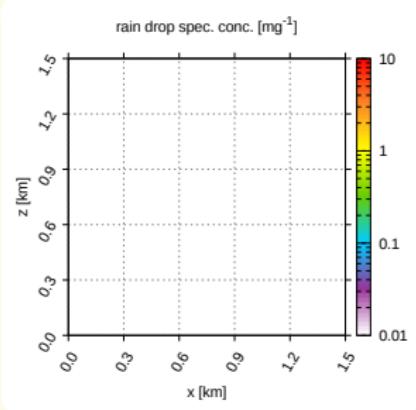
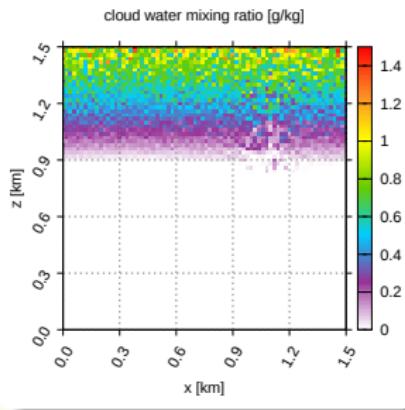
# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



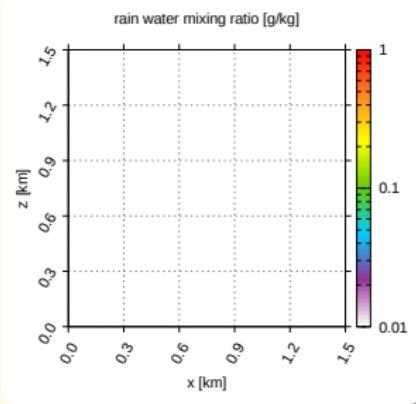
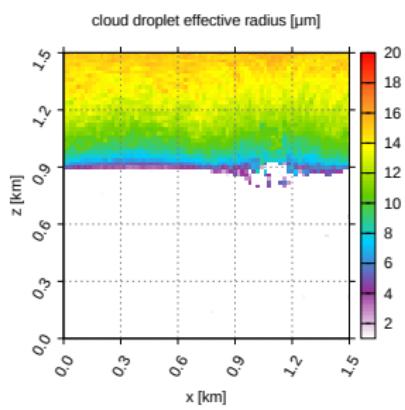
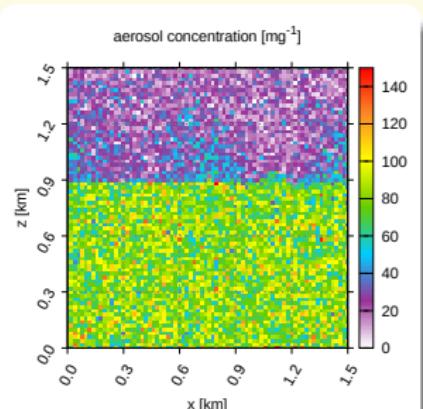
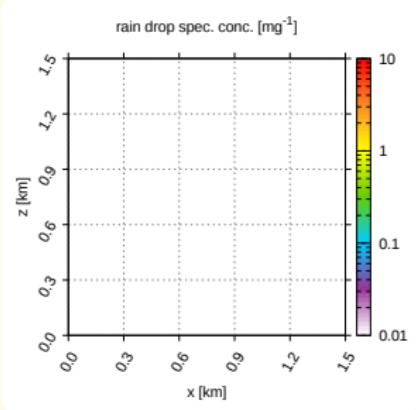
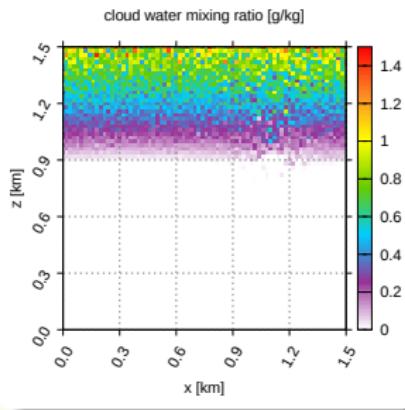
# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)

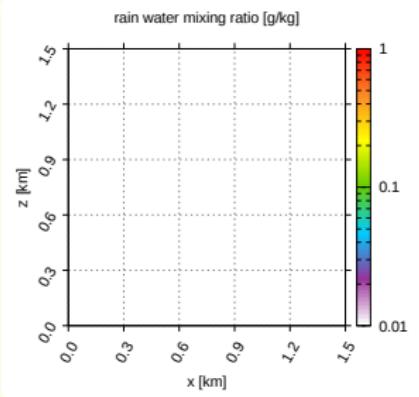
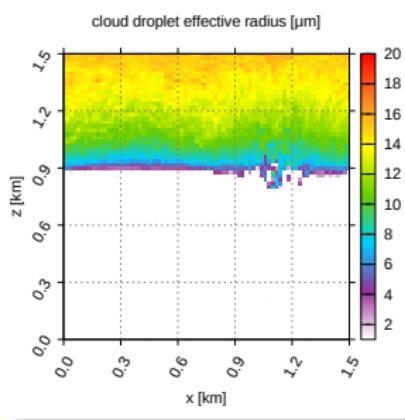
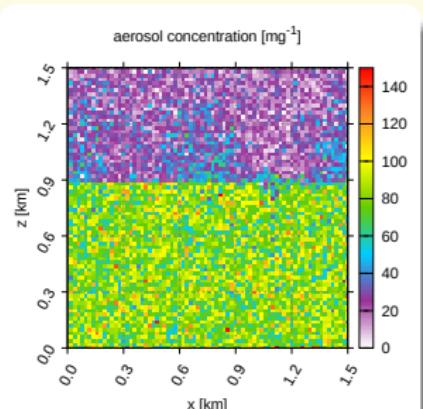
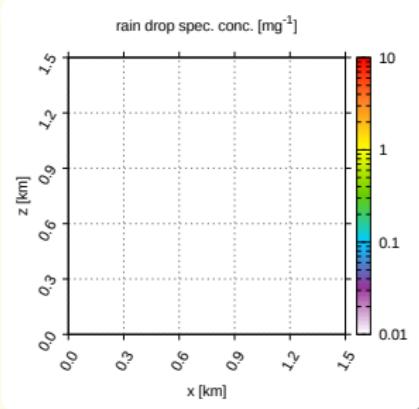
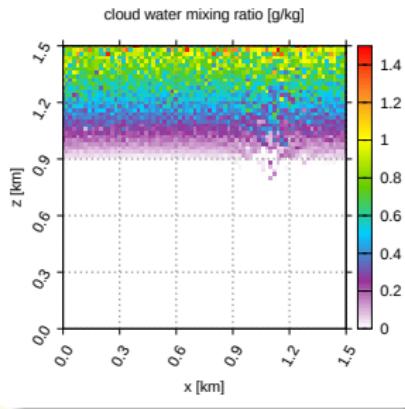


# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)

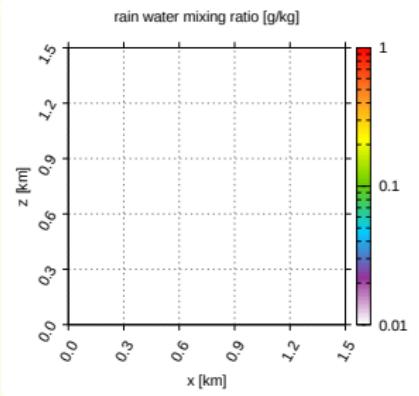
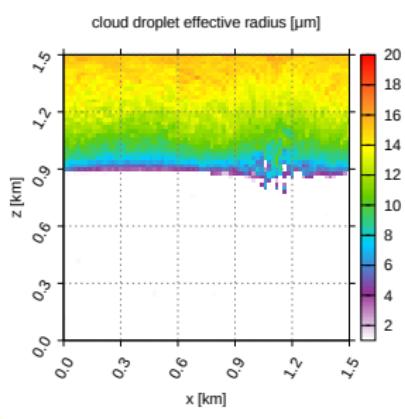
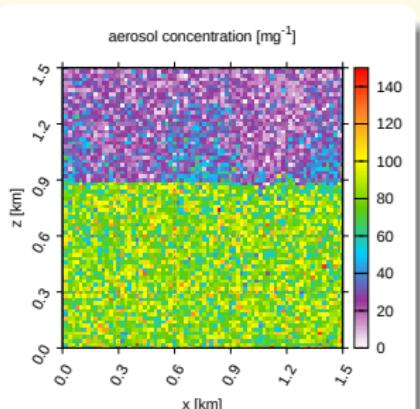
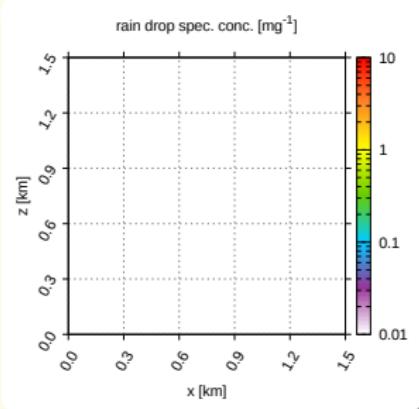
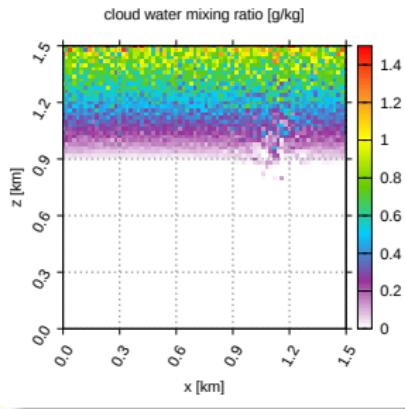


# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)

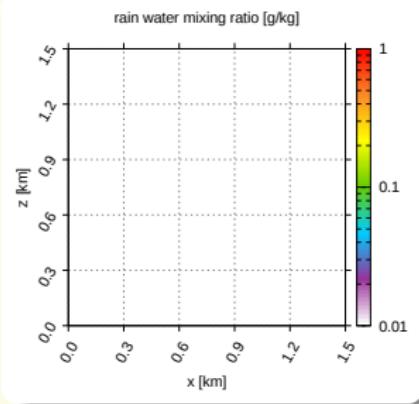
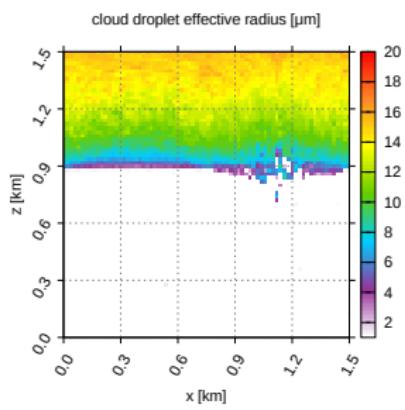
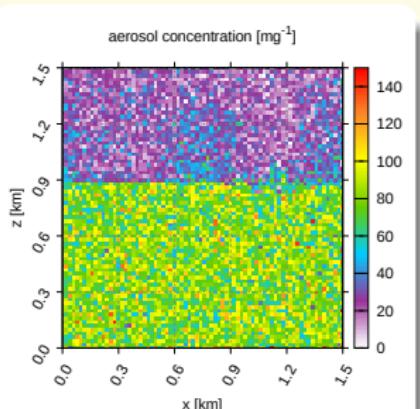
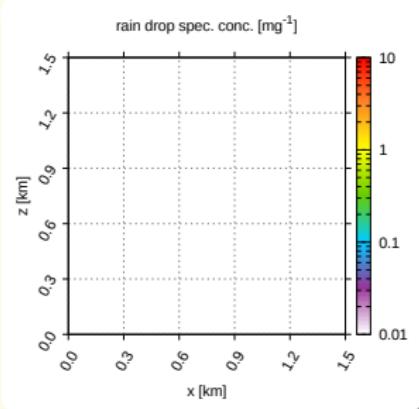
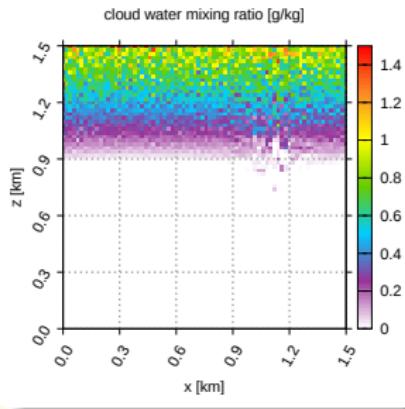
---



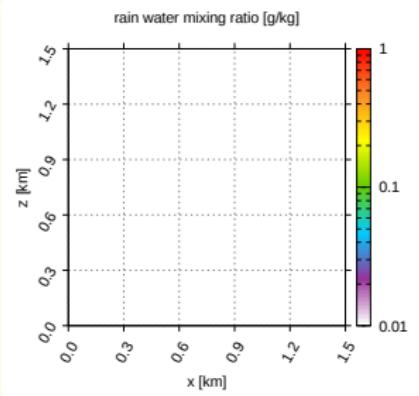
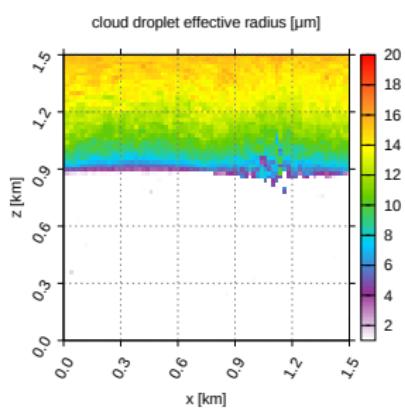
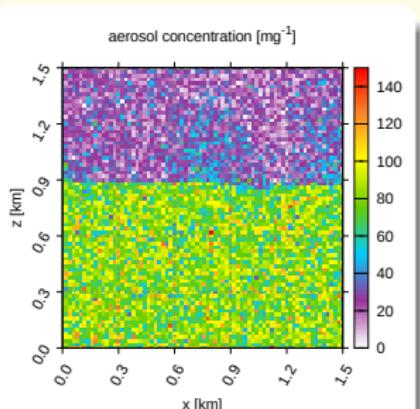
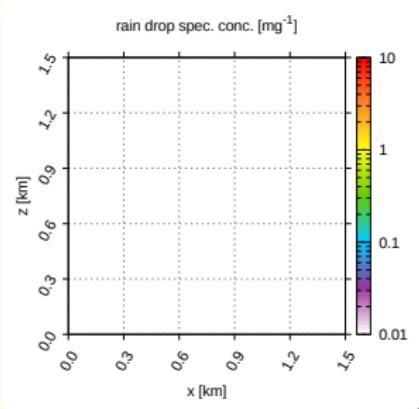
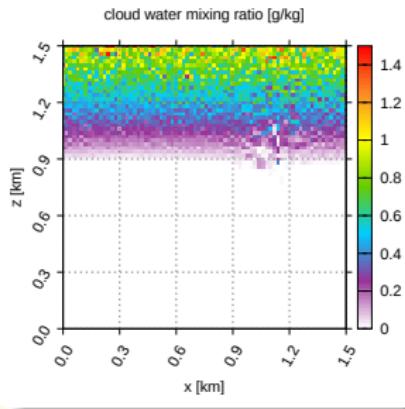
# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



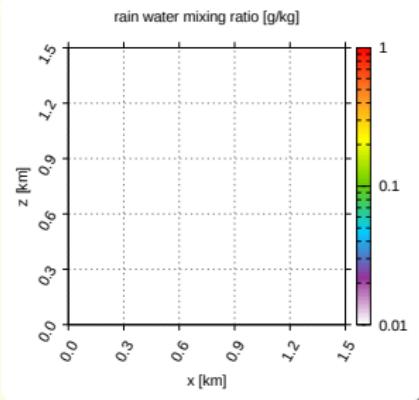
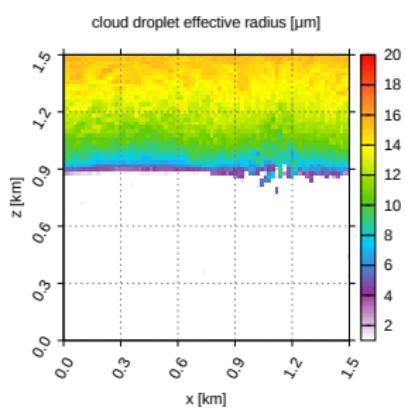
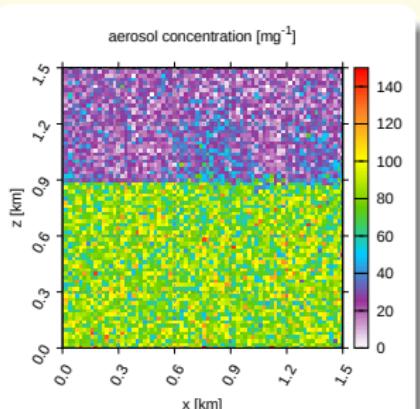
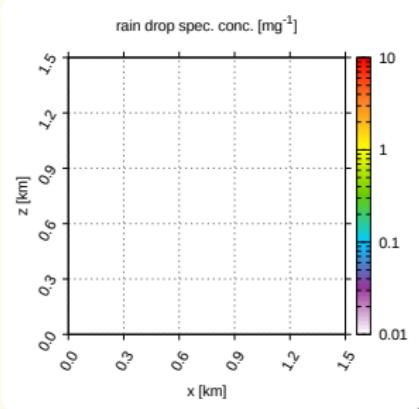
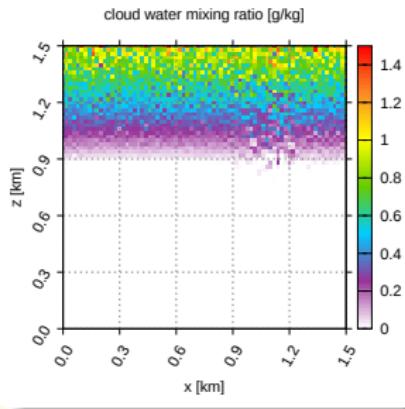
# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



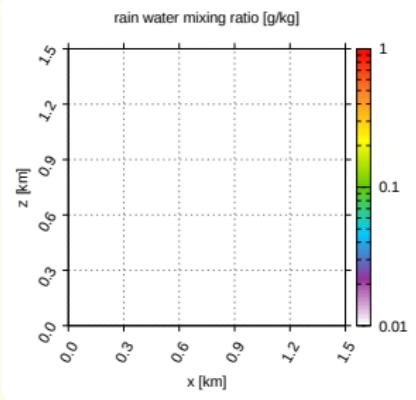
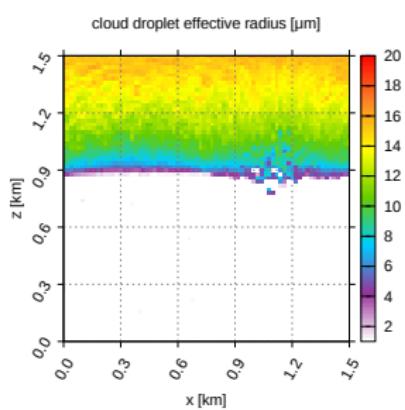
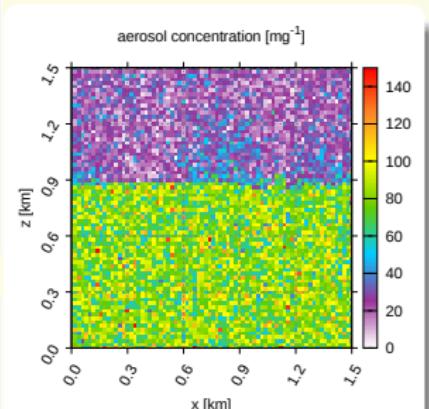
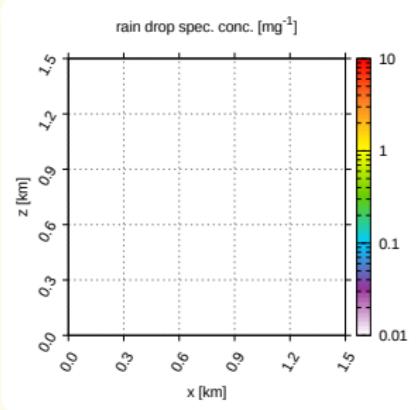
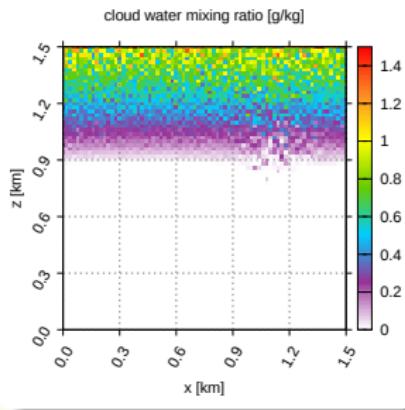
# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)

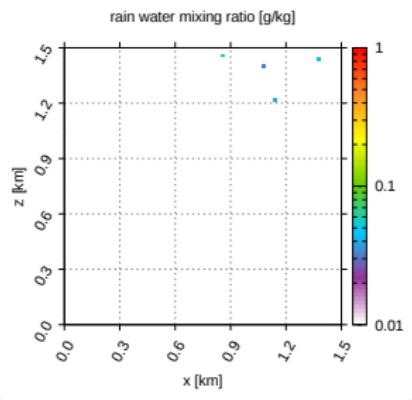
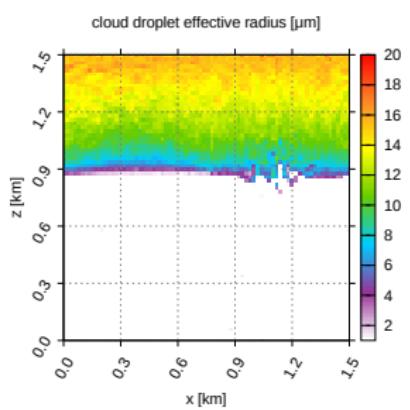
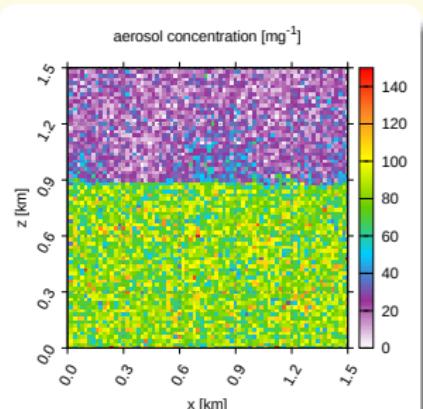
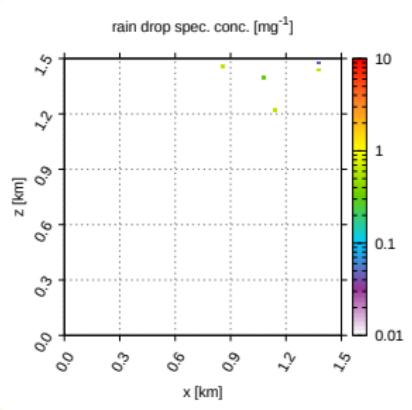
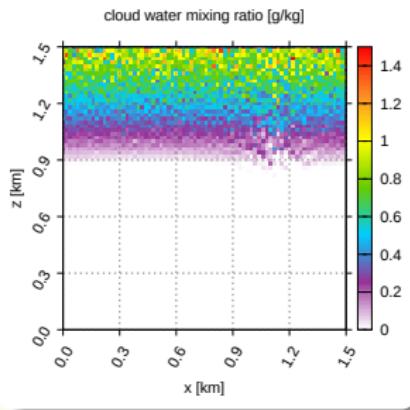


# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)

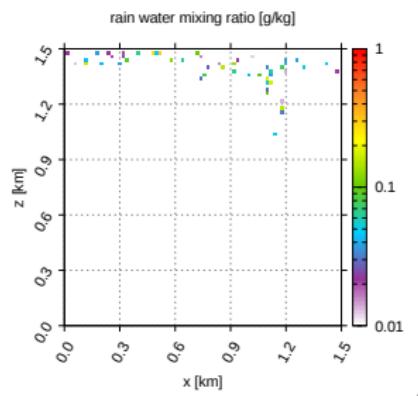
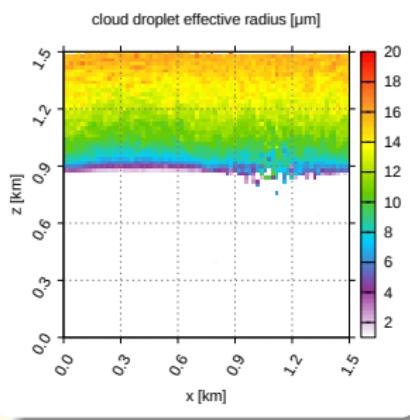
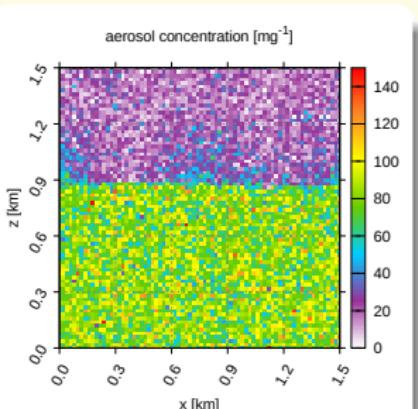
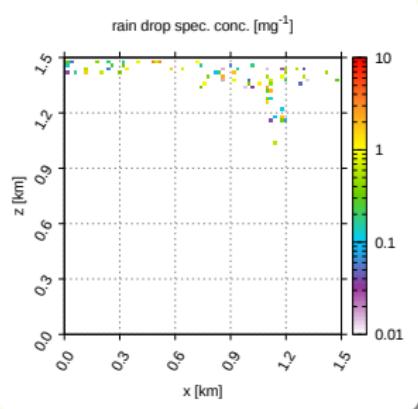
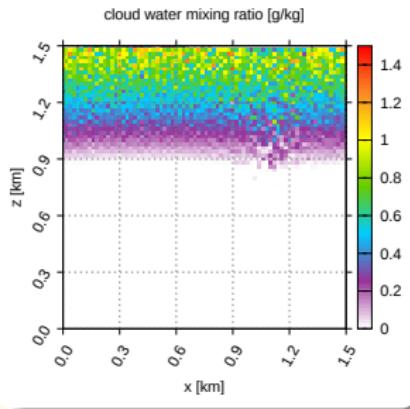


# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)

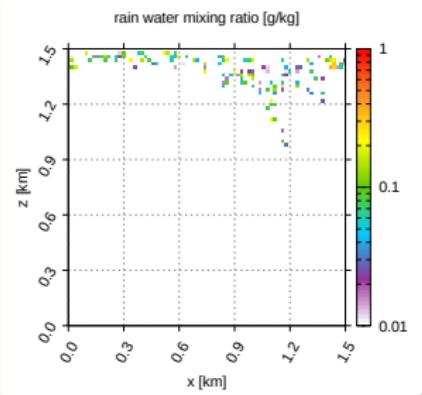
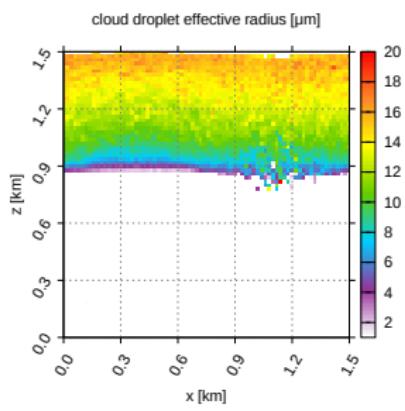
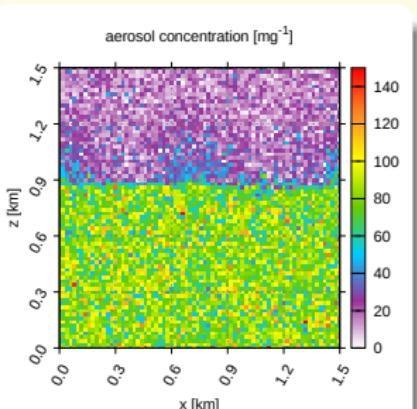
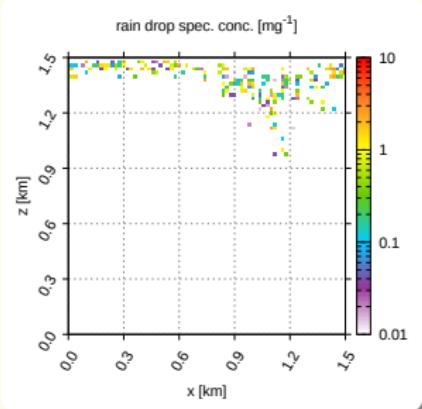
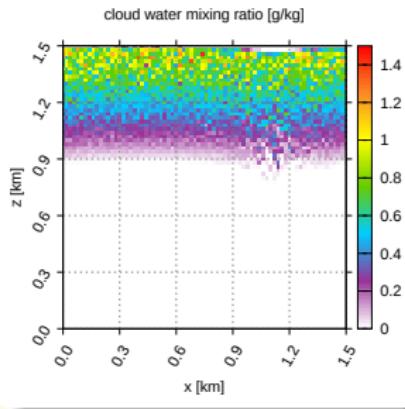
xxx



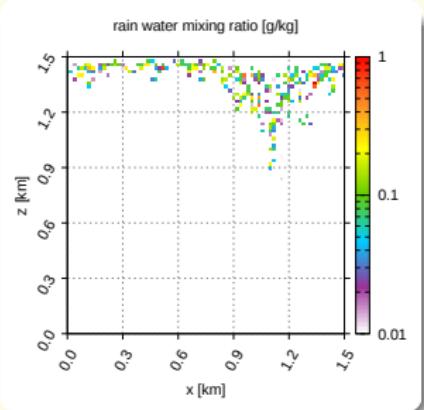
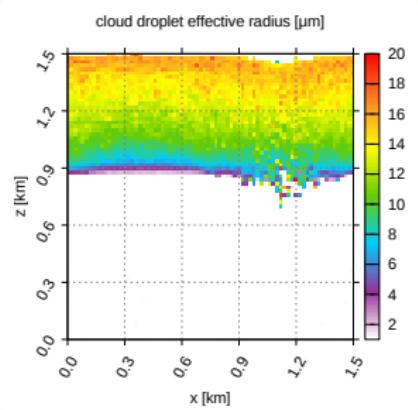
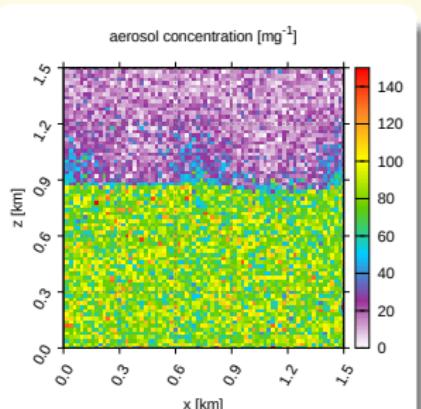
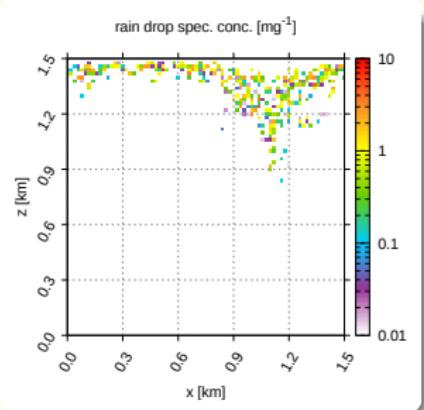
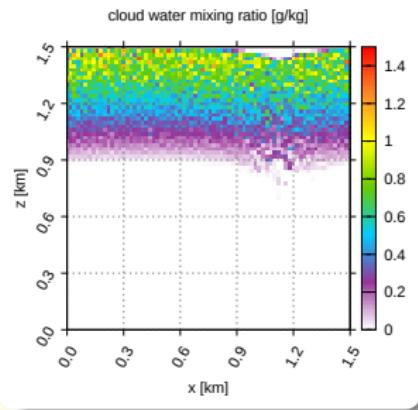
# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



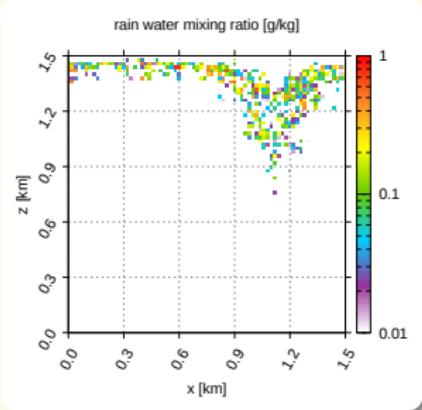
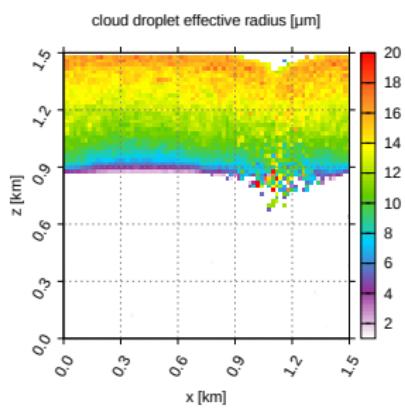
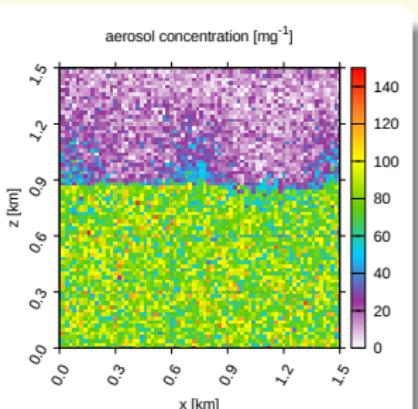
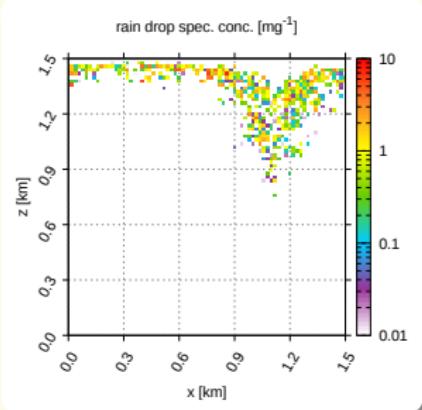
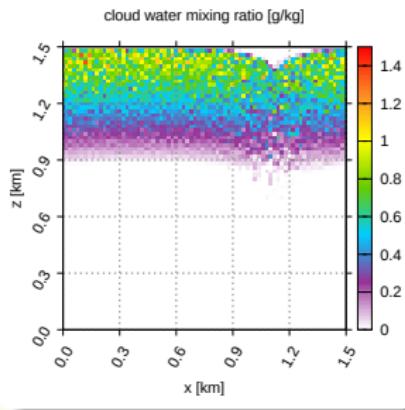
# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



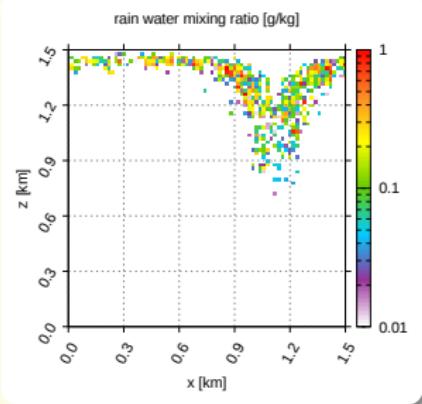
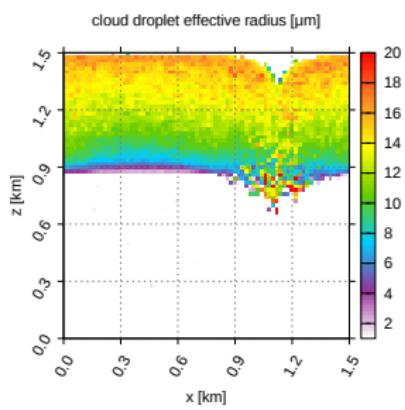
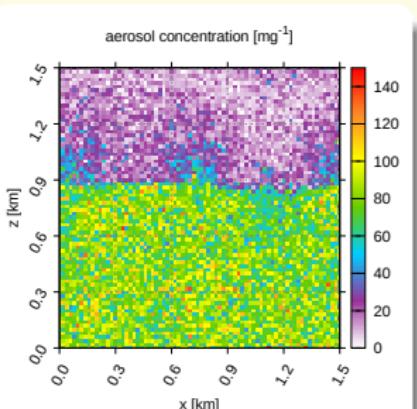
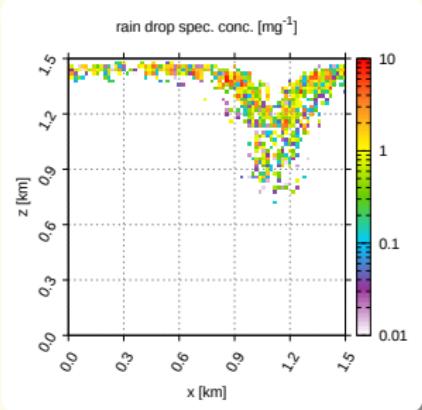
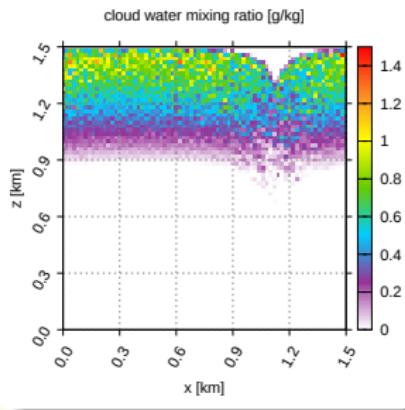
# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



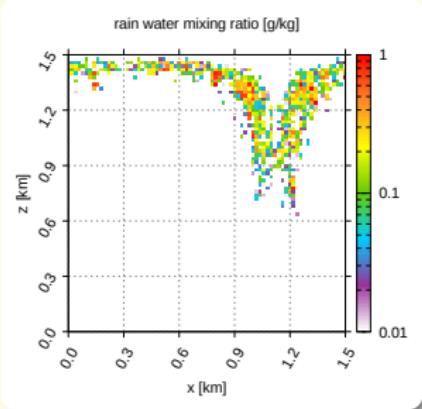
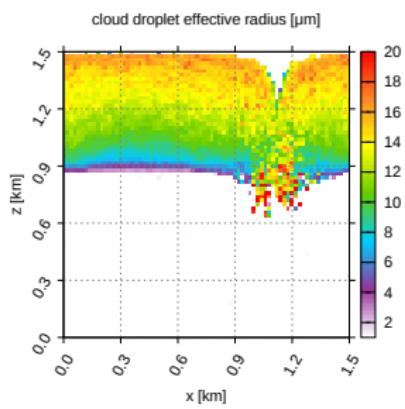
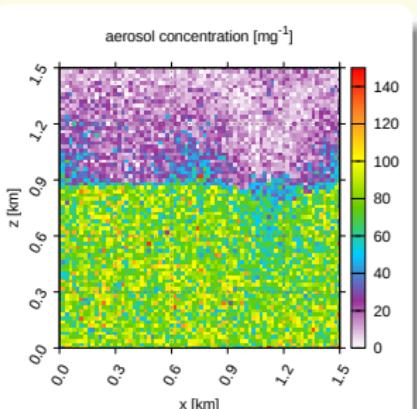
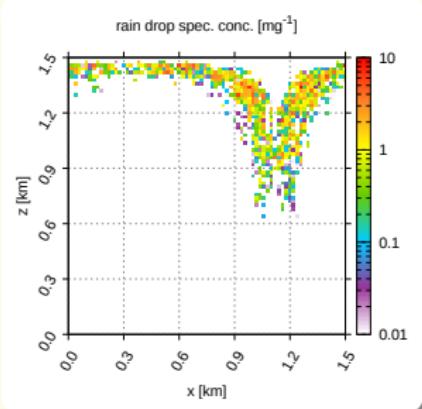
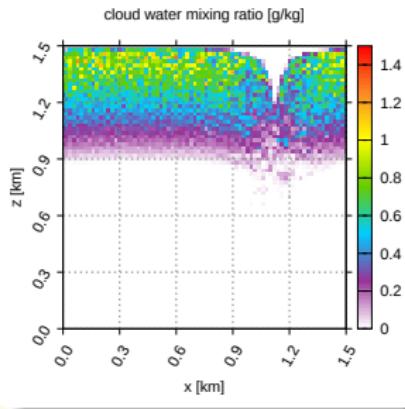
# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



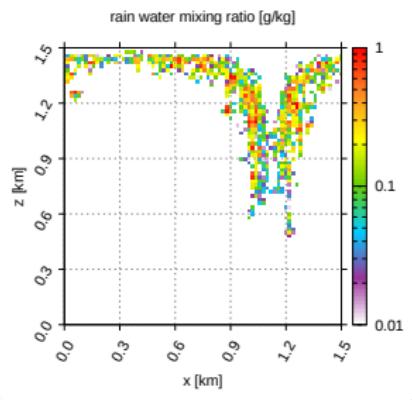
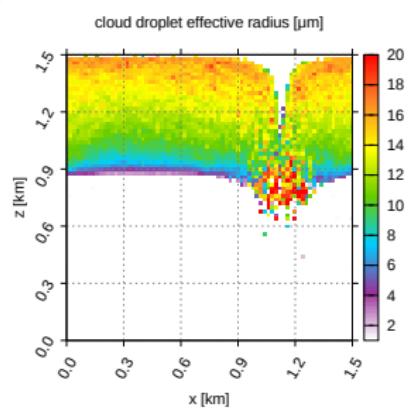
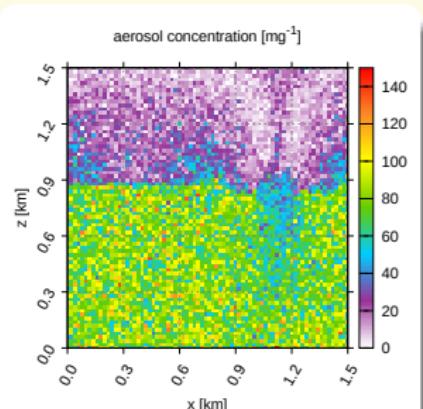
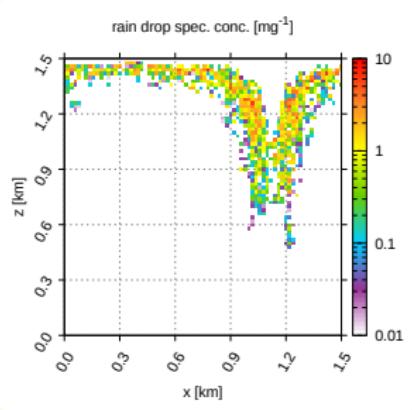
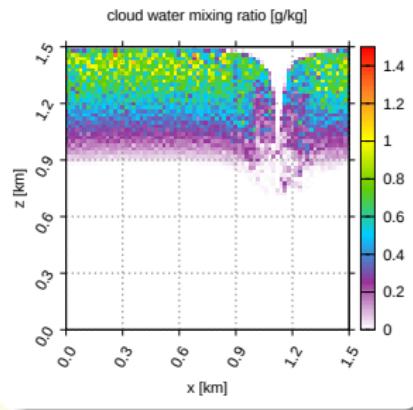
# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)

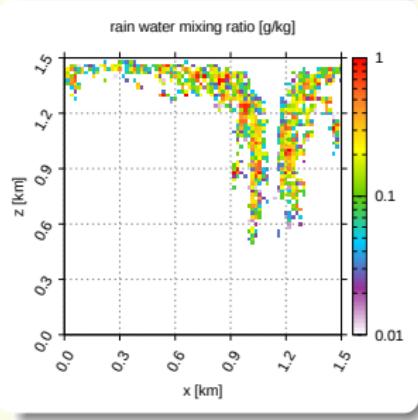
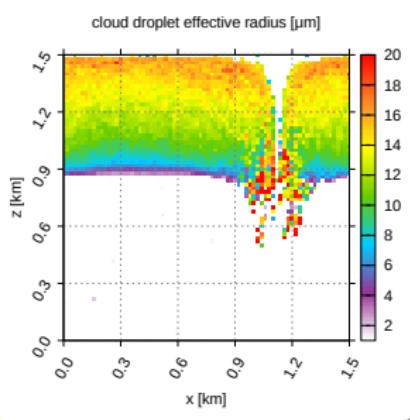
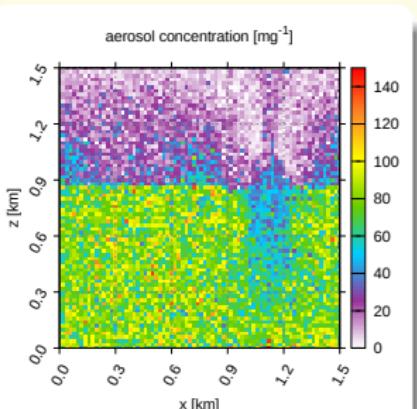
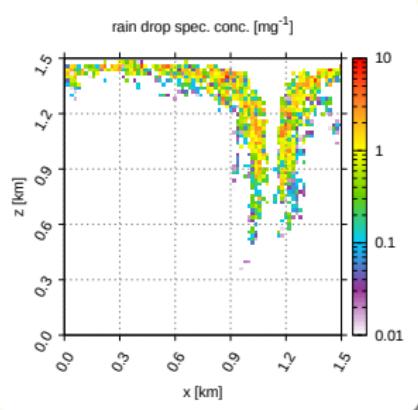
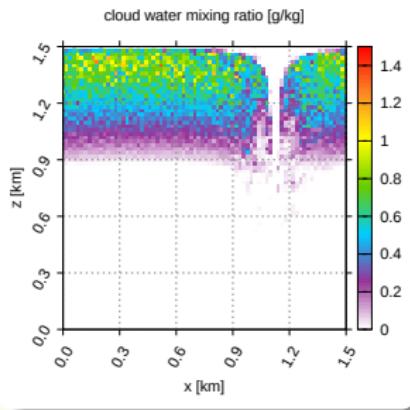


# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)

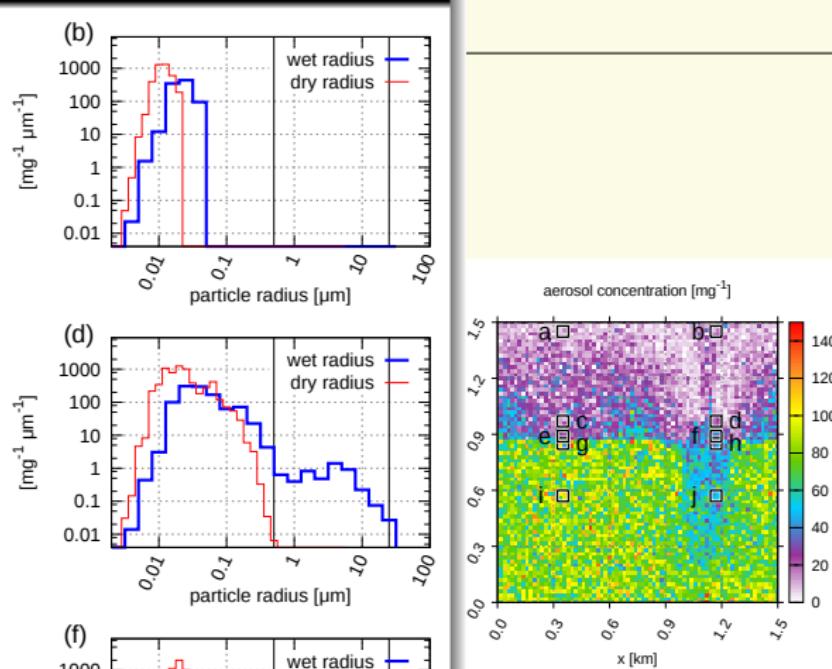
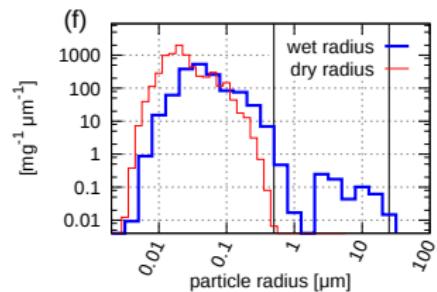
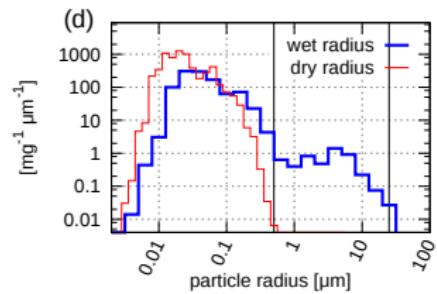
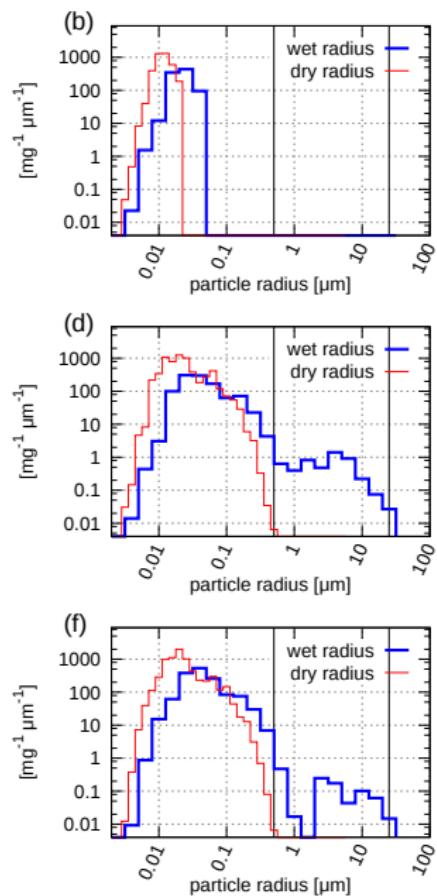
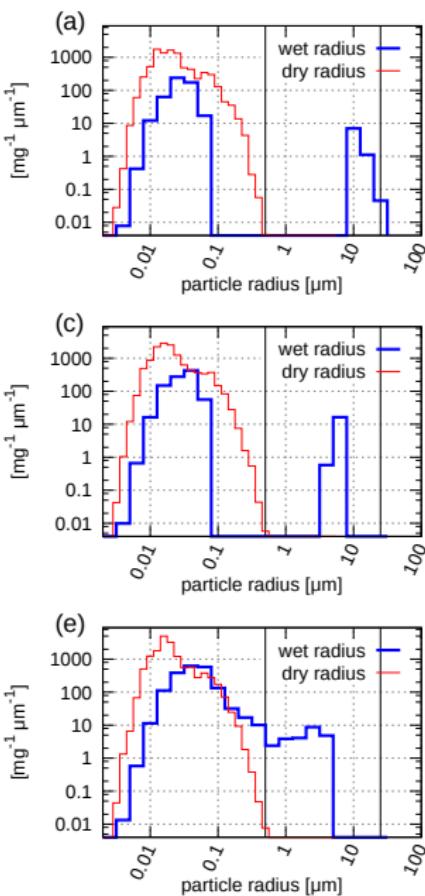


# przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)

xxoooo



# widma rozmiarów cząstek



# Plan prezentacji

---

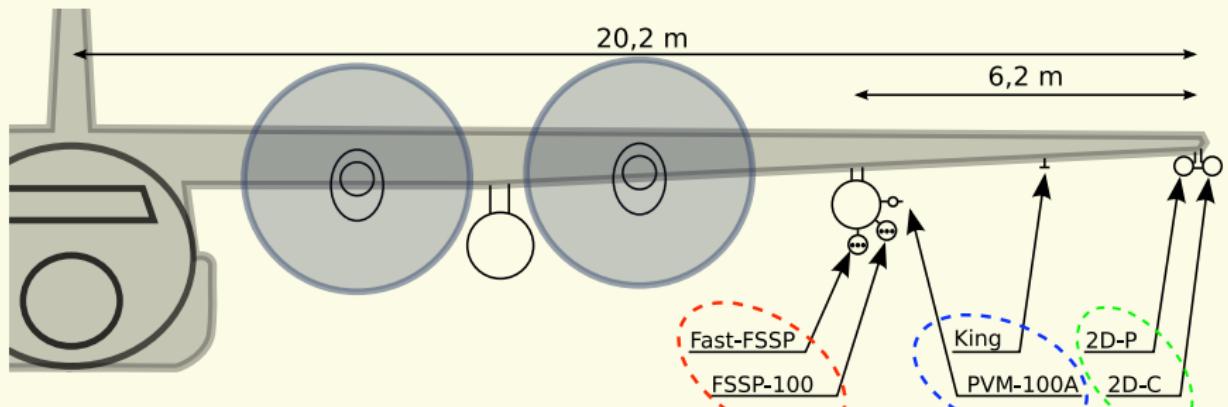
- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Modelowanie mikrofizyki chmur
- Porównanie z pomiarami

# Plan prezentacji

---

- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Modelowanie mikrofizyki chmur
- Porównanie z pomiarami

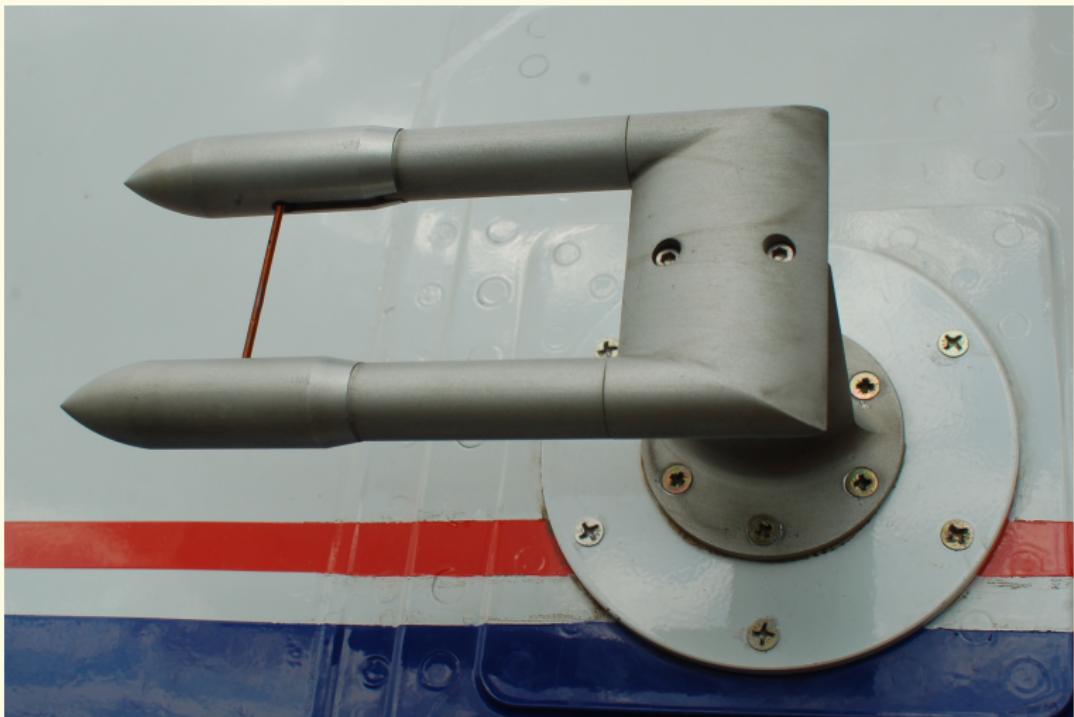
# Pomiary mikrofizyki chmur z pokładu samolotu NSF/NCAR C-130Q podczas RICO



- ▶ 19 ok. 8-godzinnych lotów badawczych
- ▶ 5–10% czasu lotu wewnątrz chmur
- ▶ loty nad powierzchnią oceanu
- ▶ spektrometria rozmiarów kropel chmurowych
- ▶ pomiary całkowej zawartości wody
- ▶ spektrometria rozmiarów kropel opadowych



Rysunek: Instrumenty FSSP-100 i FSSP-300 przymocowane pod skrzydłem samolotu M55 Geophysica. (Wagadugu, Burkina Faso, 2006; fot. autor)

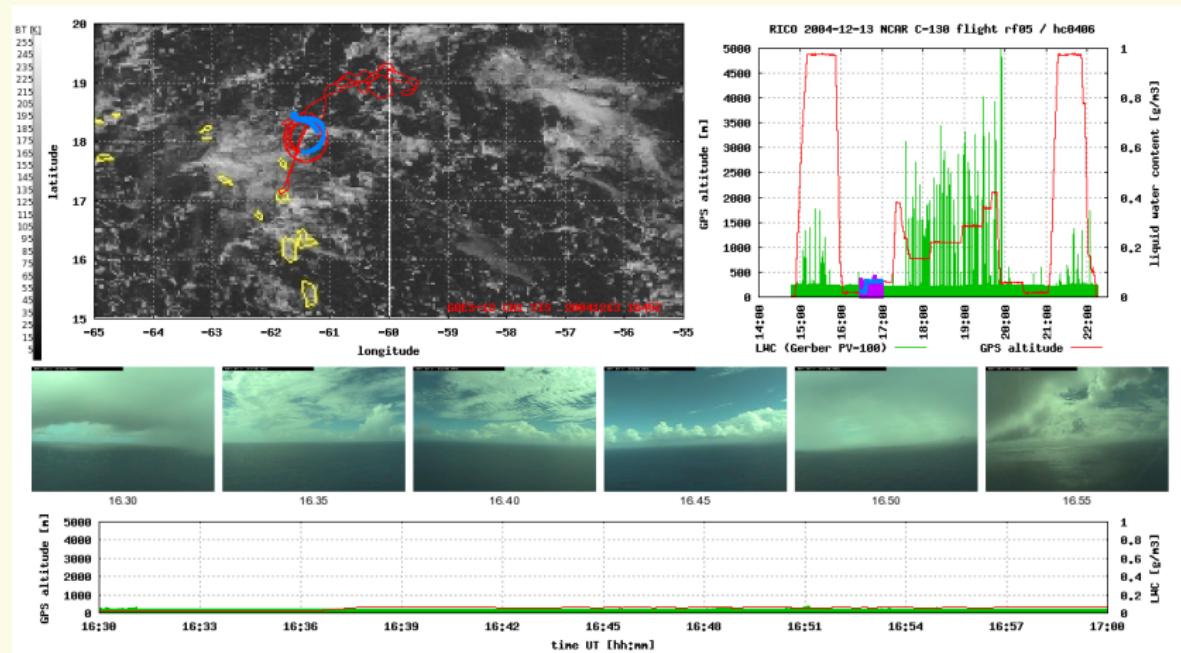


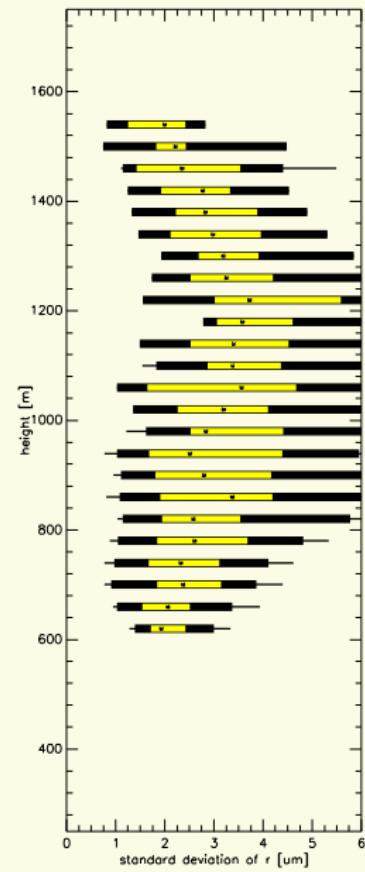
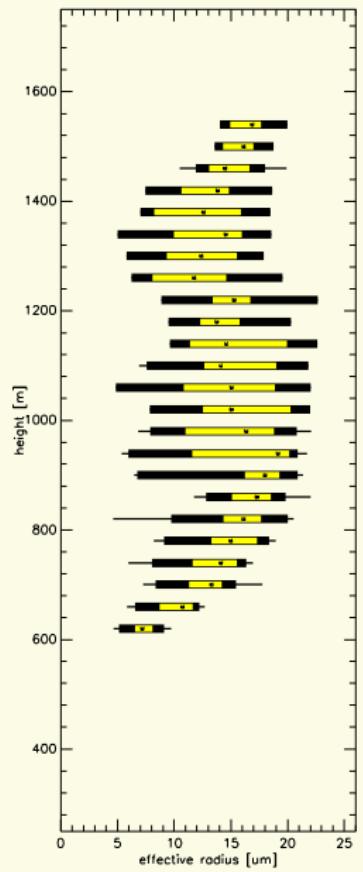
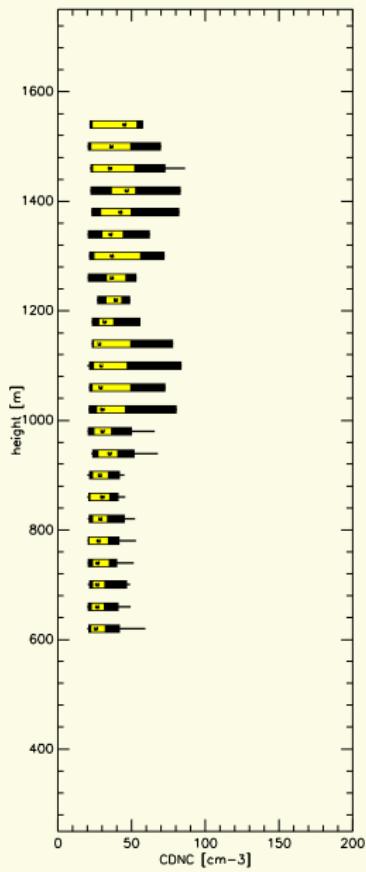
Rysunek: Instrument King-probe przymocowany do kadłuba samolotu ATR-42. (Jassy, Rumunia, 2007; fot. autor)

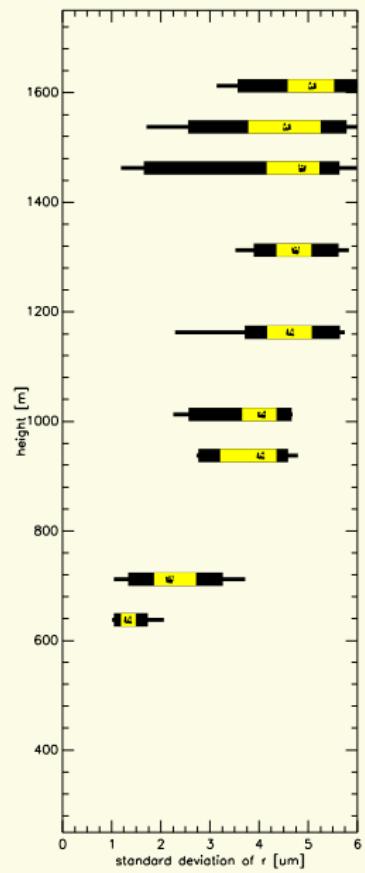
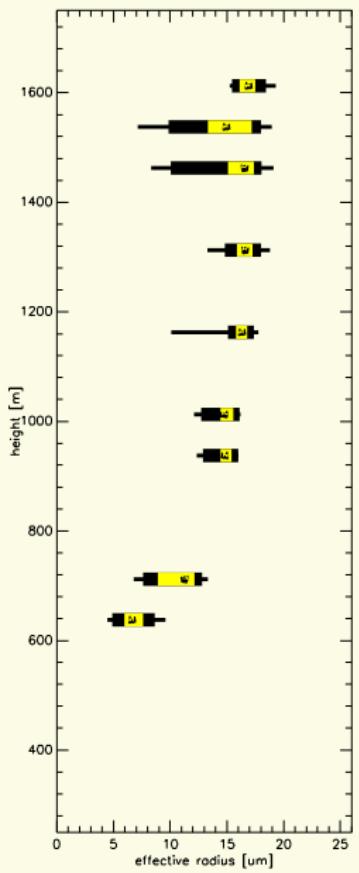
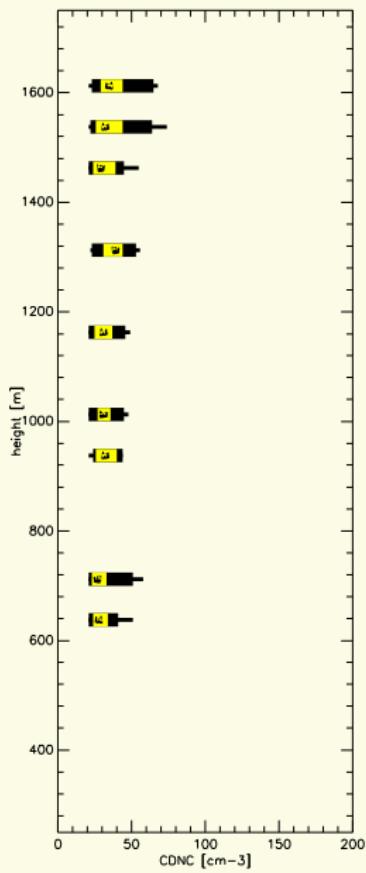


Rysunek: Instrument PVM-100A przymocowany do kadłuba samolotu ATR-42 (Jassy, Rumunia, 2007; fot. autor)

# Przykładowy lot badawczy RICO: C-130 RF05







# Dziękuję za uwagę!

**współautorzy:** Piotr Dziekan (FUW), Wojciech Grabowski (NCAR),  
Dorota Jarecka (MIT), Anna Jaruga (Caltech),  
Shin-ichiro Shima (UHyogo/RIKEN), Hanna Pawłowska (FUW),  
Maciej Waruszewski (FUW~NPS)

**oprogramowanie:** <http://github.com/igfuw>

**finansowanie:** NCN (PRELUDIUM, HARMONIA),  
FNP (START, POWROTY)