

O modelowaniu komputerowym chmur i deszczu

Sylwester Arabas
Uniwersytet Jagielloński

LIX Szkoła Matematyki Poglądowej
18 lutego 2019 r.

jak powstają chmury i opad?

WIKIPEDIA

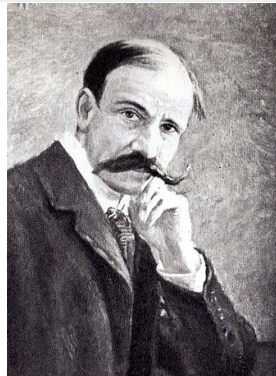
Maurycy Pius Rudzki

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. Slawinski, 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”, dookoła 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”, dookoła 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 kropeł. 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 kropeł. Tymczasem, jak to słusznie zauważył M. Smoluchowski zwykle spada nie jedna kropla, ale całe mnóstwo...

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

Plan prezentacji

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

Plan prezentacji

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

Oddziaływania aerozol – chmury – opad: procesy



- ▶ aktywacja kropelek na aerozolu
- ▶ kondensacja

Oddziaływania aerozol – chmury – opad: procesy



- ▶ aktywacja kropelek na aerozolu
- ▶ kondensacja

- ▶ zderzenia pomiędzy kropelkami
- ▶ procesy chemiczne zachodzące w kropelkach

Oddziaływania aerozol – chmury – opad: procesy



- ▶ aktywacja kropelek na aerozolu
- ▶ kondensacja

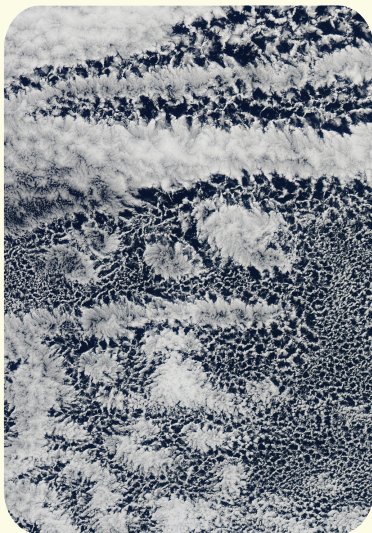
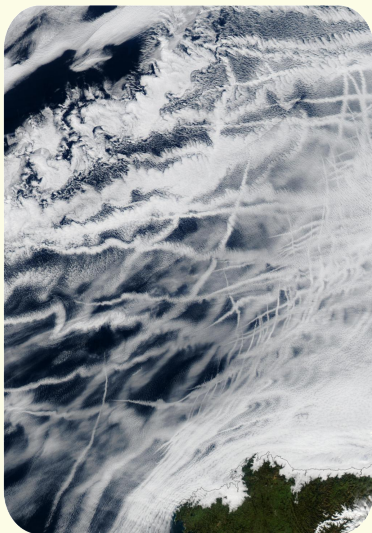


- ▶ zderzenia pomiędzy kropelkami
- ▶ procesy chemiczne zachodzące w kropelkach

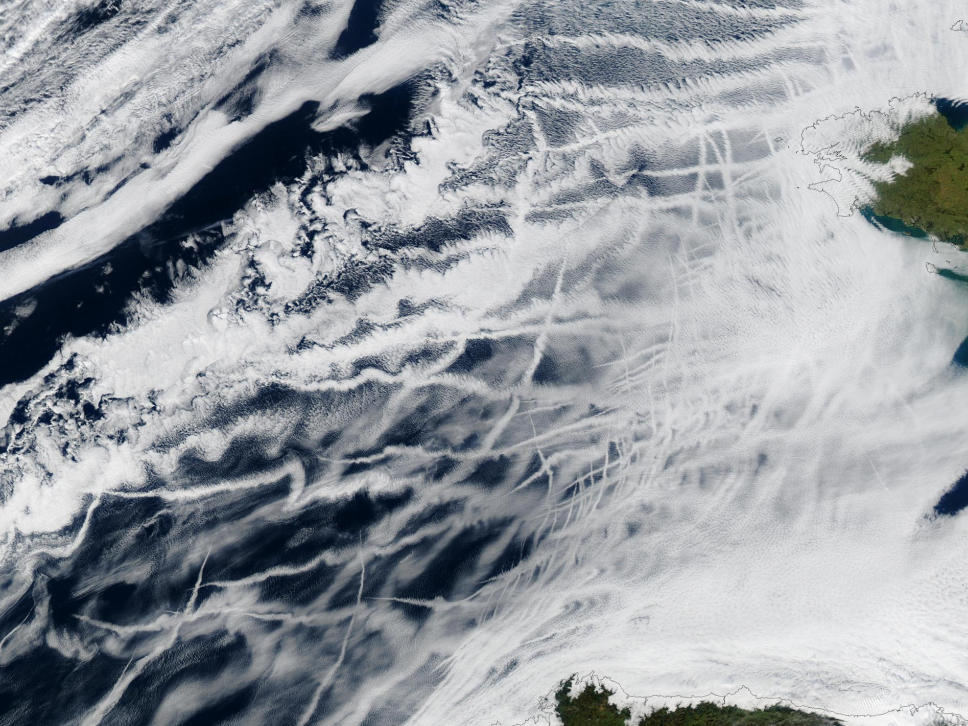


- ▶ opad
- ▶ wymywanie aerozolu
- ▶ odparowywanie kropelek

Oddziaływania aerozol – chmury – aerozol: przykłady

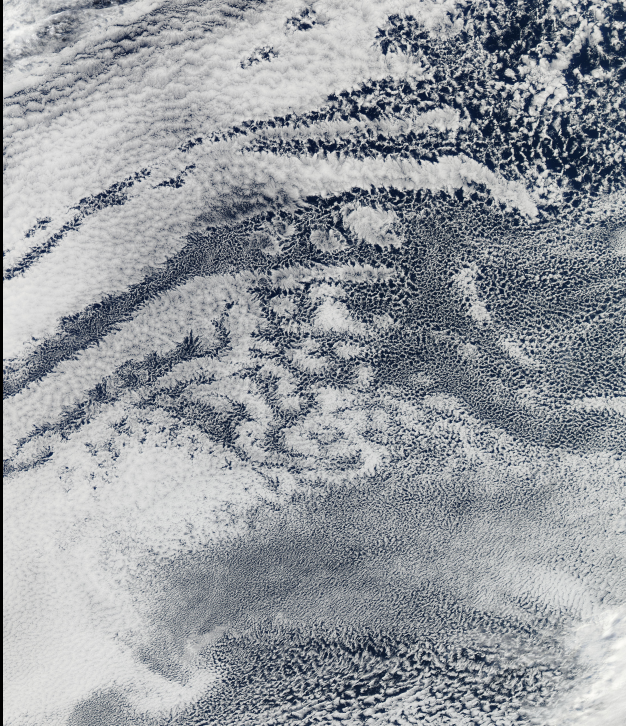


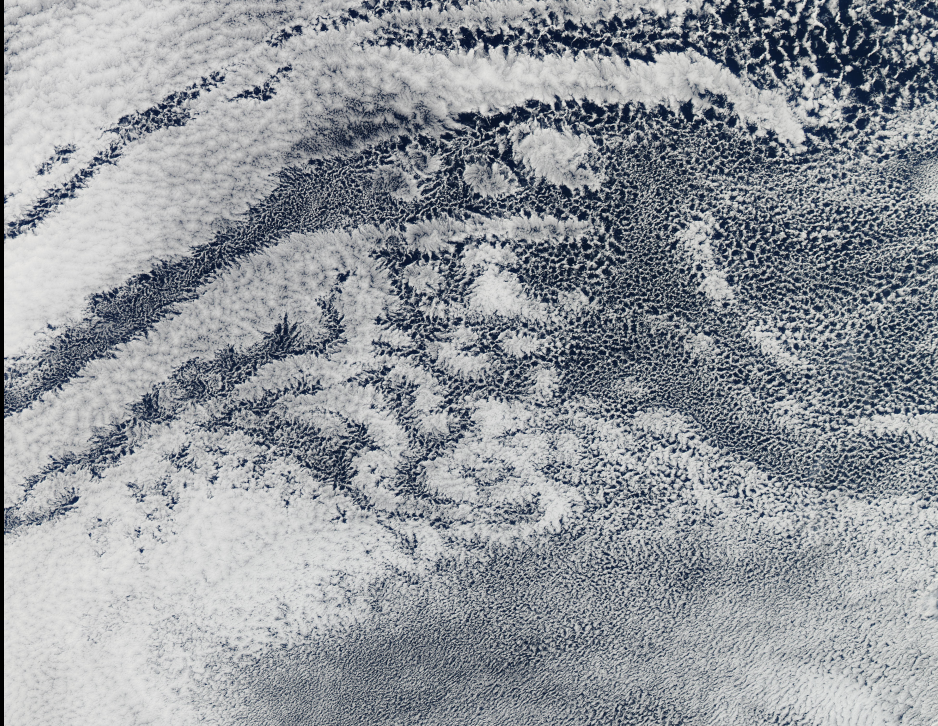
źródło: NASA (27 I 2003 – Zatoka Biskajska; 17 IV 2010 – Pacyfik u wybrzeży Peru)

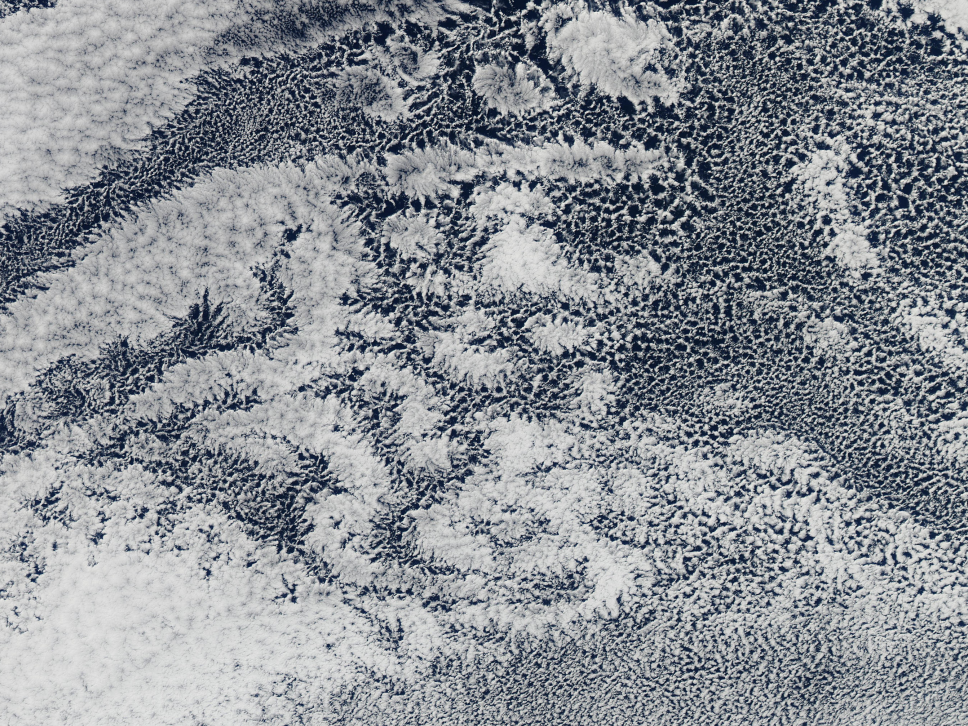


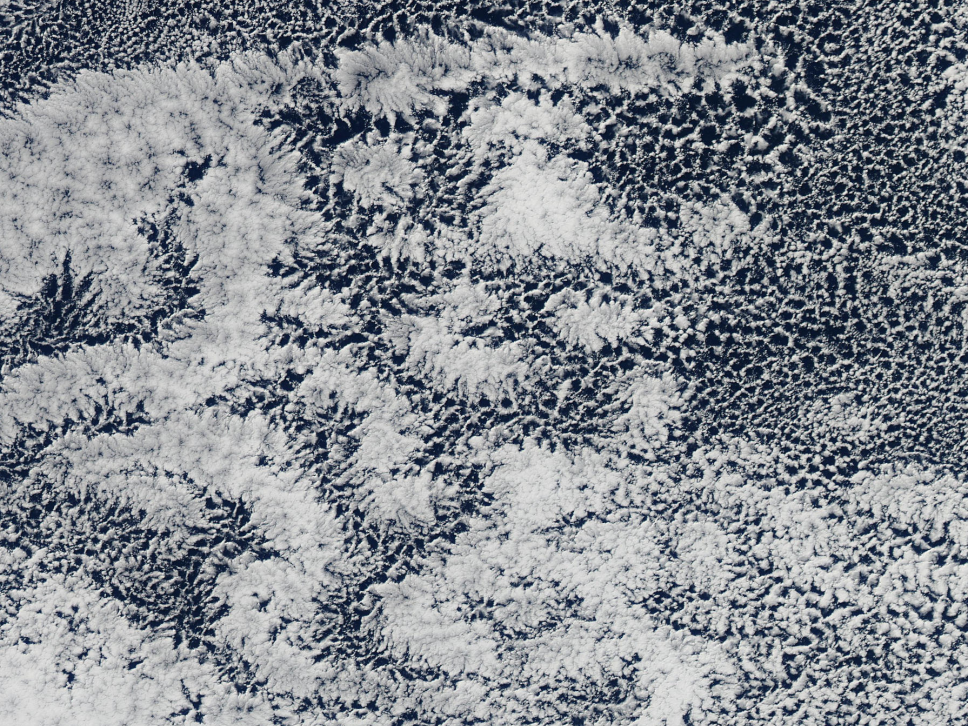


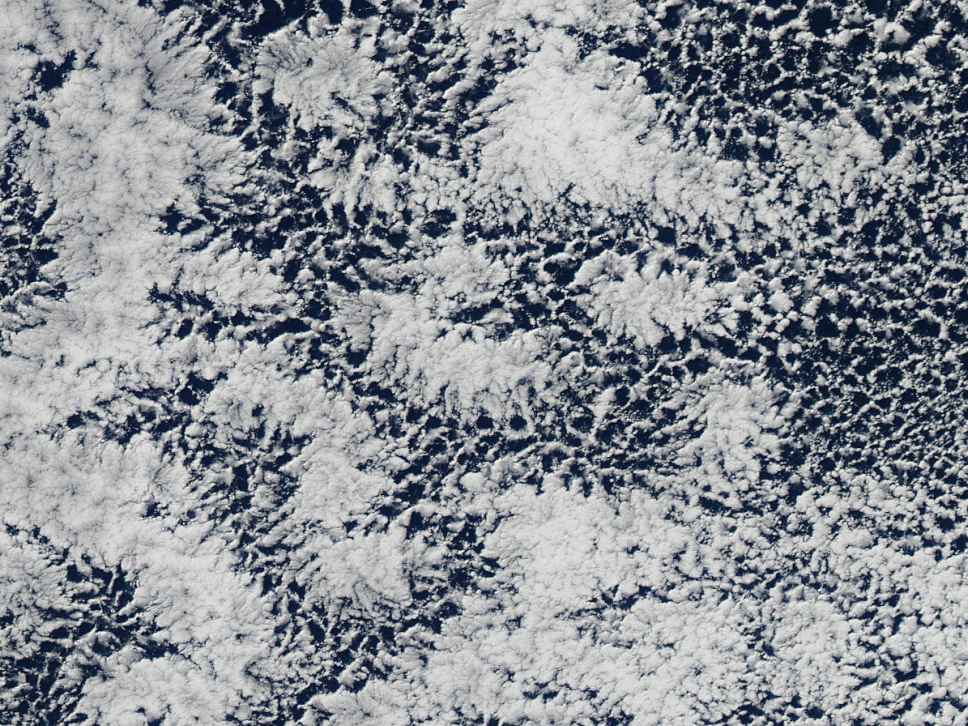
źródło: NASA





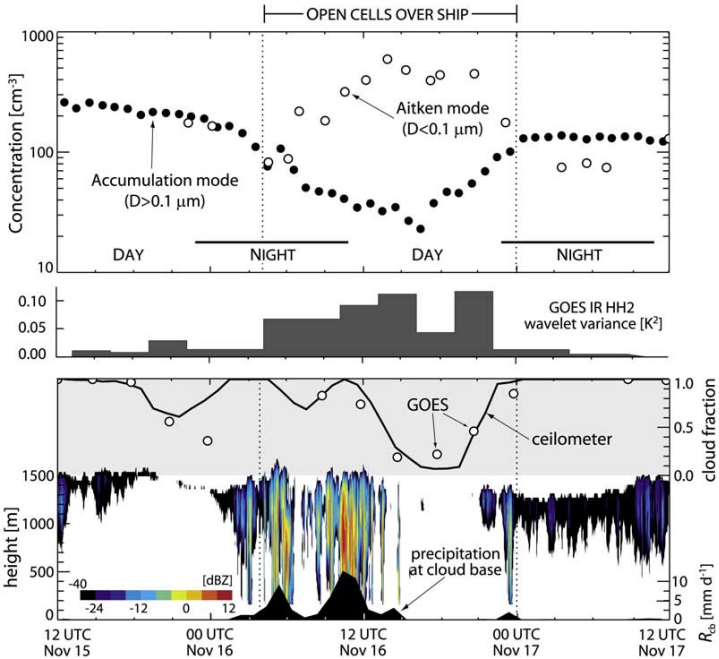












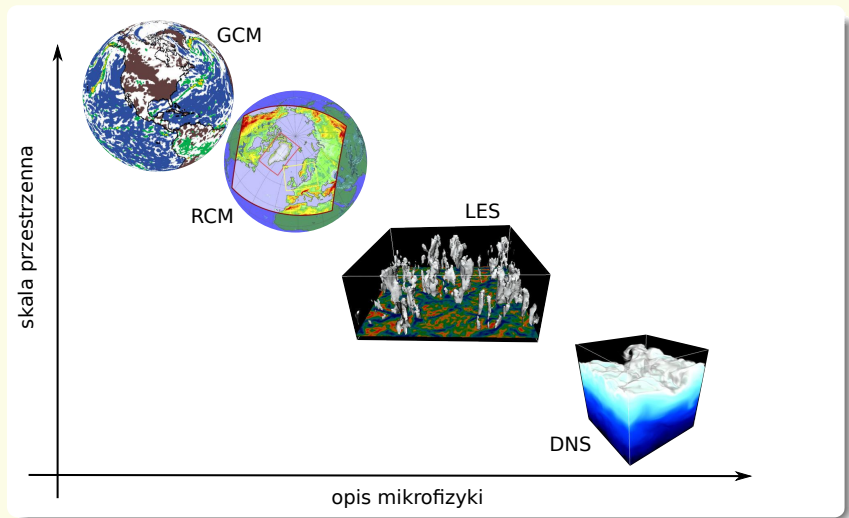
Plan prezentacji

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

Plan prezentacji

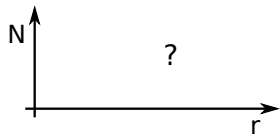
- Oddziaływania aerozol - chmury - opad
- Modelowanie mikrofizyki chmur
- Porównanie z pomiarami

Reprezentacja mikrofizyki a skala modeli



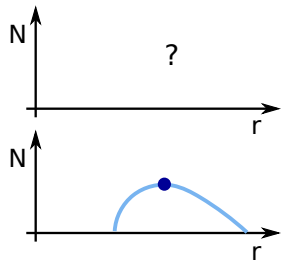
Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

- ▶ opis zgrubny jedno-momentowy (bulk)



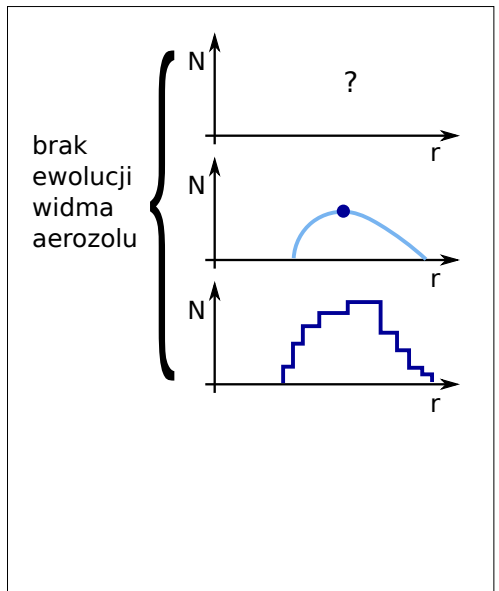
Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

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



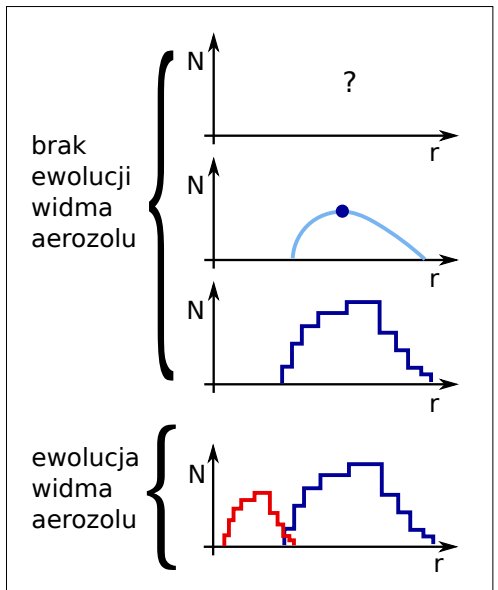
Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

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



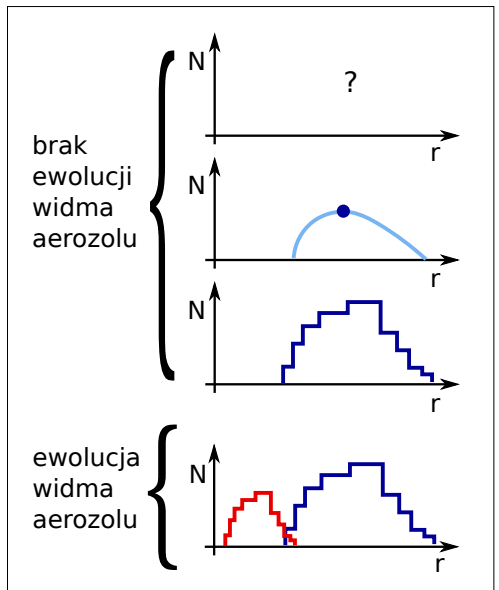
Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

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

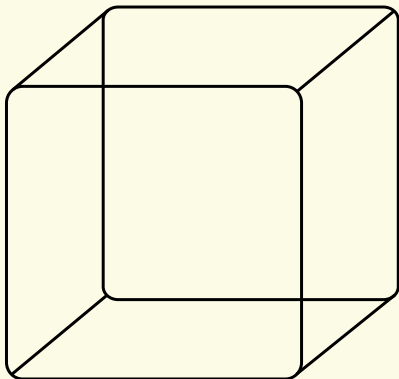


Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

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

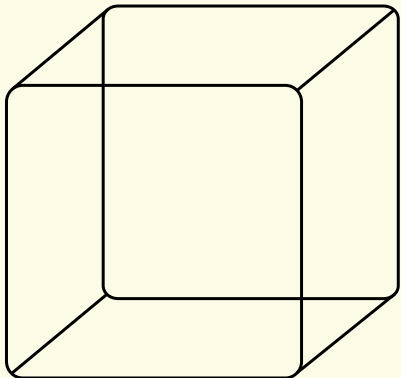


Lagranżowski opis mikrofizyki



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



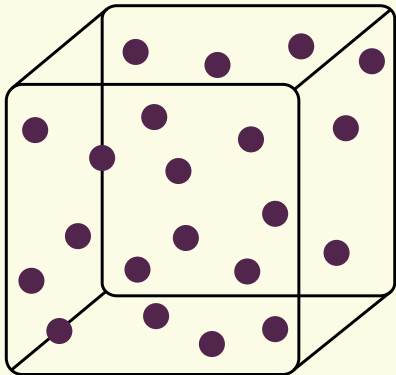


W domenie rozmieszczone są
obiekty które są nośnikiem
informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:



Lagranżowski opis mikrofizyki

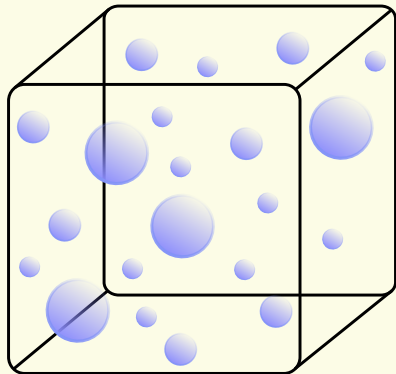


W domenie rozmieszczone są
obiekty które są nośnikiem
informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie

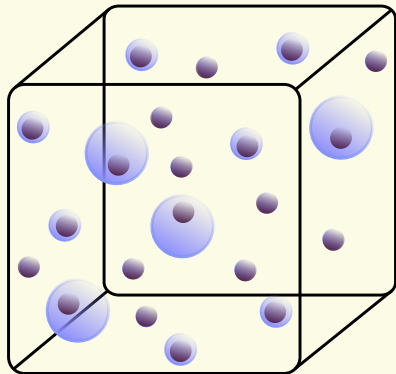
Lagranżowski opis mikrofizyki



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

Można im przypisywać atrybuty:

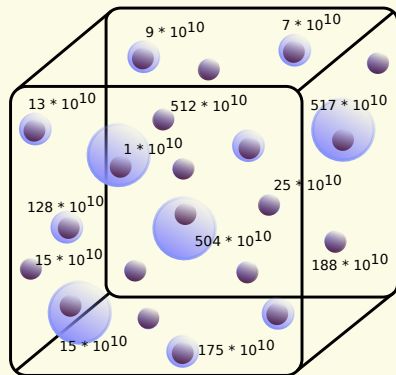
- ▶ położenie
- ▶ promień mokry



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

Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie
- ▶ promień mokry
- ▶ promień suchy

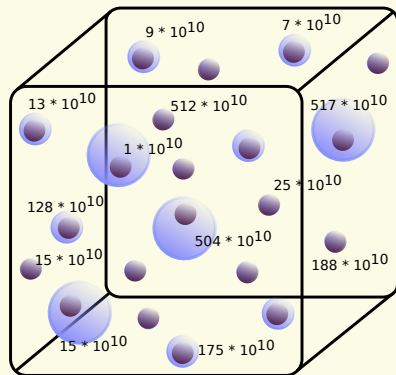


W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

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

Lagranżowski opis mikrofizyki

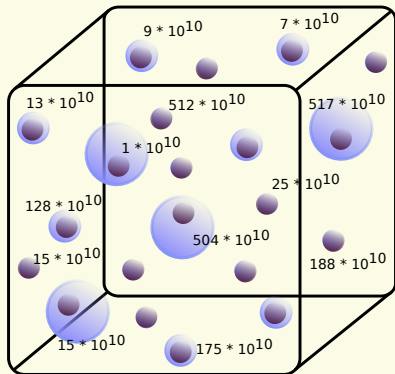


W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

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

Lagranżowski opis mikrofizyki



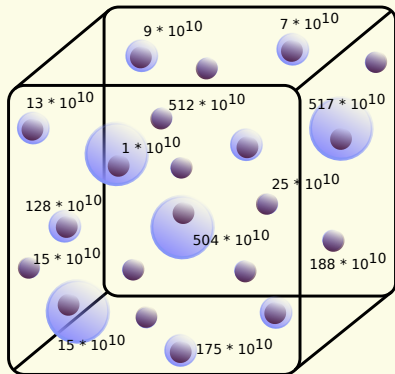
W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

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 μ -fizyki a dynamika płynu

Euler. / PDE

Lagr. / ODE

Lagranżowski opis μ -fizyki a dynamika płynu

Euler. / PDE

adwekcja ciepła
adwekcja wilgoci

Lagr. / ODE

transport cząstek

Lagranżowski opis μ -fizyki a dynamika płynu

Euler. / PDE

adwekcja ciepła
adwekcja wilgoci

Lagr. / ODE

transport cząstek
wzrost kondensacyjny
wzrost koagulacyjny
osiadanie

Lagranżowski opis μ -fizyki a dynamika płynu

Euler. / PDE

adwekcja ciepła
adwekcja wilgoci

$$\partial_t(\rho_d r) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho_d r) = \rho_d \dot{r}$$

$$\partial_t(\rho_d \theta) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho_d \theta) = \rho_d \dot{\theta}$$

Lagr. / ODE

transport cząstek
wzrost kondensacyjny
wzrost koagulacyjny
osiadanie

$$\dot{r} = \sum_{\text{cząstki} \in \Delta V} \dots$$

$$\dot{\theta} = \sum_{\text{cząstki} \in \Delta V} \dots$$

Lagranżowski opis μ -fizyki a dynamika płynu

Euler. / PDE

adwekcja ciepła
adwekcja wilgoci

$$\partial_t(\rho_d r) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho_d r) = \rho_d \dot{r}$$

$$\partial_t(\rho_d \theta) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho_d \theta) = \rho_d \dot{\theta}$$

adwekcja gazów śladowych

...

Lagr. / ODE

transport cząstek
wzrost kondensacyjny
wzrost koagulacyjny
osiadanie

$$\dot{r} = \sum_{\text{cząstki} \in \Delta V} \dots$$

$$\dot{\theta} = \sum_{\text{cząstki} \in \Delta V} \dots$$

reakcje chemiczne w kroplach

...

Lagranżowski opis μ -fizyki a koagulacja (Shima et al. 2009)

- ▶ dla n “super kropelek” w objętości ΔV w czasie Δt

Lagranżowski opis μ -fizyki a koagulacja (Shima et al. 2009)

- ▶ dla n “super kropelek” w objętości ΔV w czasie Δt
- ▶ każdej reprezentującej ξ cząstek (aerozolu/chmury/opadu)

Lagranżowski opis μ -fizyki a koagulacja (Shima et al. 2009)

- ▶ dla n “super kropelek” w objętości ΔV w czasie Δt
- ▶ każdej reprezentującej ξ 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 kropelek

Lagranżowski opis μ -fizyki a koagulacja (Shima et al. 2009)

- ▶ dla n “super kropelek” w objętości ΔV w czasie Δt
- ▶ każdej reprezentującej ξ 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 kropelek

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

Lagranżowski opis μ -fizyki a koagulacja (Shima et al. 2009)

- ▶ dla n “super kropelek” w objętości ΔV w czasie Δt
- ▶ każdej reprezentującej ξ 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 kropelek

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

Lagranżowski opis μ -fizyki a koagulacja (Shima et al. 2009)

- ▶ dla n “super kropelek” w objętości ΔV w czasie Δt
- ▶ każdej reprezentującej ξ cząstek (aerozolu/chmury/opadu)
- ▶ prawdopodobieństwo zderzenia i -tej i j -tej super-kropelki:

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

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

- ▶ dwie (spójne) możliwości reprezentacji zderzeń w symulacji Monte-Carlo:
 - ▶ część z ξ cząstek (określona przez P_{ij}) zderza i łączy się co Δt
 - ▶ $\min(\xi_i, \xi_j)$ kropelek zdarza się i łączy raz na wiele (określone przez P_{ij}) Δt
 \rightsquigarrow 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: $O(n^2) \rightsquigarrow O(n)$, prawdop. skalowane przez $\frac{n \cdot (n-1)}{2} / \left[\frac{n}{2} \right]$

Lagranżowski opis μ -fizyki a koagulacja (Shima et al. 2009)

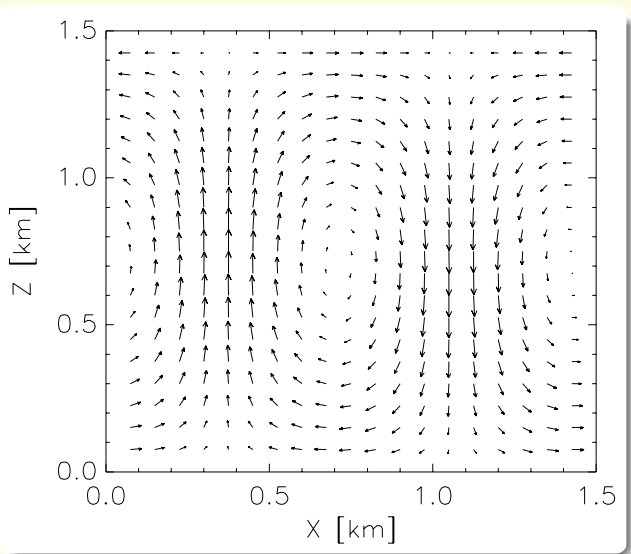
- ▶ dla n “super kropelek” w objętości ΔV w czasie Δt
- ▶ każdej reprezentującej ξ cząstek (aerozolu/chmury/opadu)
- ▶ prawdopodobieństwo zderzenia i -tej i j -tej super-kropelki:

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

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

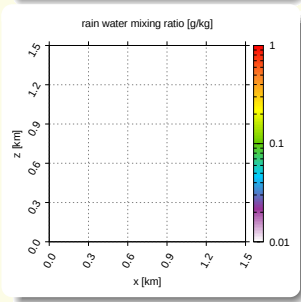
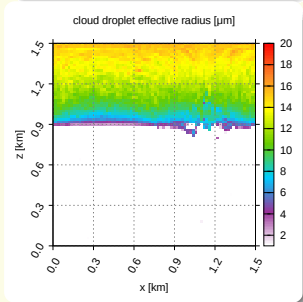
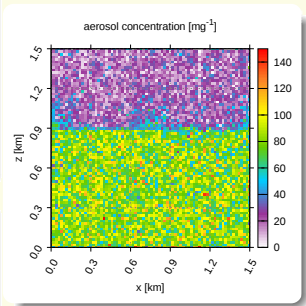
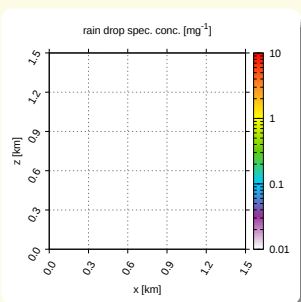
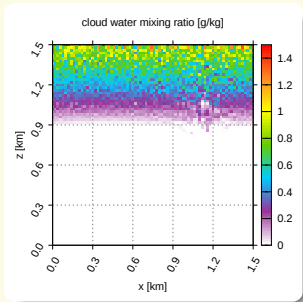
- ▶ dwie (spójne) możliwości reprezentacji zderzeń w symulacji Monte-Carlo:
 - ▶ część z ξ cząstek (określona przez P_{ij}) zderza i łączy się co Δt
 - ▶ $\min(\xi_i, \xi_j)$ kropelek zdarza się i łączy raz na wiele (określone przez P_{ij}) Δt
 \leadsto stała liczba super-kropelek (reprezentacja rozmiarów 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 $\frac{n \cdot (n-1)}{2} / \left[\frac{n}{2} \right]$
- ▶ alternatywa Eulerowska (i nie stochastyczna): równanie Smoluchowskiego

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



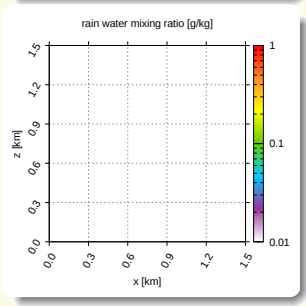
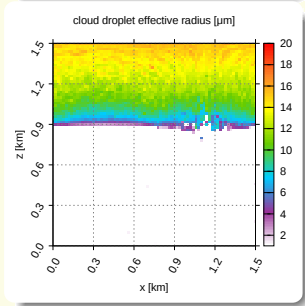
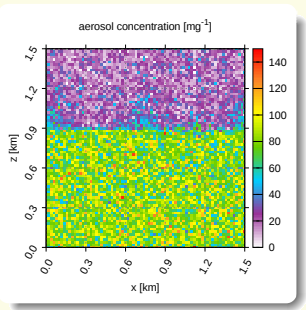
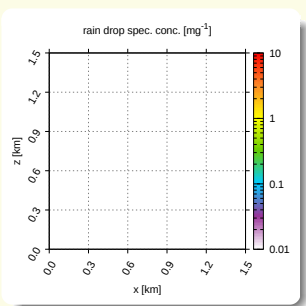
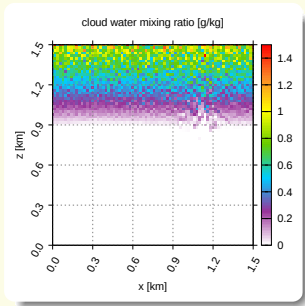
przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX



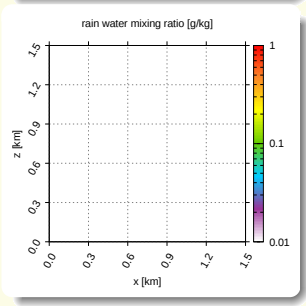
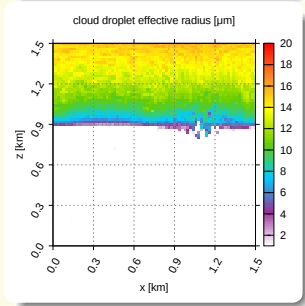
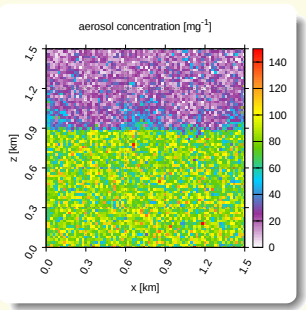
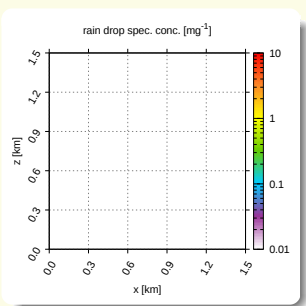
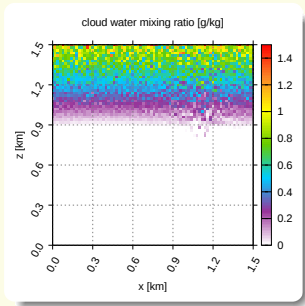
przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)

xx



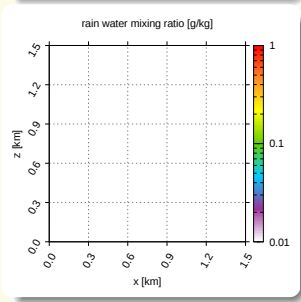
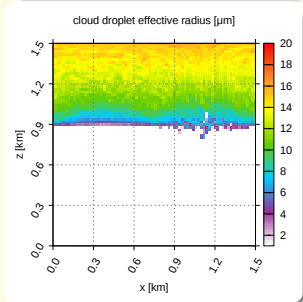
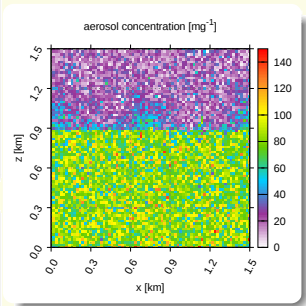
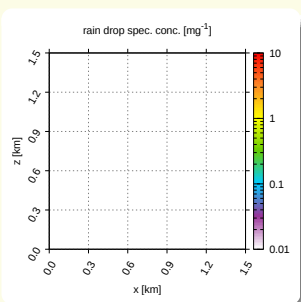
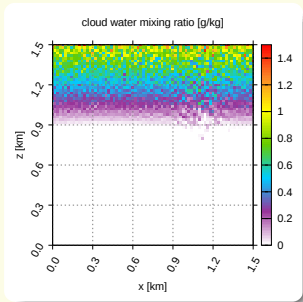
przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

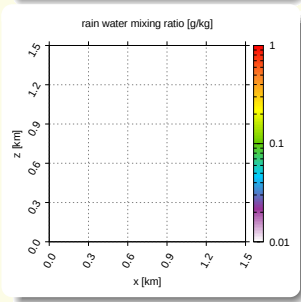
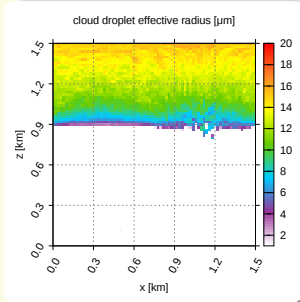
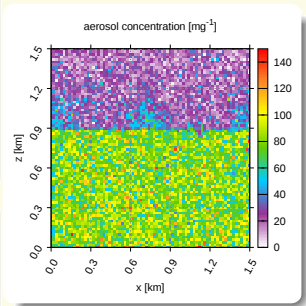
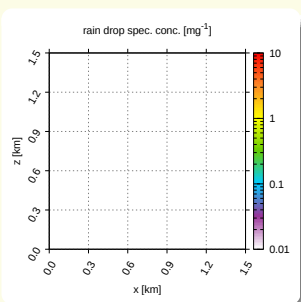
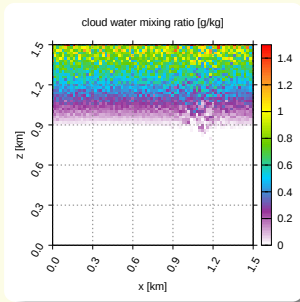


przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)

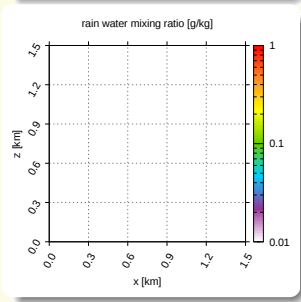
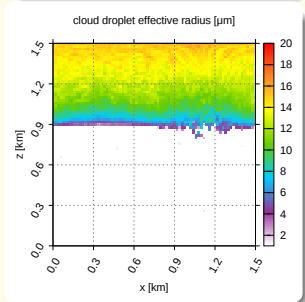
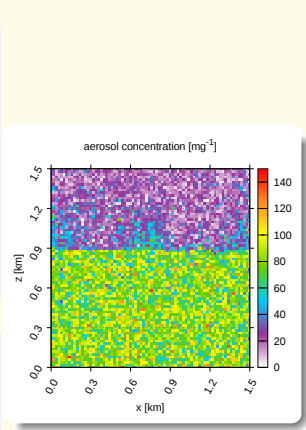
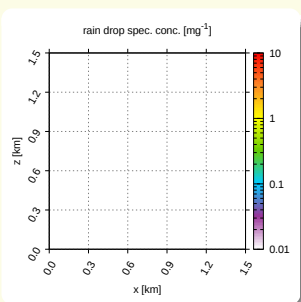
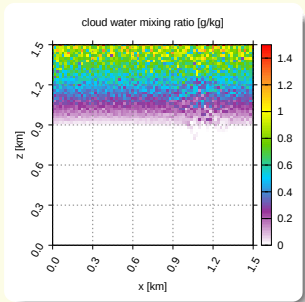
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX



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

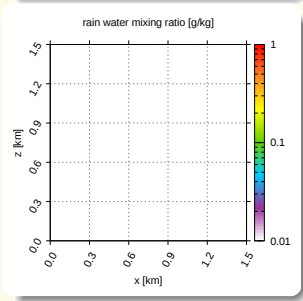
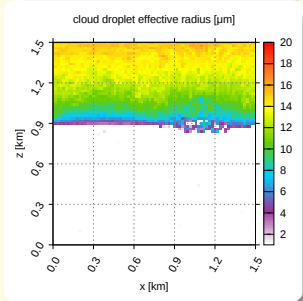
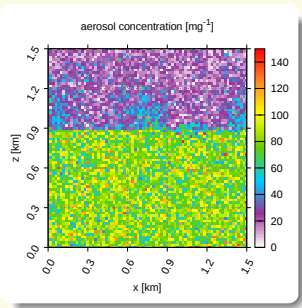
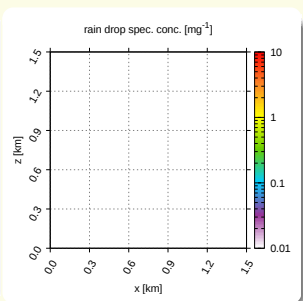
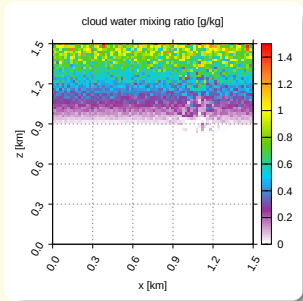


przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)

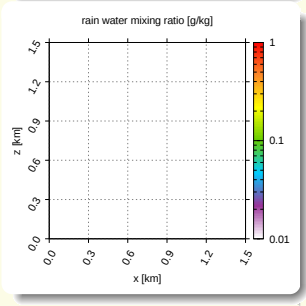
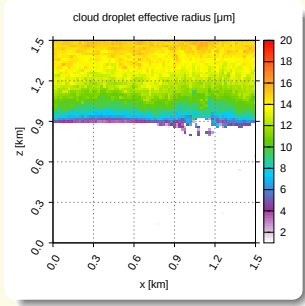
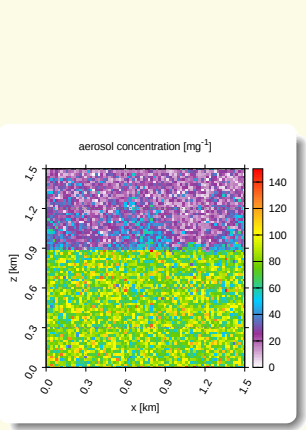
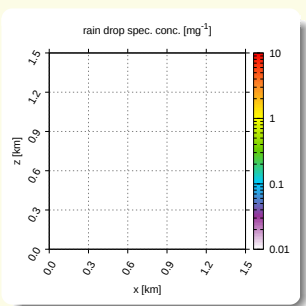
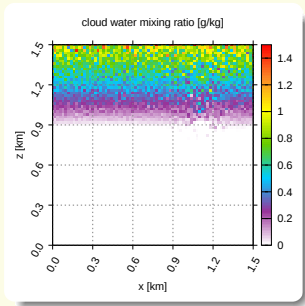


przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)

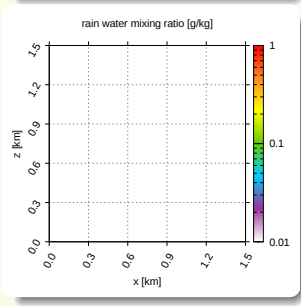
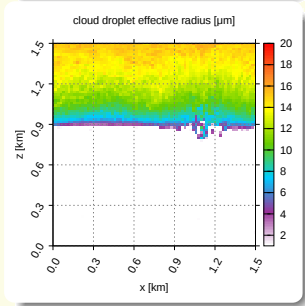
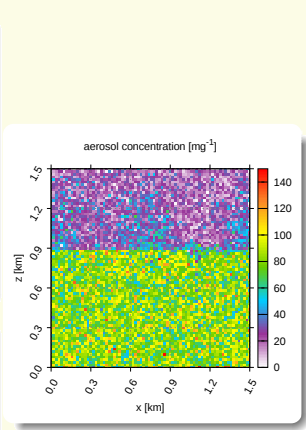
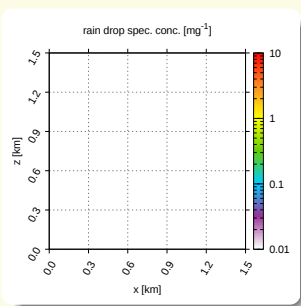
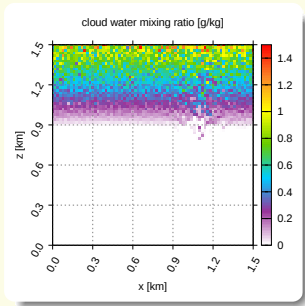
xx



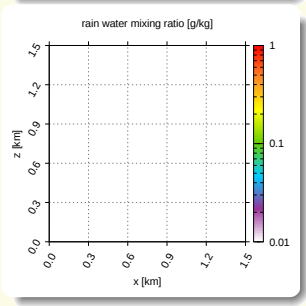
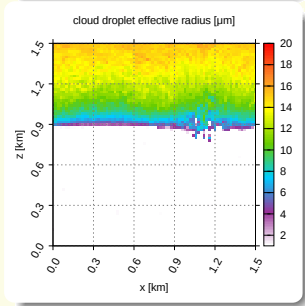
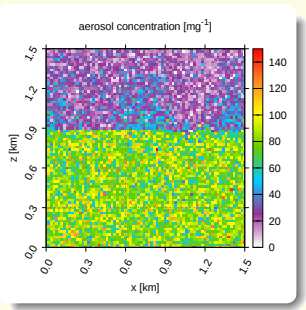
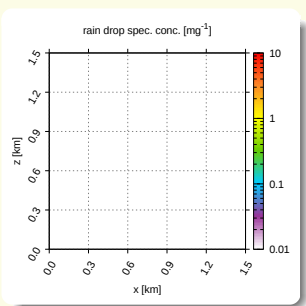
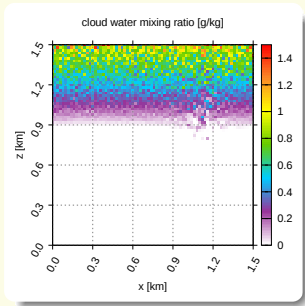
przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



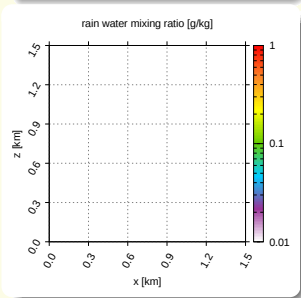
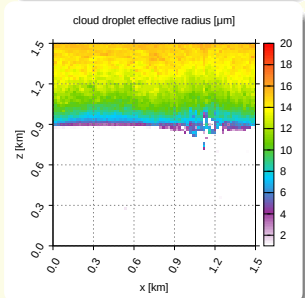
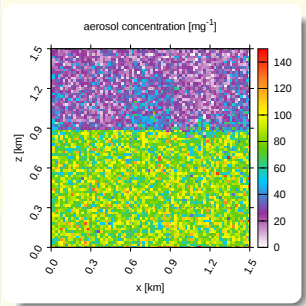
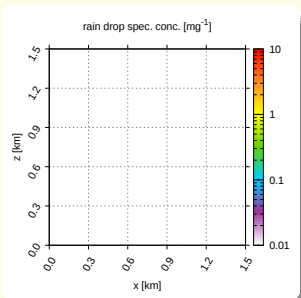
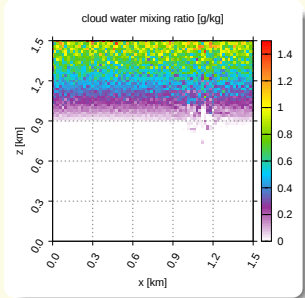
przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



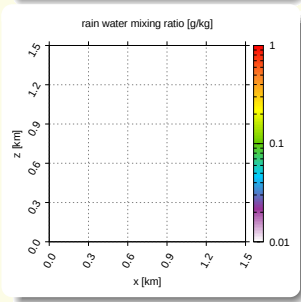
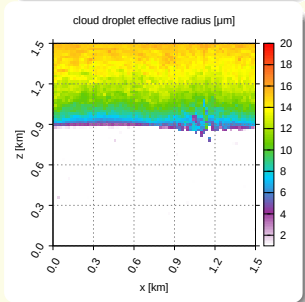
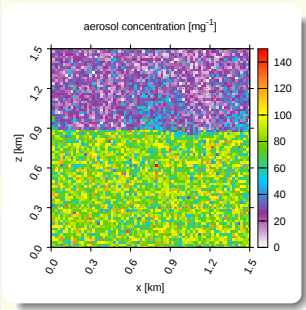
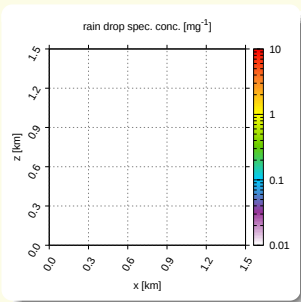
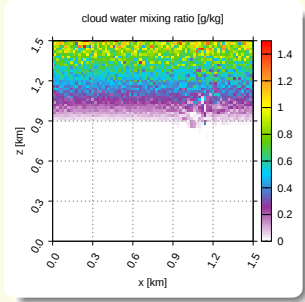
przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



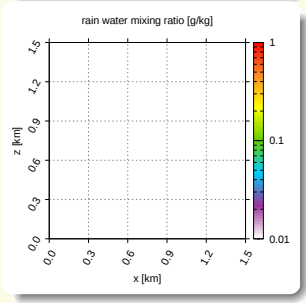
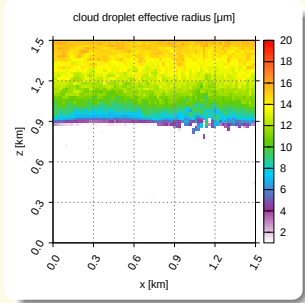
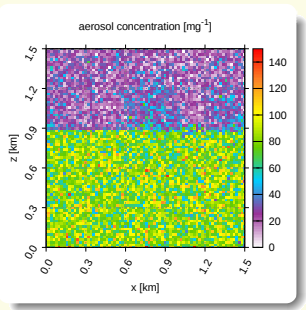
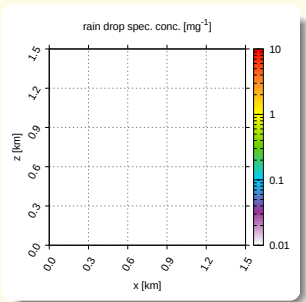
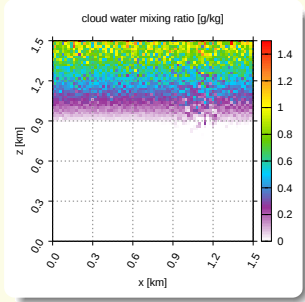
przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



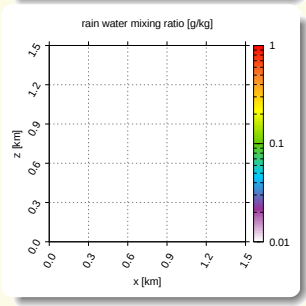
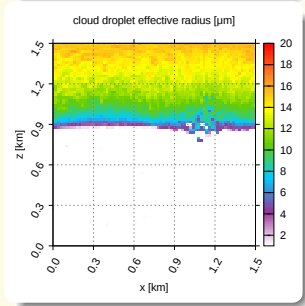
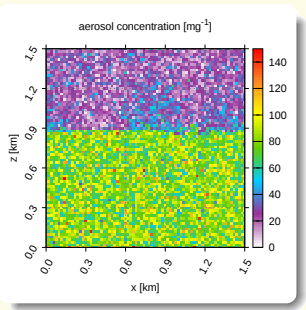
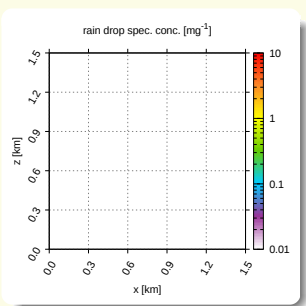
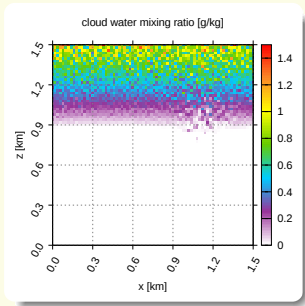
przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



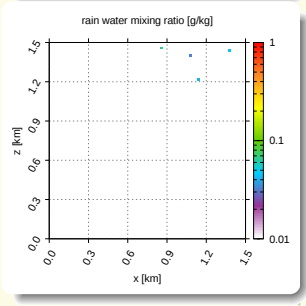
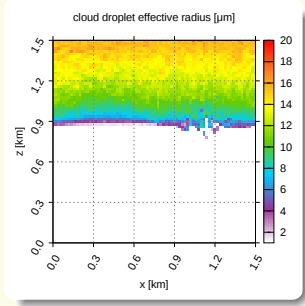
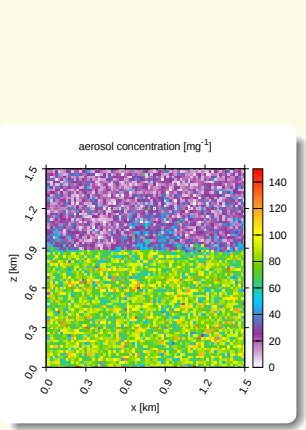
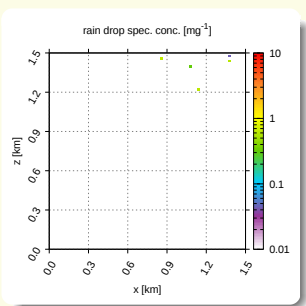
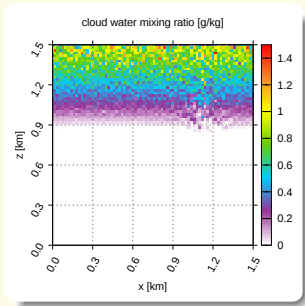
przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



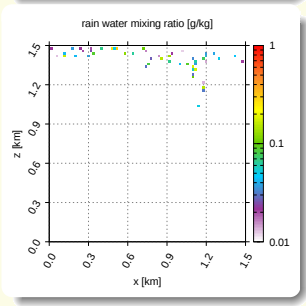
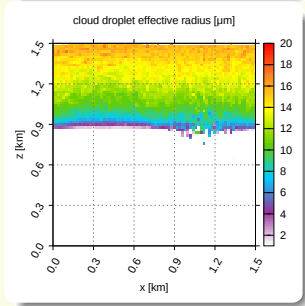
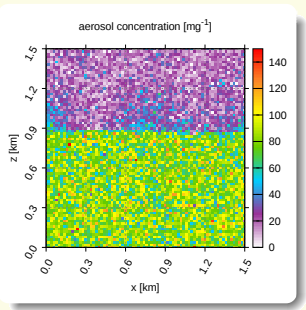
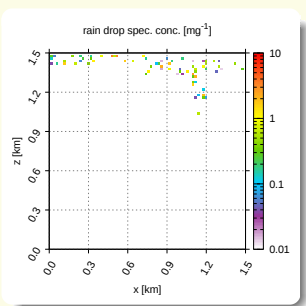
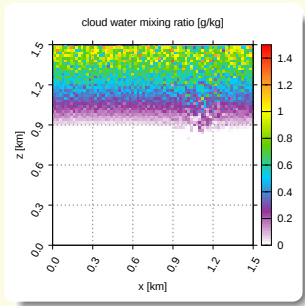
przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



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

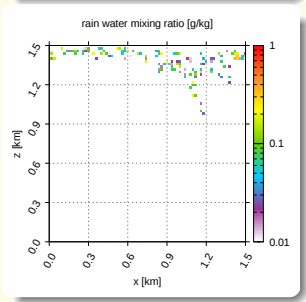
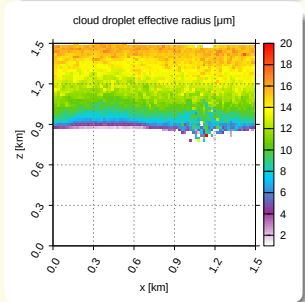
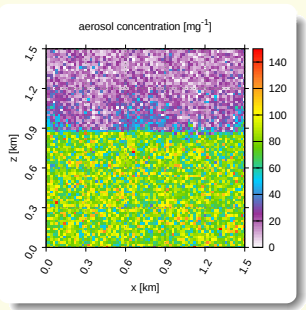
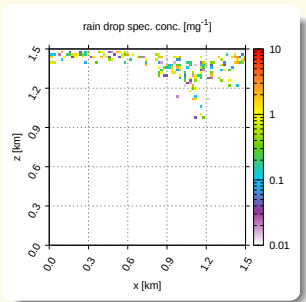
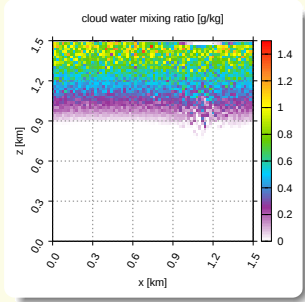


przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



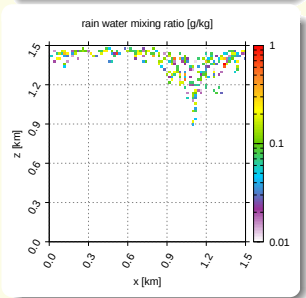
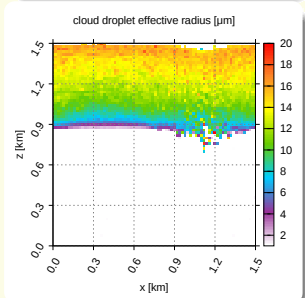
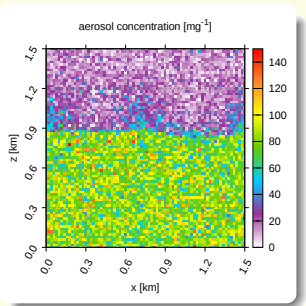
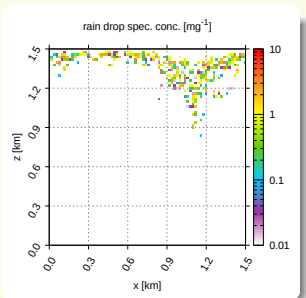
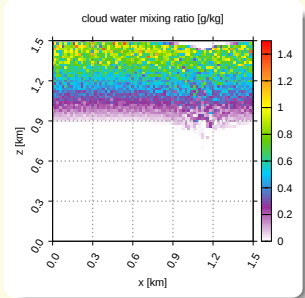
przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)

XXOO

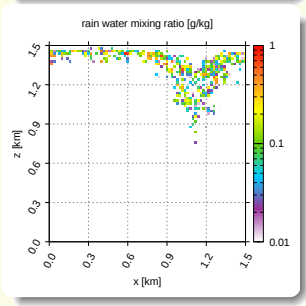
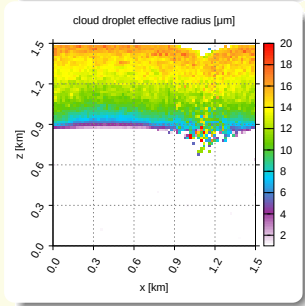
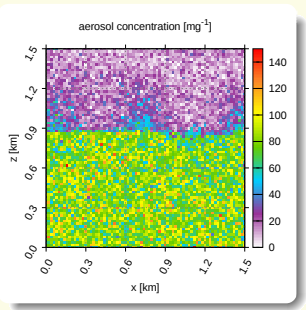
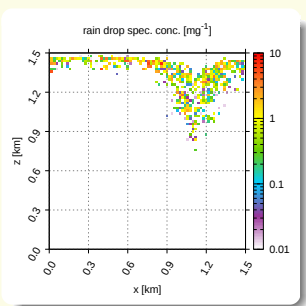
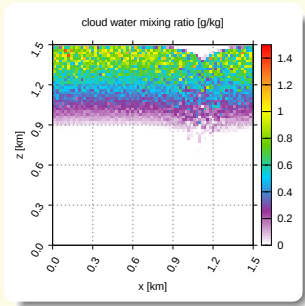


przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)

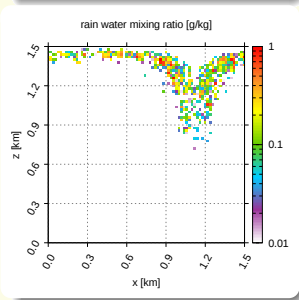
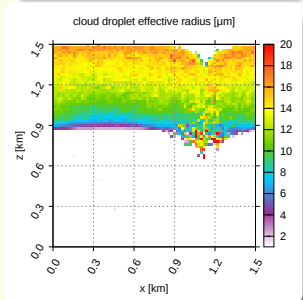
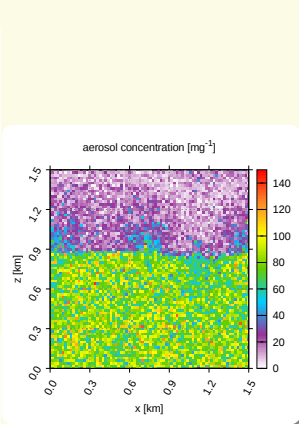
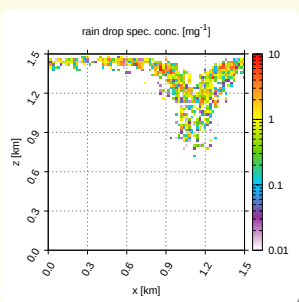
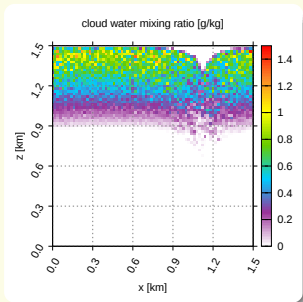
XX



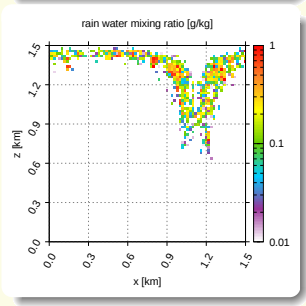
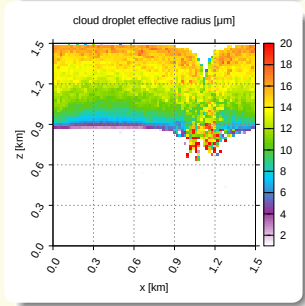
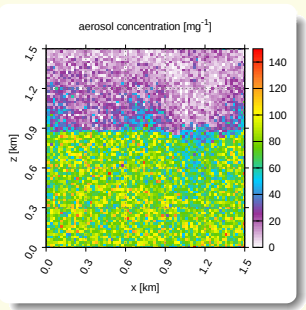
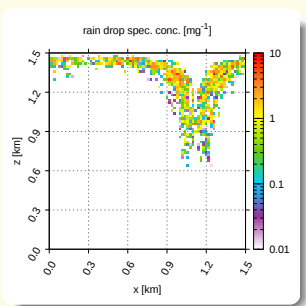
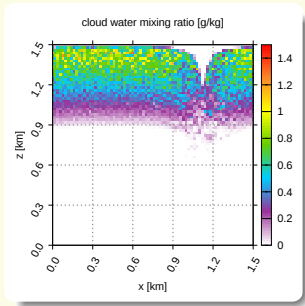
przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



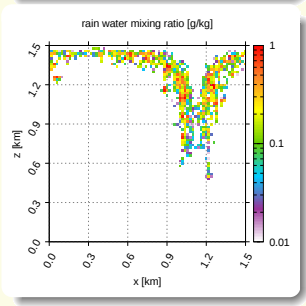
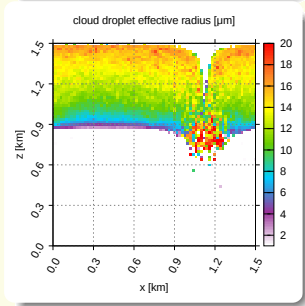
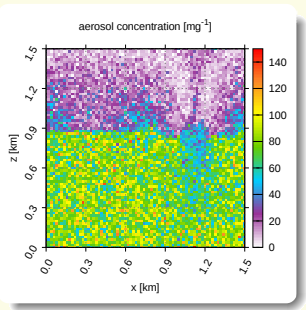
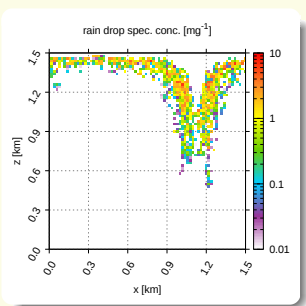
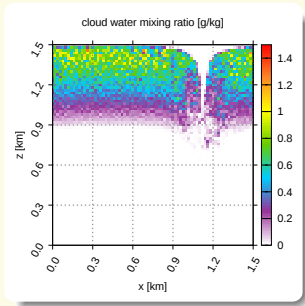
przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



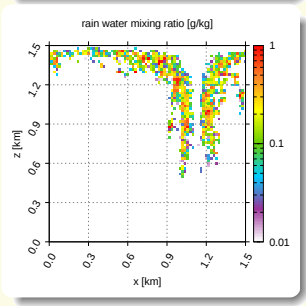
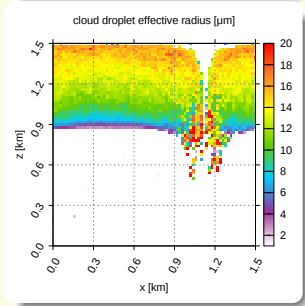
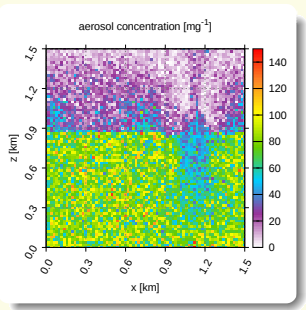
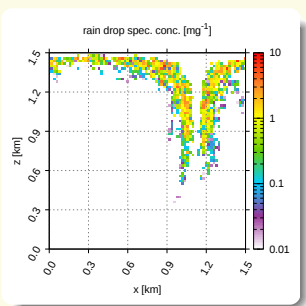
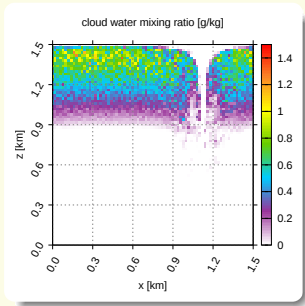
przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



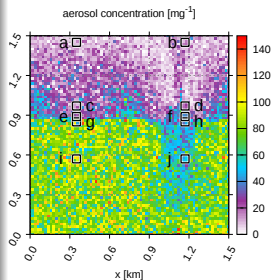
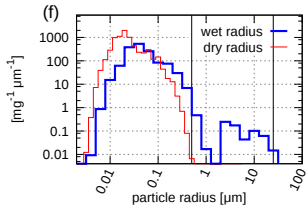
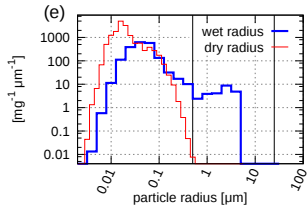
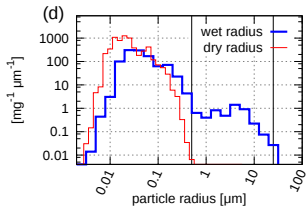
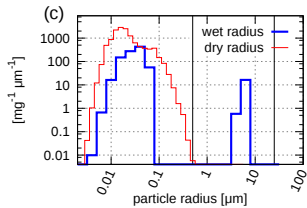
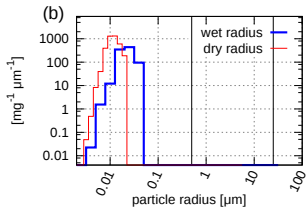
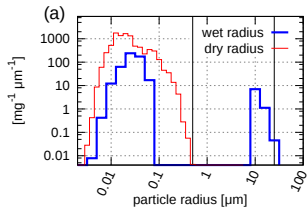
przykładowa symulacja (2D, opis lagr., zadany przepływ)



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



widma rozmiarów cząstek



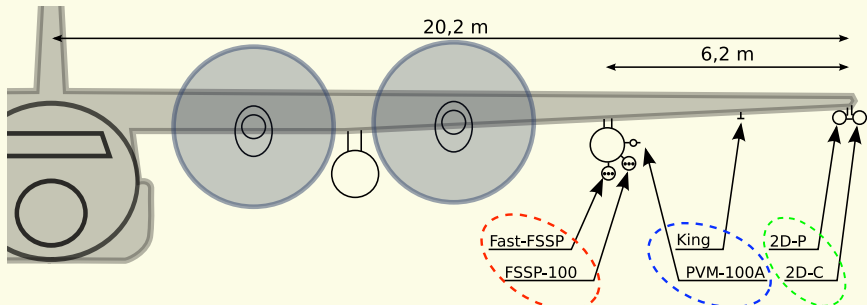
Plan prezentacji

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

Plan prezentacji

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

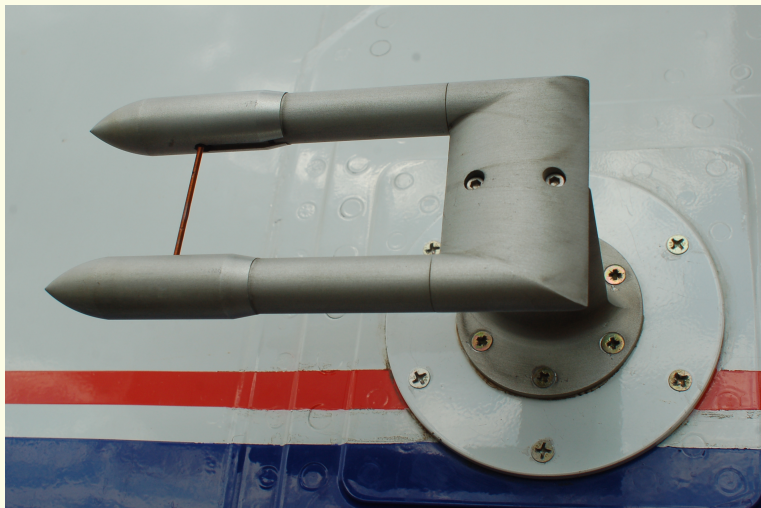
Pomiary mikrofizyki chmur z pokładu samolotu NSF/NCAR C-130Q podczas RICO



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



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

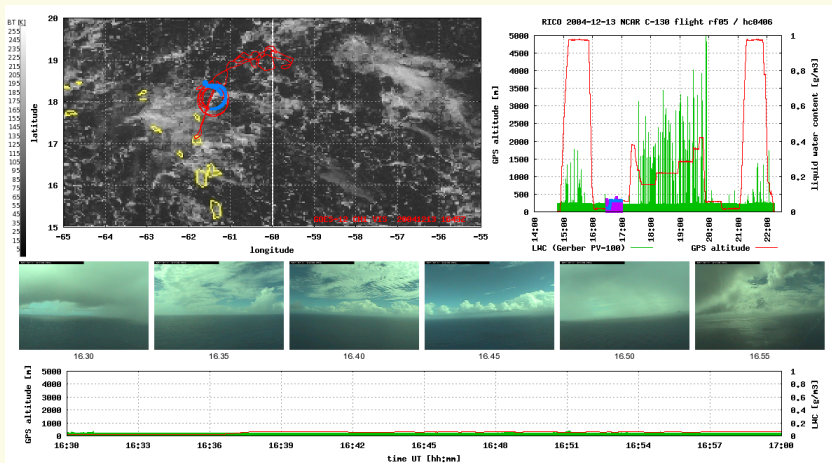


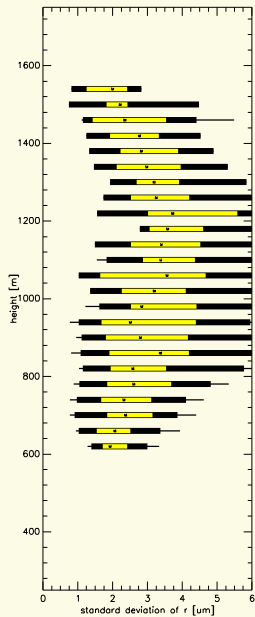
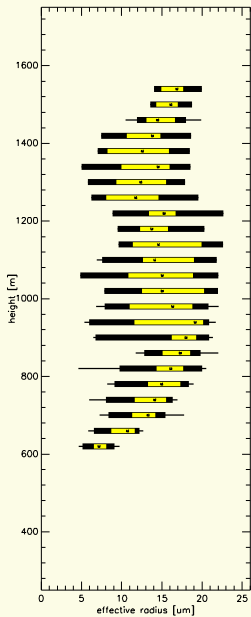
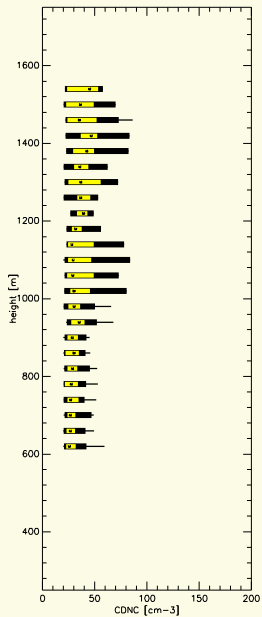
Rysunek: Instrument King-probe przymocowany do kadłuba samolotu ATR-42. (Jassy, Rumunia, 2007; fot. autor)

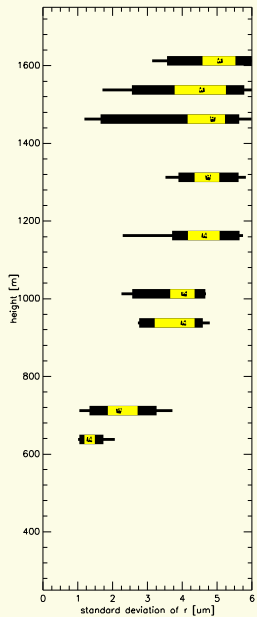
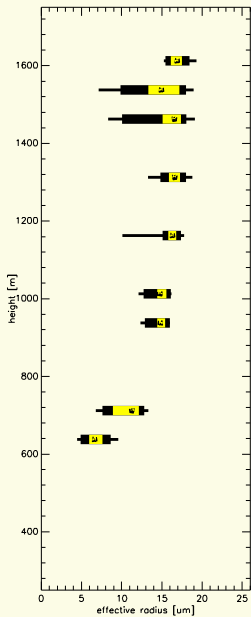
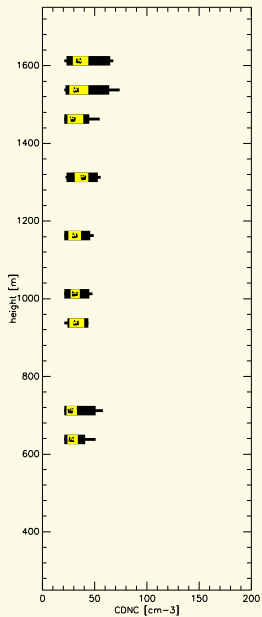


Rysunek: Instrument PVM-100A przymocowany do kadłuba samolotu ATR-42 (Jassy, Rumunia, 2007; fot. autor)

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)