

O lagranżowskiej reprezentacji mikrofizyki aerozolu, chmur i opadu w numerycznych modelach przepływów atmosferycznych

Sylwester Arabas
Uniwersytet Jagielloński

Zebranie Zespołu Fizyki Środowiska AGH
13 grudnia 2022 r.

Sylwester Arabas

Sylwester Arabas

- alma mater – fuw.edu.pl:

Sylwester Arabas

- alma mater – fuw.edu.pl:
 - MSc (2008) mikrofizyczne pomiary lotnicze chmur

Sylwester Arabas

- alma mater – fuw.edu.pl:
 - MSc (2008) mikrofizyczne pomiary lotnicze chmur
 - PhD (2013) modelowanie mikrofizyki chmur

Sylwester Arabas

- alma mater – fuw.edu.pl:
 - MSc (2008) mikrofizyczne pomiary lotnicze chmur
 - PhD (2013) modelowanie mikrofizyki chmur
 - adiunkt (–2015): inżynieria oprogramowania CFD (github.com/igfuw)

Sylwester Arabas

- ▶ alma mater – fuw.edu.pl:
 - ▶ MSc (2008) mikrofizyczne pomiary lotnicze chmur
 - ▶ PhD (2013) modelowanie mikrofizyki chmur
 - ▶ adiunkt (–2015): inżynieria oprogramowania CFD (github.com/igfuw)
- ▶ praca poza nauką:

Sylwester Arabas

- ▶ alma mater – fuw.edu.pl:
 - ▶ MSc (2008) mikrofizyczne pomiary lotnicze chmur
 - ▶ PhD (2013) modelowanie mikrofizyki chmur
 - ▶ adiunkt (–2015): inżynieria oprogramowania CFD (github.com/igfuw)
- ▶ praca poza nauką:
 - ▶ 2015–2017: Chatham Financial, Kraków

Sylwester Arabas

- ▶ alma mater – fuw.edu.pl:
 - ▶ MSc (2008) mikrofizyczne pomiary lotnicze chmur
 - ▶ PhD (2013) modelowanie mikrofizyki chmur
 - ▶ adiunkt (–2015): inżynieria oprogramowania CFD (github.com/igfuw)
- ▶ praca poza nauką:
 - ▶ 2015–2017: Chatham Financial, Kraków
 - ▶ 2017–2018: AETHON Engineering, Ateny

Sylwester Arabas

- ▶ alma mater – fuw.edu.pl:
 - ▶ MSc (2008) mikrofizyczne pomiary lotnicze chmur
 - ▶ PhD (2013) modelowanie mikrofizyki chmur
 - ▶ adiunkt (–2015): inżynieria oprogramowania CFD (github.com/igfuw)
- ▶ praca poza nauką:
 - ▶ 2015–2017: Chatham Financial, Kraków
 - ▶ 2017–2018: AETHON Enginering, Ateny
- ▶ powrót na uczelnię:

Sylwester Arabas

- ▶ alma mater – fuw.edu.pl:
 - ▶ MSc (2008) mikrofizyczne pomiary lotnicze chmur
 - ▶ PhD (2013) modelowanie mikrofizyki chmur
 - ▶ adiunkt (–2015): inżynieria oprogramowania CFD (github.com/igfuw)
- ▶ praca poza nauką:
 - ▶ 2015–2017: Chatham Financial, Kraków
 - ▶ 2017–2018: AETHON Enginering, Ateny
- ▶ powrót na uczelnię:
 - ▶ 2018–2021: postdok na WMiL UJ (FNP „POWROTY”)

Sylwester Arabas

- ▶ alma mater – fuw.edu.pl:
 - ▶ MSc (2008) mikrofizyczne pomiary lotnicze chmur
 - ▶ PhD (2013) modelowanie mikrofizyki chmur
 - ▶ adiunkt (–2015): inżynieria oprogramowania CFD (github.com/igfuw)
- ▶ praca poza nauką:
 - ▶ 2015–2017: Chatham Financial, Kraków
 - ▶ 2017–2018: AETHON Enginering, Ateny
- ▶ powrót na uczelnię:
 - ▶ 2018–2021: postdok na WMiL UJ (FNP „POWROTY”)
 - ▶ 2021–2022: postdok na U. Illinois Urbana-Champaign

Sylwester Arabas

- ▶ alma mater – fuw.edu.pl:
 - ▶ MSc (2008) mikrofizyczne pomiary lotnicze chmur
 - ▶ PhD (2013) modelowanie mikrofizyki chmur
 - ▶ adiunkt (–2015): inżynieria oprogramowania CFD (github.com/igfuw)
- ▶ praca poza nauką:
 - ▶ 2015–2017: Chatham Financial, Kraków
 - ▶ 2017–2018: AETHON Enginering, Ateny
- ▶ powrót na uczelnie:
 - ▶ 2018–2021: postdok na WMiL UJ (FNP „POWROTY”)
 - ▶ 2021–2022: postdok na U. Illinois Urbana-Champaign
 - ▶ 2022–2024: grant NCN „SONATA” w Krakowie

- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Modelowanie mikrofizyki chmur
- Symulacje Monte-Carlo zderzeń kropel
- Pakiet oprogramowania PySDM

Plan prezentacji

- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Modelowanie mikrofizyki chmur
- Symulacje Monte-Carlo zderzeń kropel
- Pakiet oprogramowania PySDM

Oddziaływanie aerosol – chmury – opad: wybrane procesy



- ▶ aktywacja kropelek na aerosolu
- ▶ kondensacja

Oddziaływanie aerozol – chmury – opad: wybrane procesy



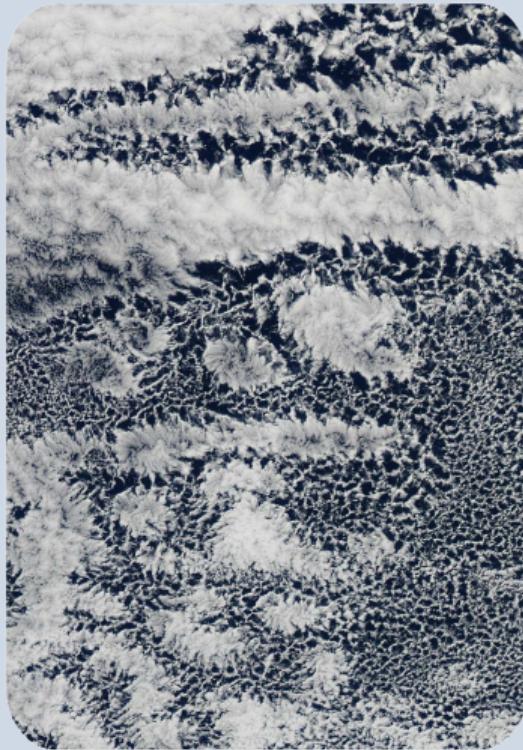
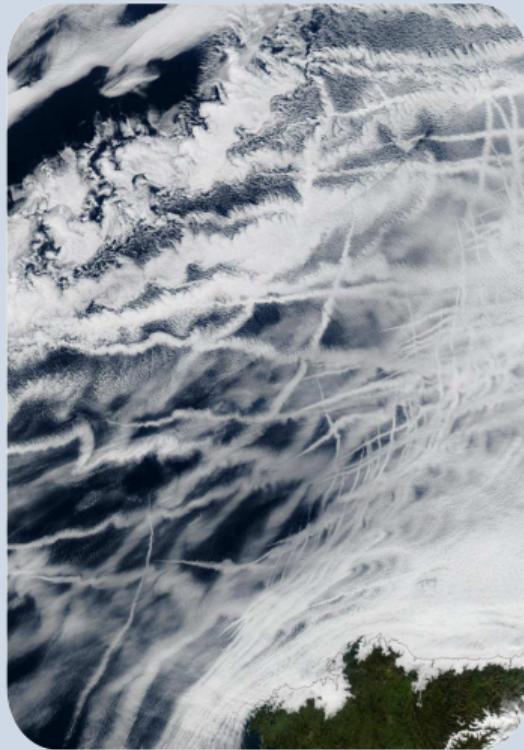
- ▶ aktywacja kropelek na aerozolu
- ▶ kondensacja
- ▶ zderzenia pomiędzy kropelkami
- ▶ procesy chemiczne zachodzące w kropelkach

Oddziaływanie aerozol – chmury – opad: wybrane procesy

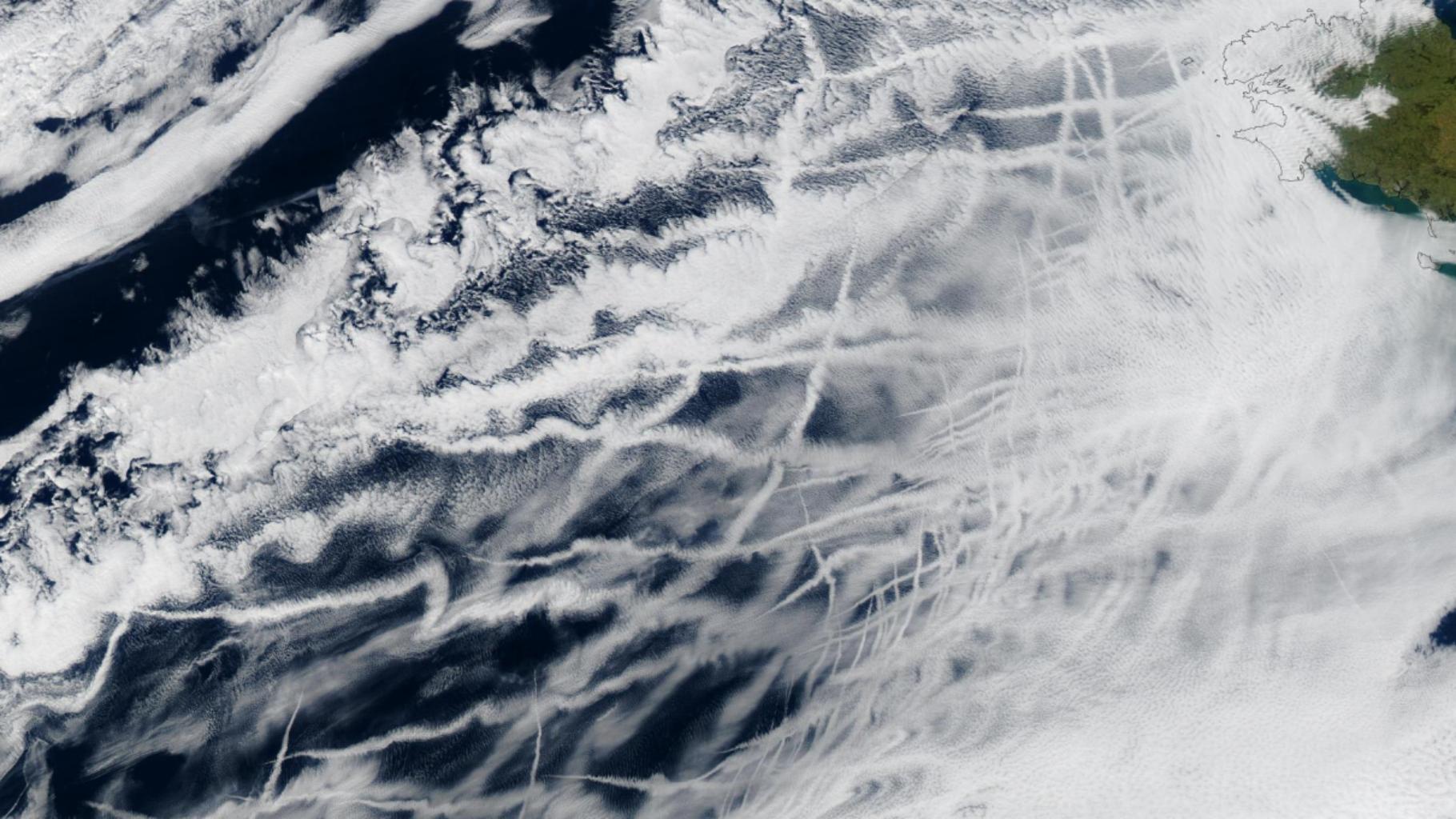


- ▶ aktywacja kropelek na aerozolu
- ▶ kondensacja
- ▶ zderzenia pomiędzy kropelkami
- ▶ procesy chemiczne zachodzące w kropelkach
- ▶ opad
- ▶ wymywanie aerozolu
- ▶ odparowywanie kropelek

Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: przykłady

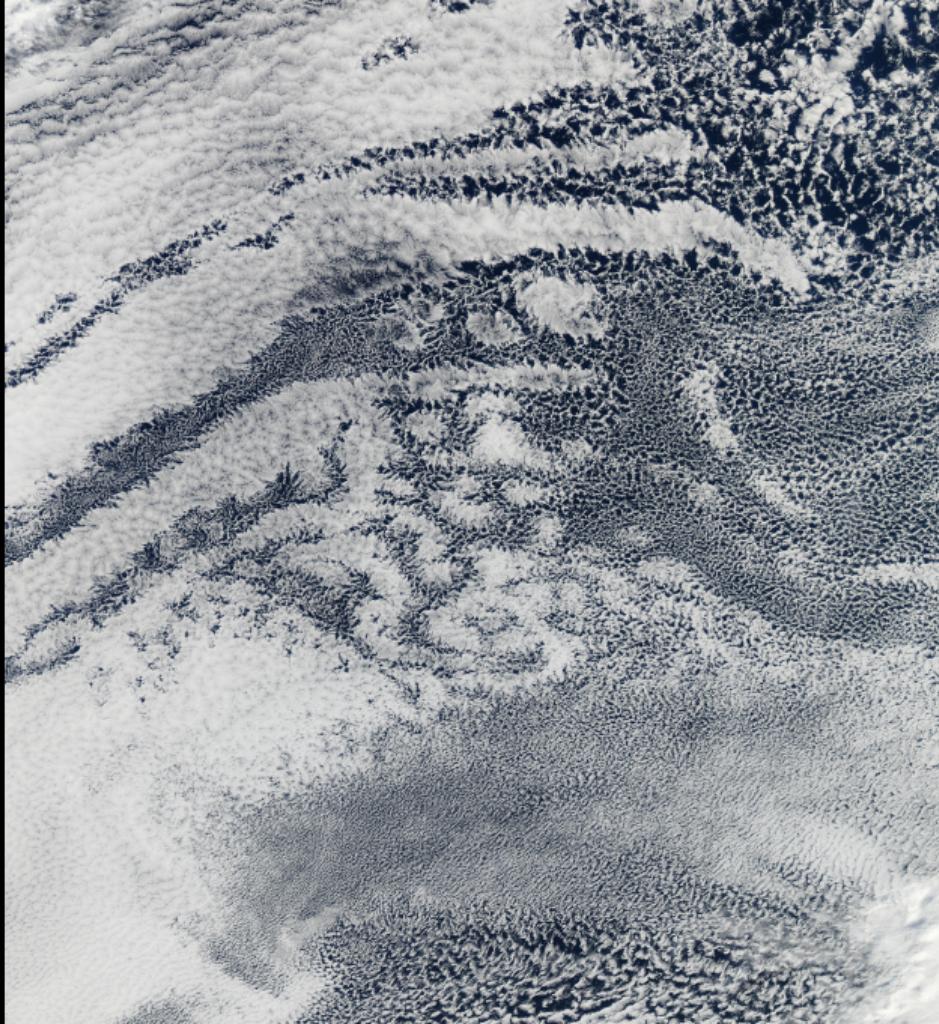


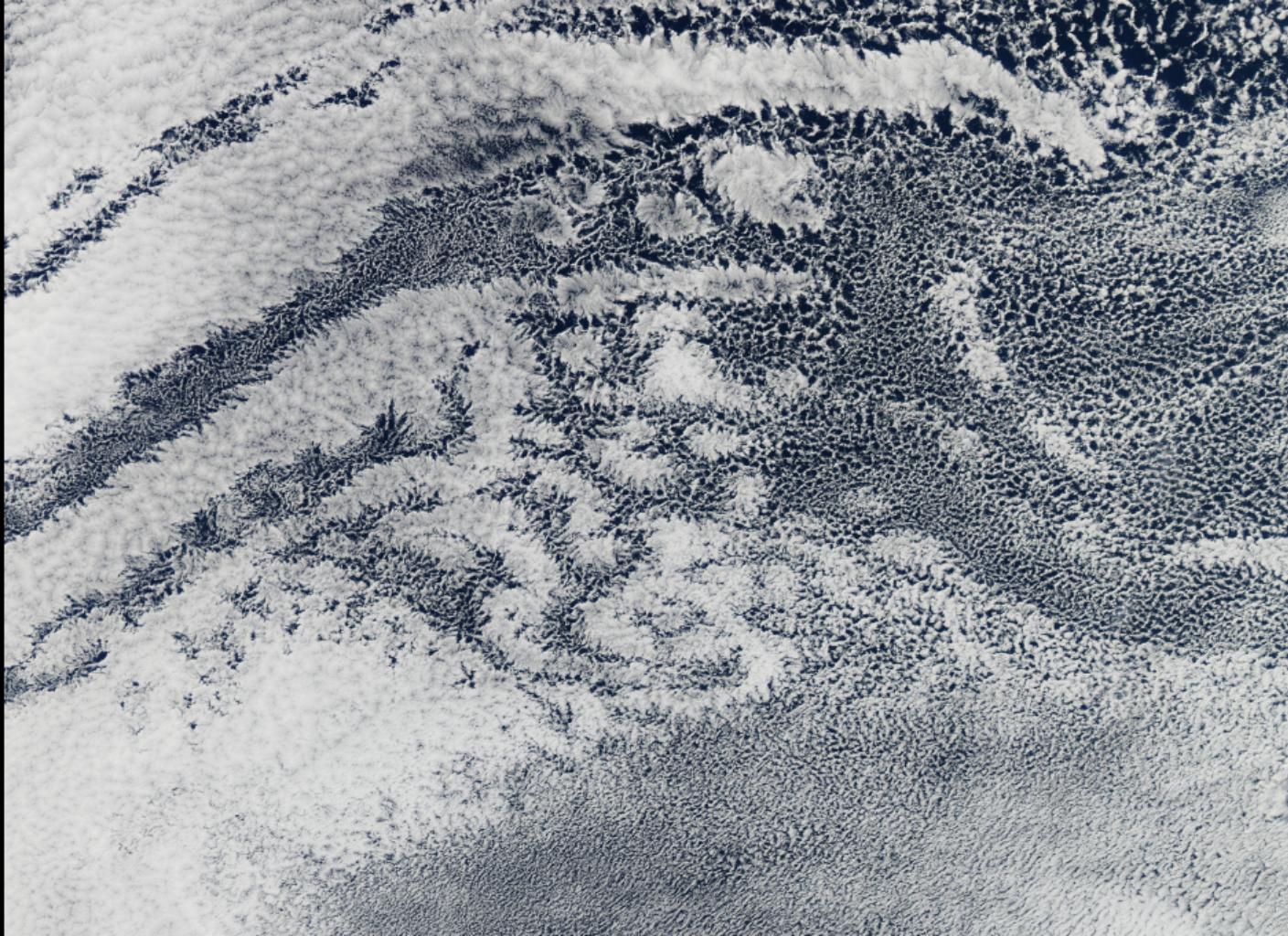
źródło: NASA (27 I 2003 – Zatoka Biskajska; 17 IV 2010 – Pacyfik u wybrzeży Peru)

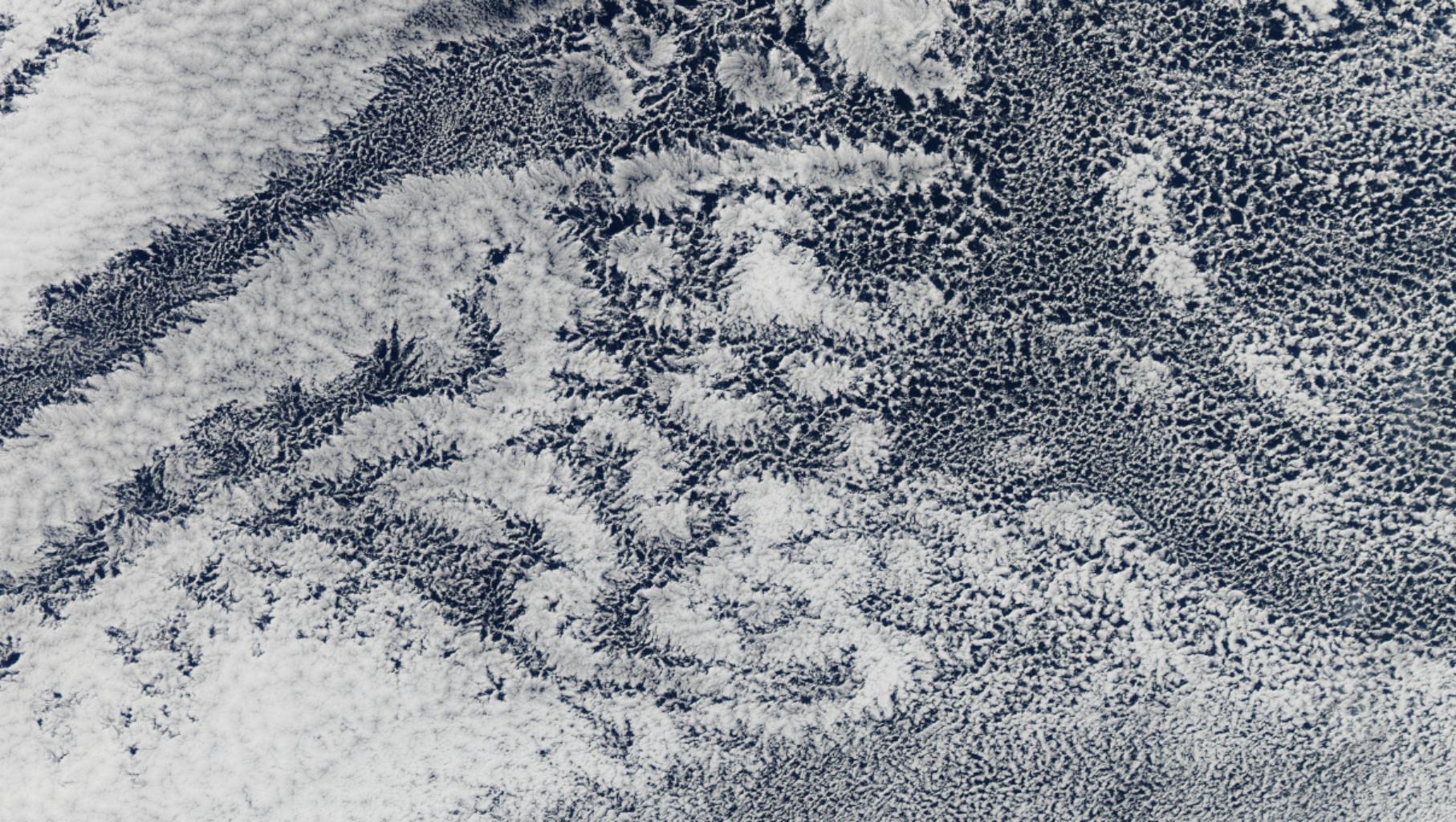


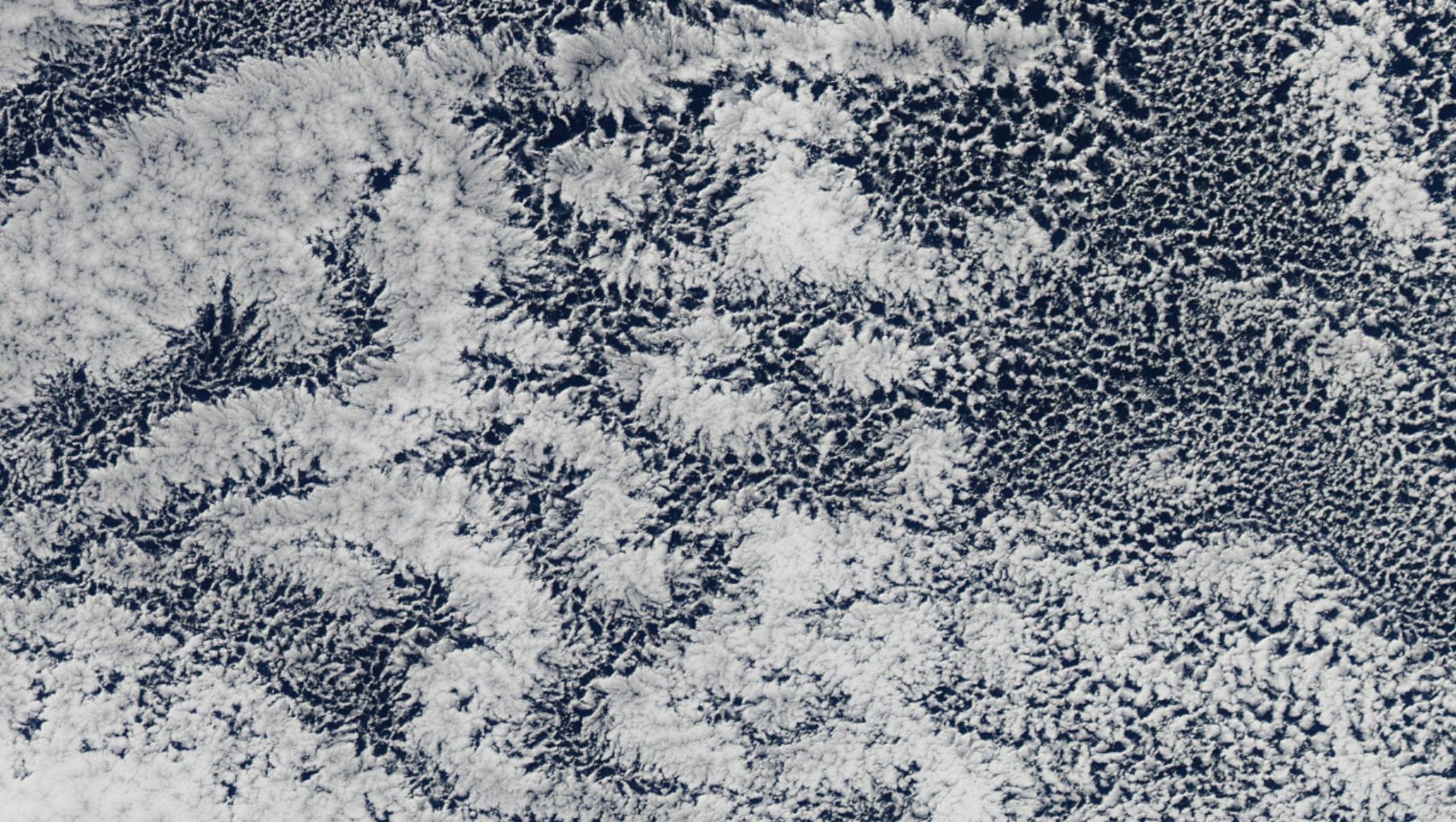


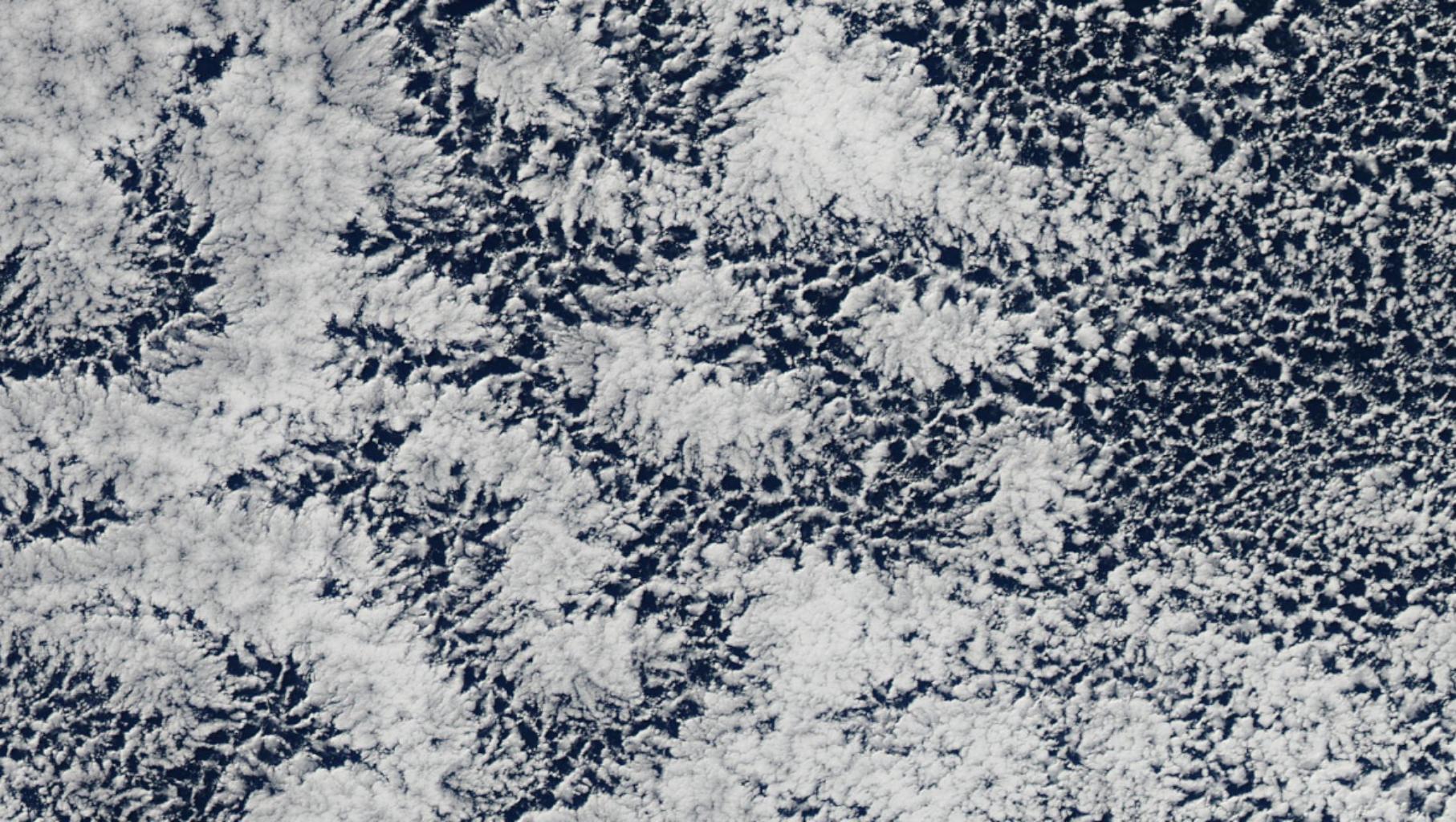
źródło: NASA

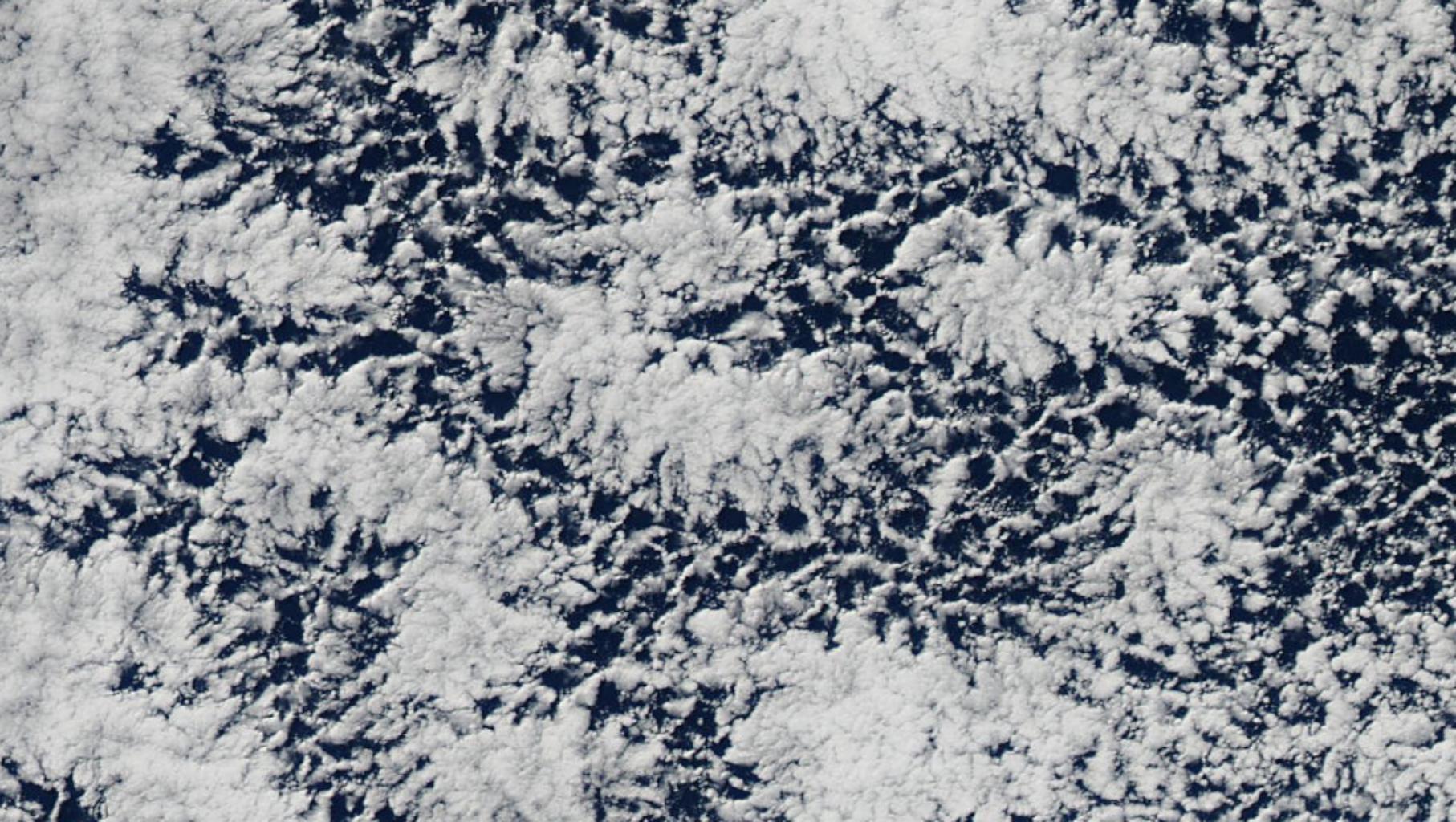




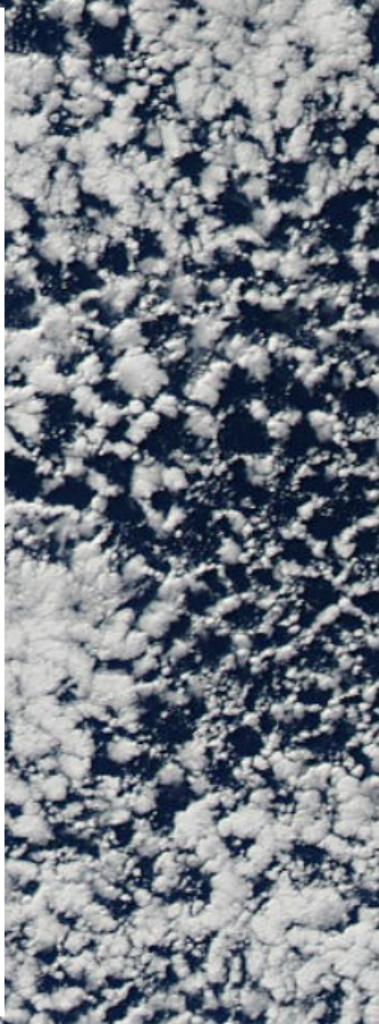
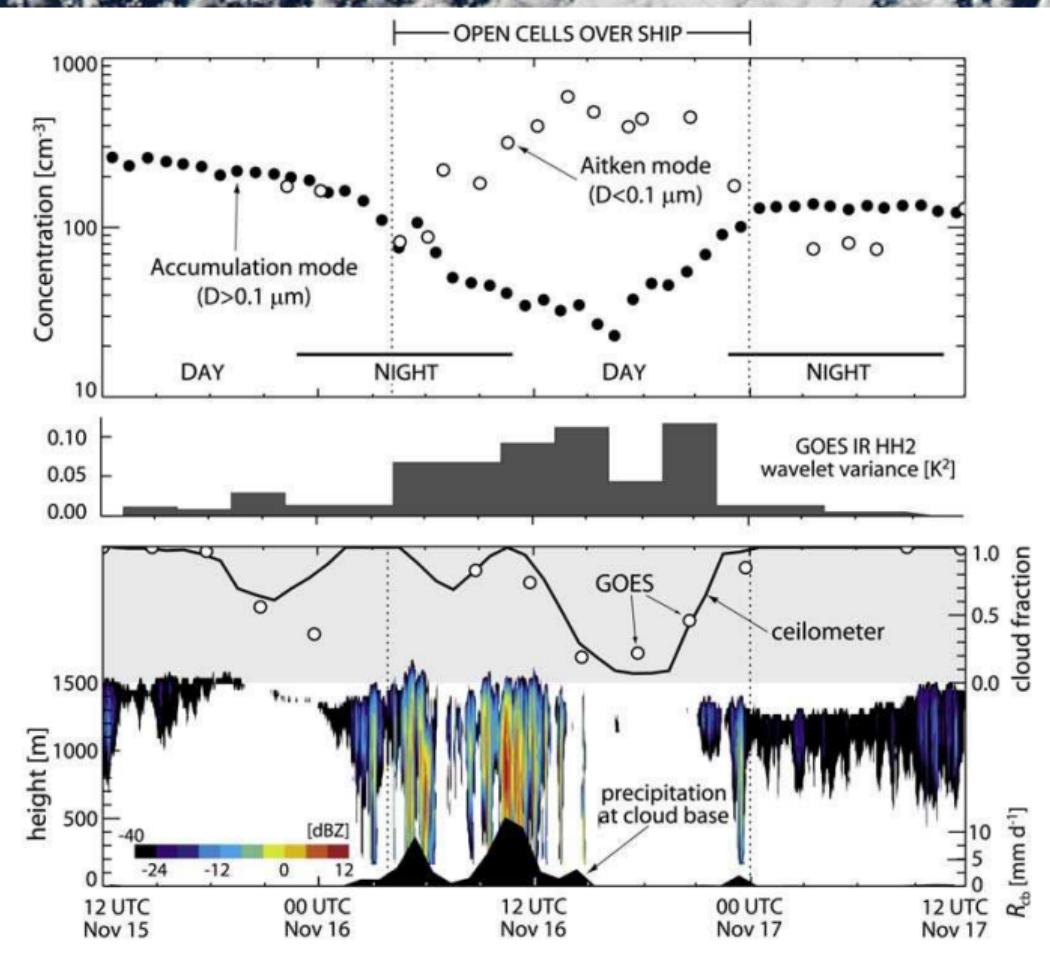










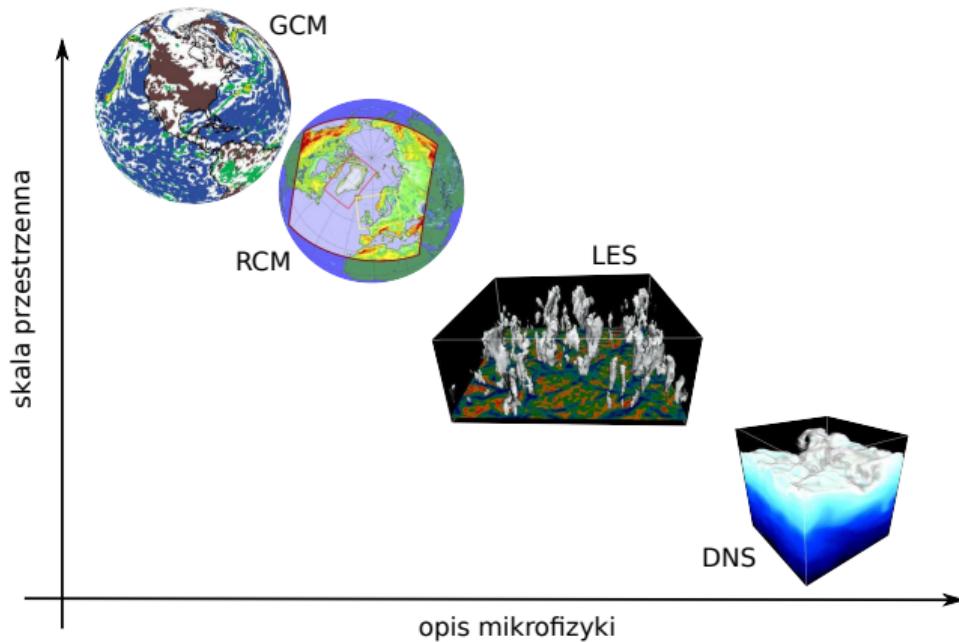


- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Modelowanie mikrofizyki chmur
- Symulacje Monte-Carlo zderzeń kropel
- Pakiet oprogramowania PySDM

Plan prezentacji

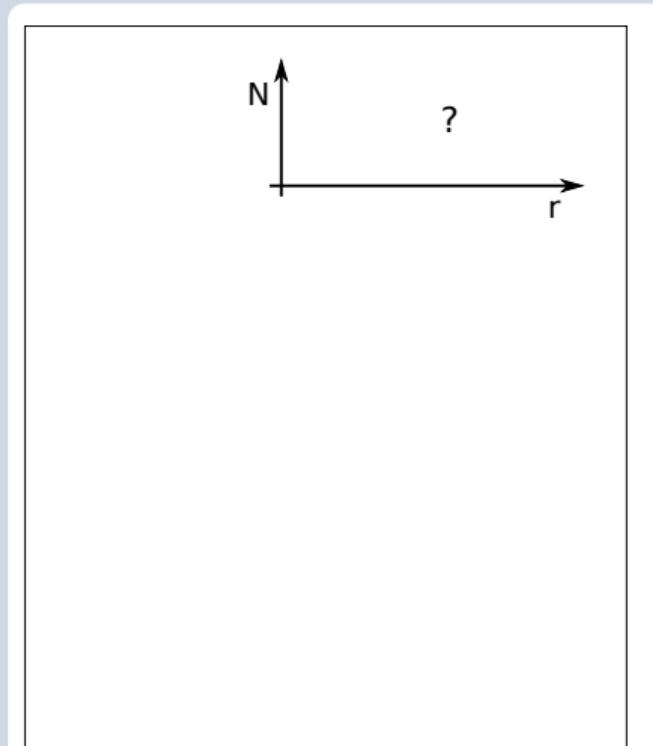
- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Modelowanie mikrofizyki chmur
- Symulacje Monte-Carlo zderzeń kropel
- Pakiet oprogramowania PySDM

Reprezentacja mikrofizyki a skala modeli



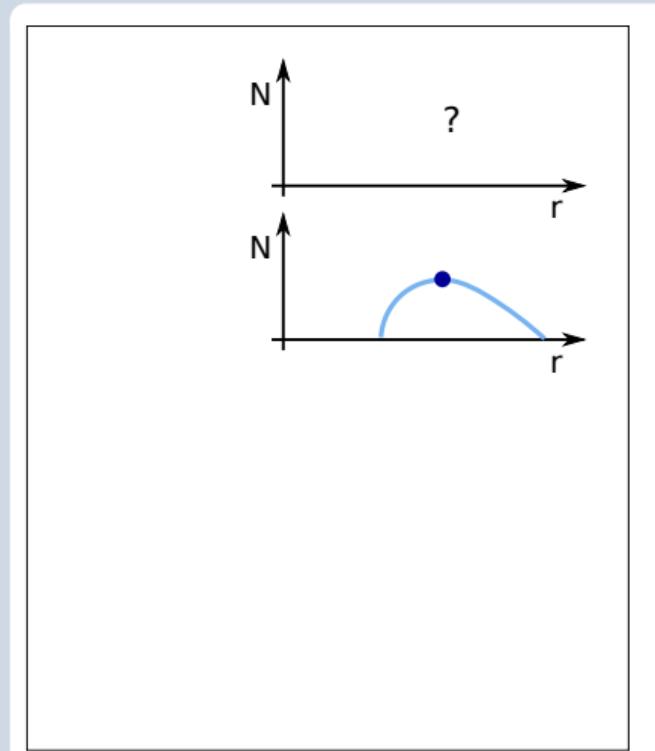
Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

- ▶ opis zgrubny jedno-momentowy (bulk)



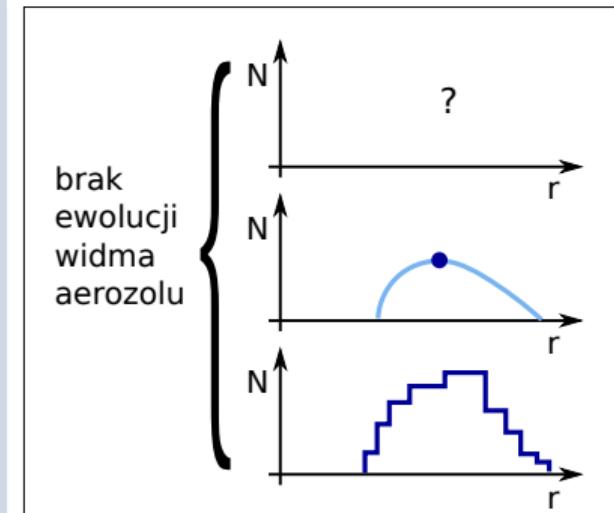
Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

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



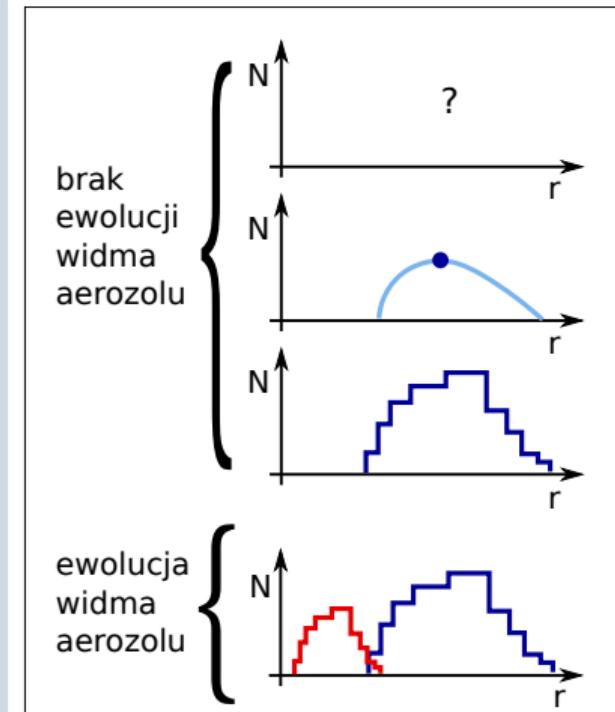
Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

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



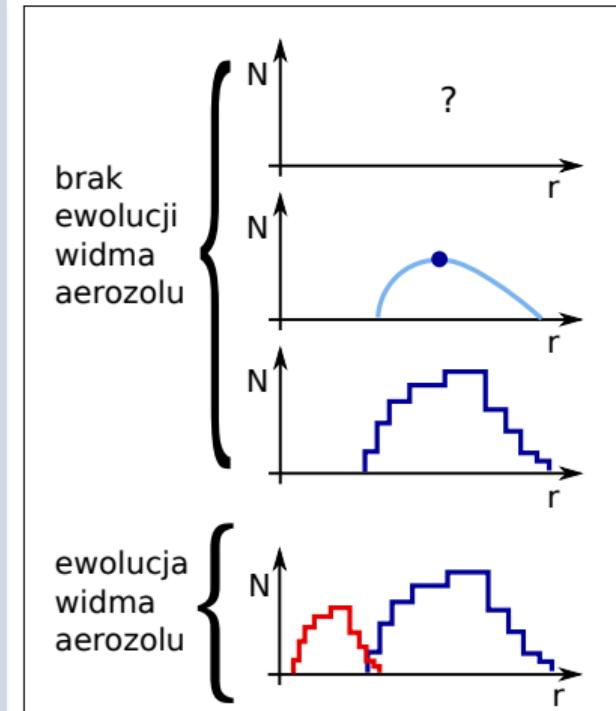
Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

- ▶ 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**

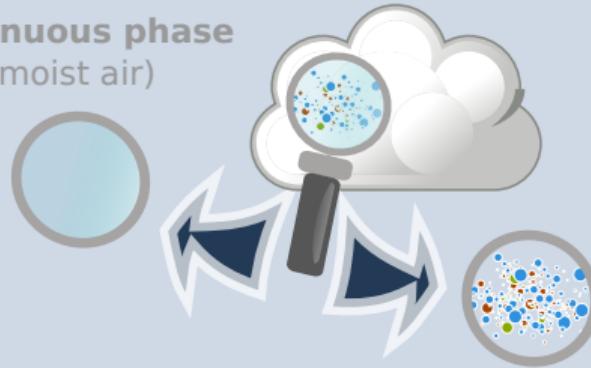


μ -fizyka: opis eulerowski a lagranżowski



μ -fizyka: opis eulerowski a lagranżowski

continuous phase
(moist air)

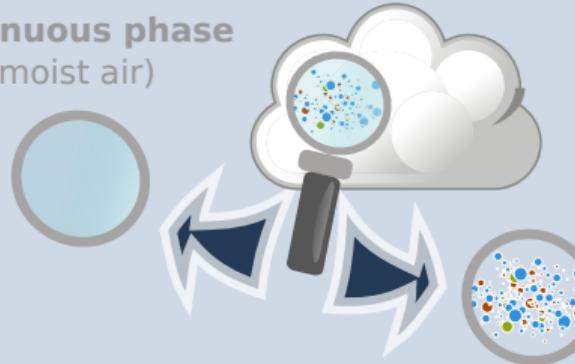


dispersed phase

(aerosol particles, cloud droplets, drizzle, rain, snow, ...)

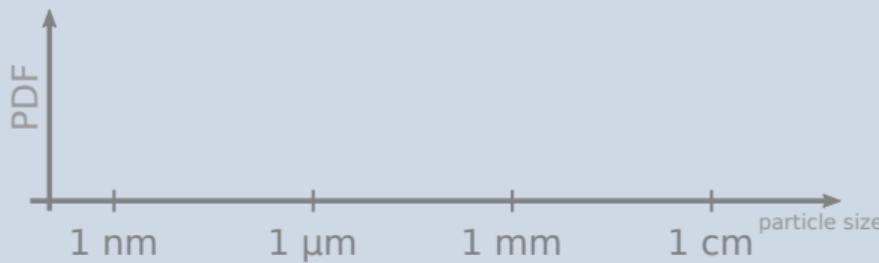
μ -fizyka: opis eulerowski a lagranżowski

continuous phase
(moist air)

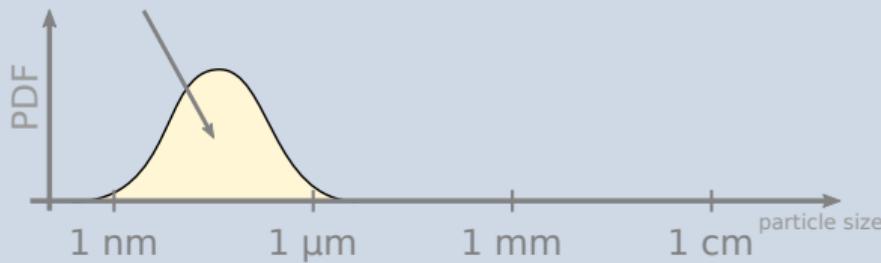
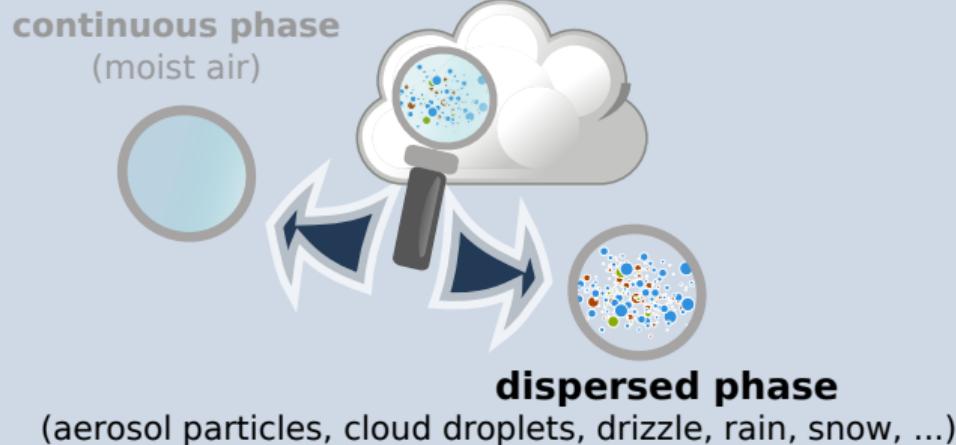


dispersed phase

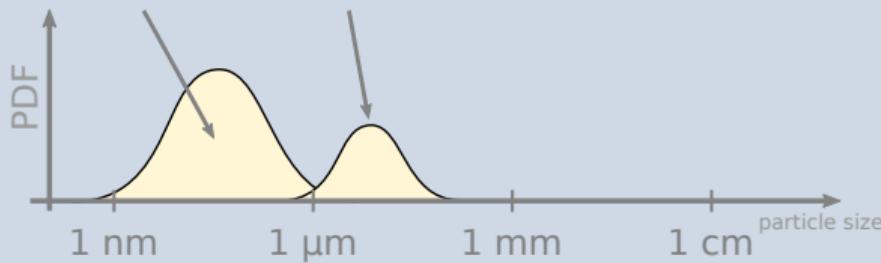
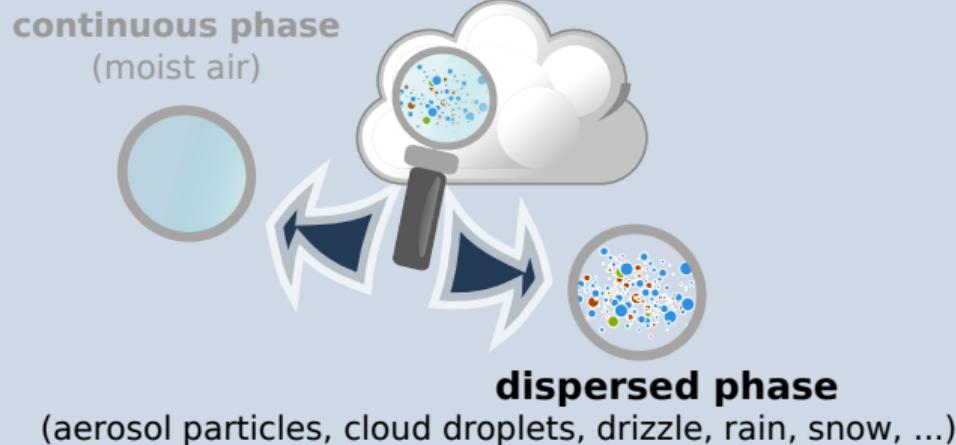
(aerosol particles, cloud droplets, drizzle, rain, snow, ...)



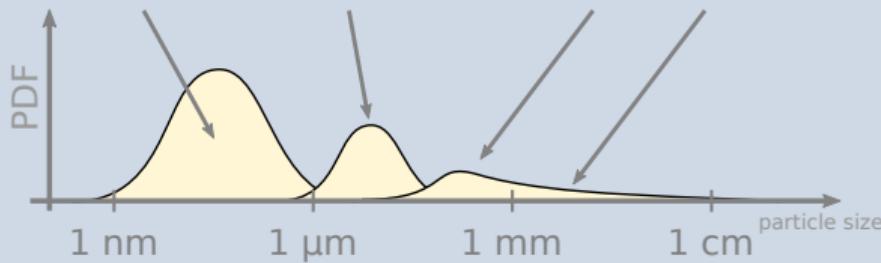
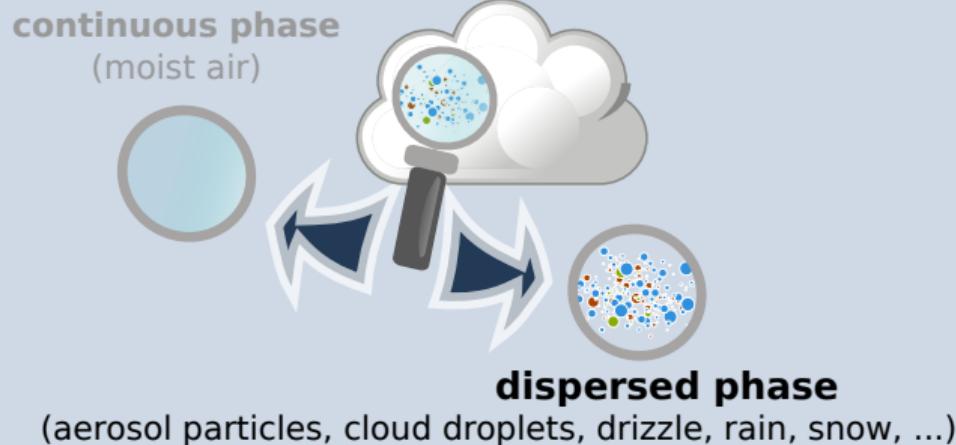
μ -fizyka: opis eulerowski a lagranżowski



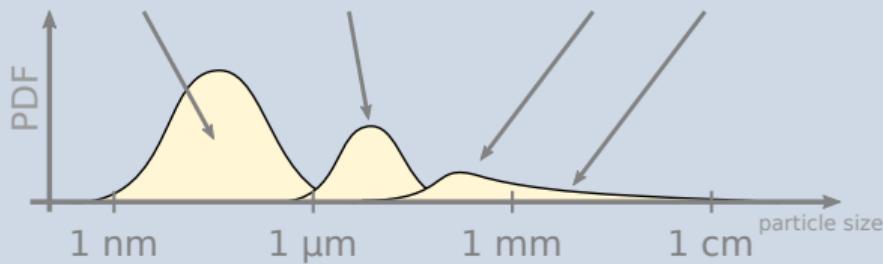
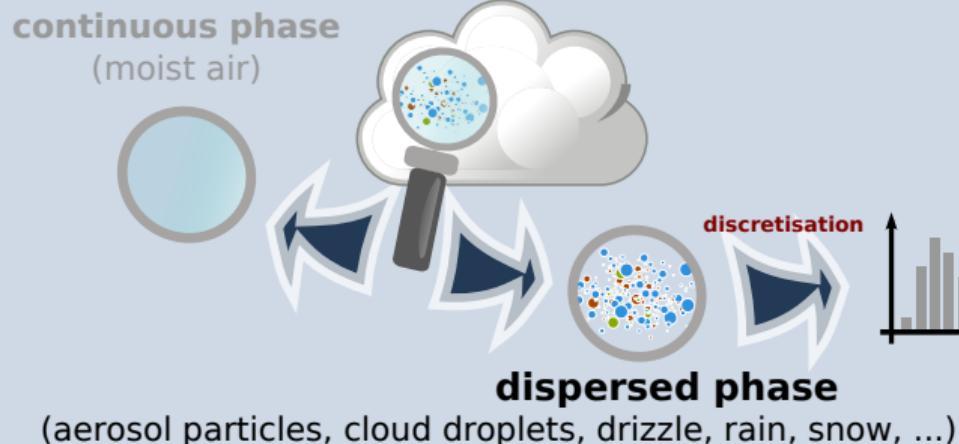
μ -fizyka: opis eulerowski a lagranżowski



μ -fizyka: opis eulerowski a lagranżowski



μ -fizyka: opis eulerowski a lagranżowski



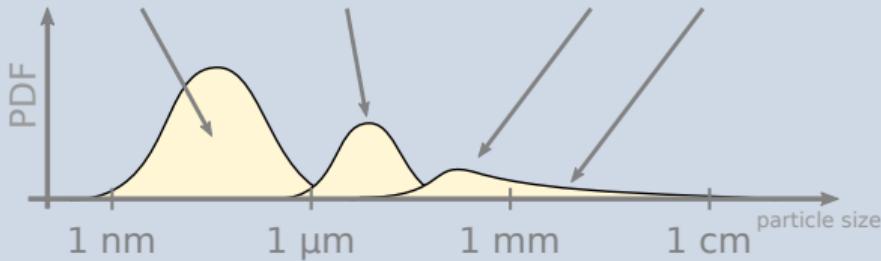
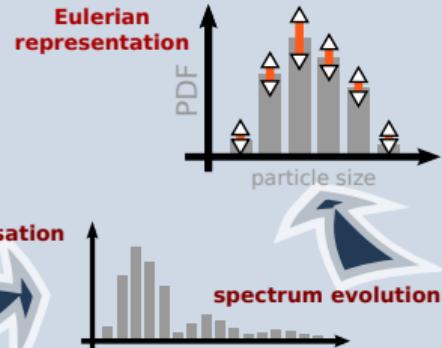
μ -fizyka: opis eulerowski a lagranżowski

continuous phase
(moist air)



dispersed phase

(aerosol particles, cloud droplets, drizzle, rain, snow, ...)

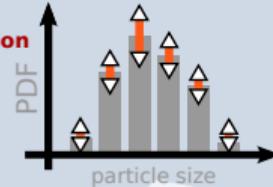


μ -fizyka: opis eulerowski a lagranżowski

continuous phase
(moist air)



Eulerian representation

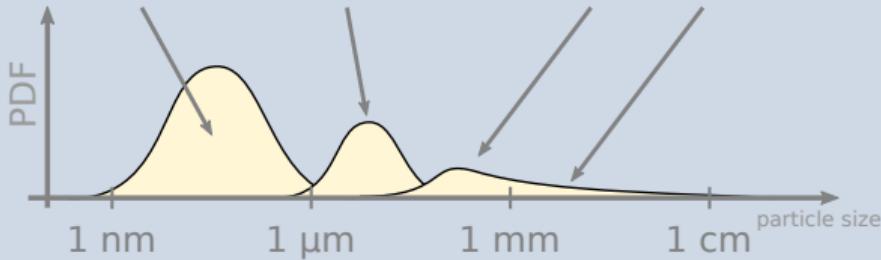


discretisation

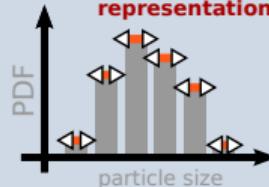


spectrum evolution

dispersed phase
(aerosol particles, cloud droplets, drizzle, rain, snow, ...)



Lagrangian representation

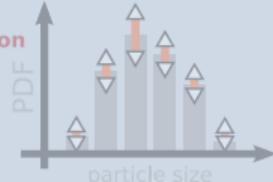


μ -fizyka: opis eulerowski a lagranżowski

continuous phase
(moist air)



Eulerian representation



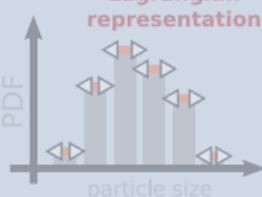
discretisation

spectrum evolution

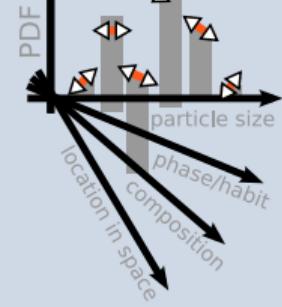
dispersed phase
(aerosol particles, cloud droplets, drizzle, rain, snow, ...)



Lagrangian representation



(super-)particle-based representation

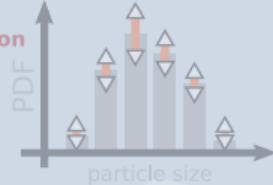


μ -fizyka: opis eulerowski a lagranżowski

continuous phase
(moist air)



Eulerian representation



discretisation



spectrum evolution

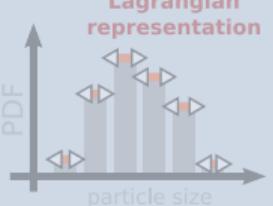


dispersed phase

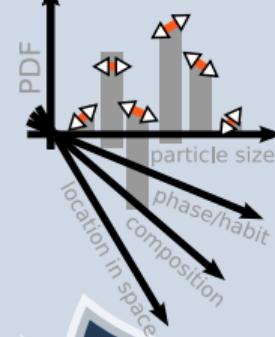
(aerosol particles, cloud droplets, drizzle, rain, snow, ...)



Lagrangian representation



(super-)particle-based representation

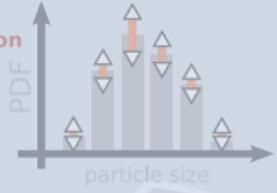


μ -fizyka: opis eulerowski a lagranżowski

continuous phase
(moist air)



Eulerian representation



discretisation



spectrum evolution

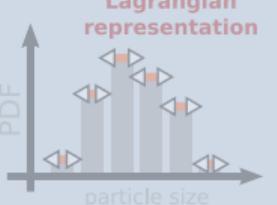


dispersed phase

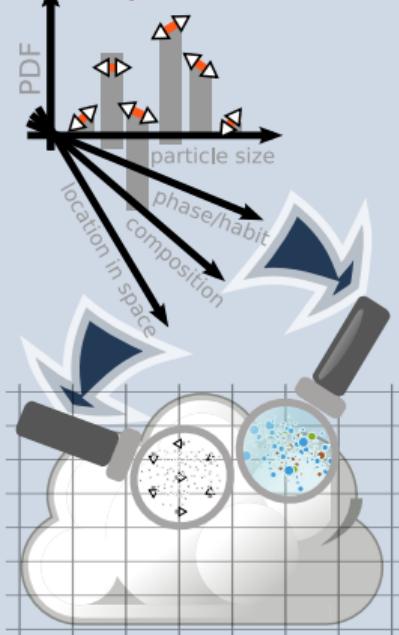
(aerosol particles, cloud droplets, drizzle, rain, snow, ...)



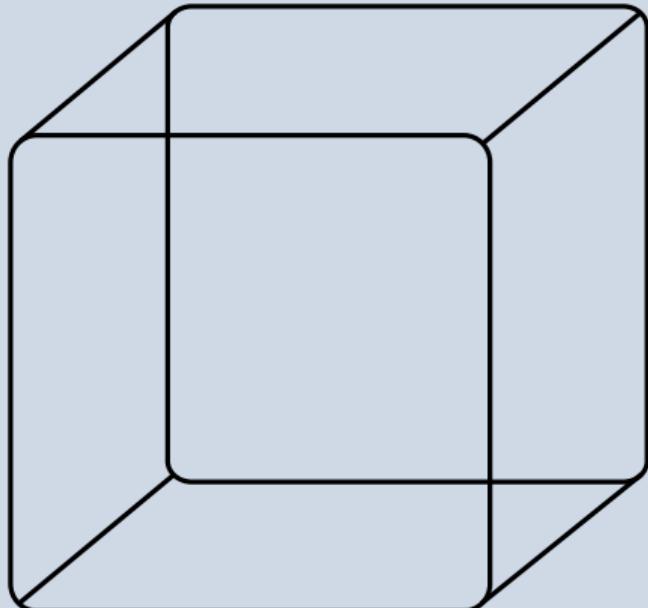
Lagrangian representation



(super-)particle-based representation

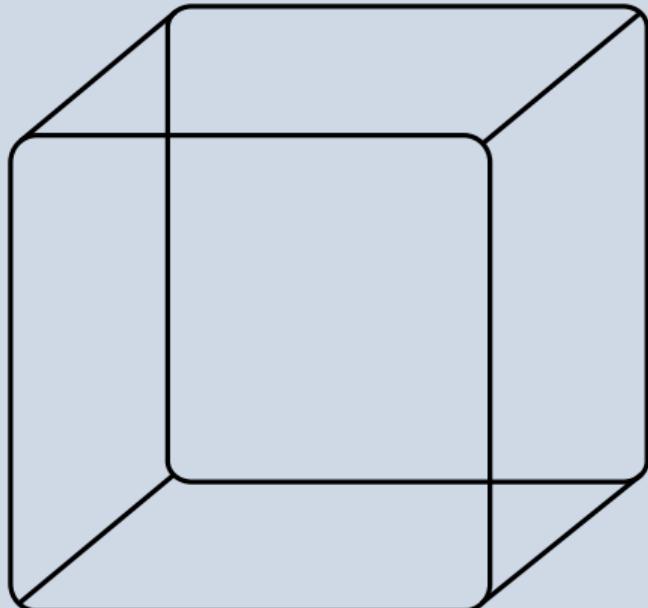


Lagranżowski opis mikrofizyki krok po kroku



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

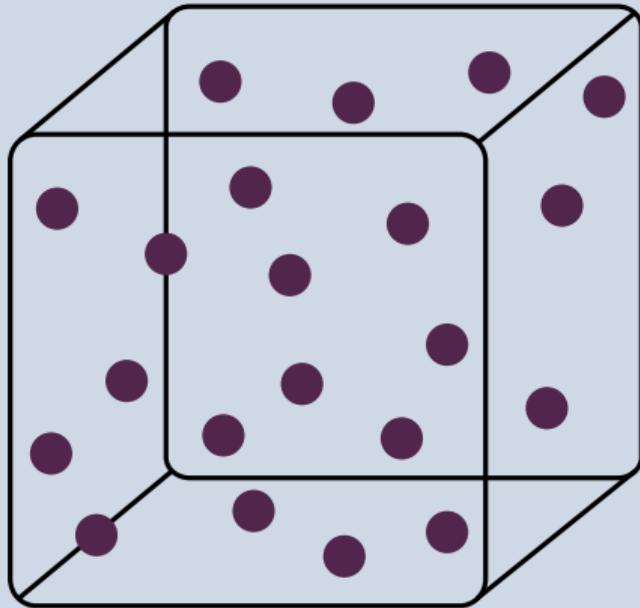
Lagranżowski opis mikrofizyki krok po kroku



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

Można im przypisywać atrybuty:

Lagranżowski opis mikrofizyki krok po kroku

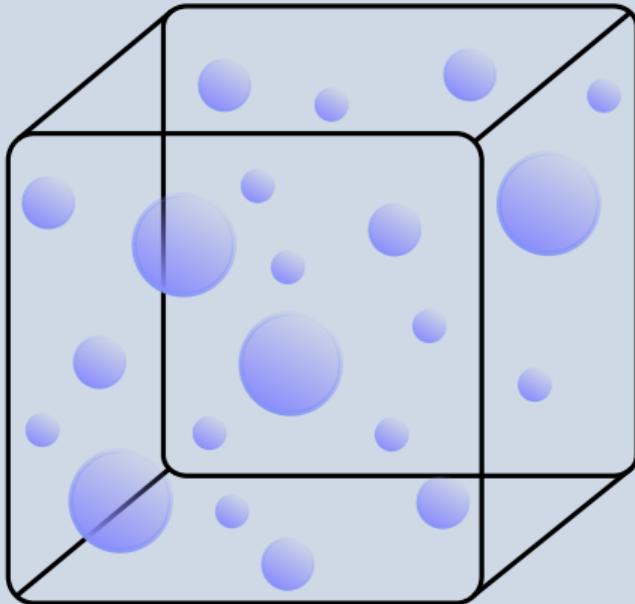


W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie

Lagranżowski opis mikrofizyki krok po kroku

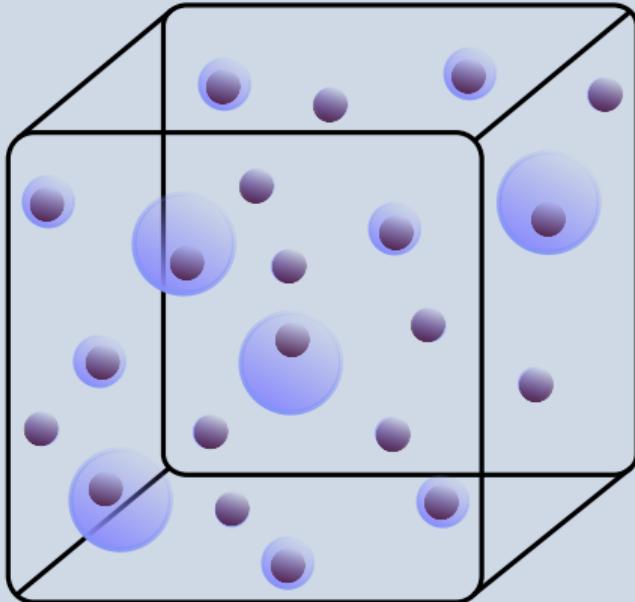


W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie
- ▶ promień mokry

Lagranżowski opis mikrofizyki krok po kroku

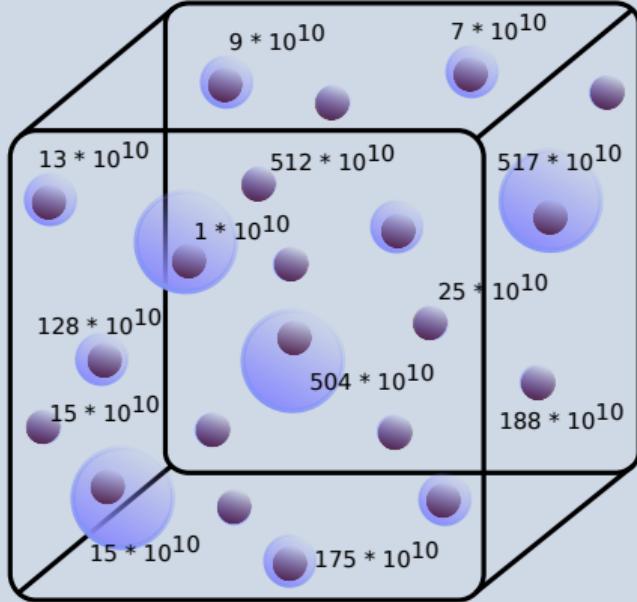


W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie
- ▶ promień mokry
- ▶ promień suchy

Lagranżowski opis mikrofizyki krok po kroku

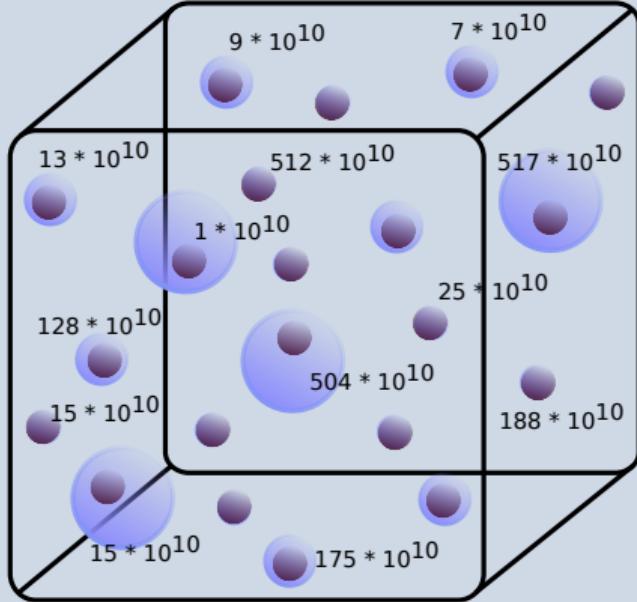


W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

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

Lagranżowski opis mikrofizyki krok po kroku

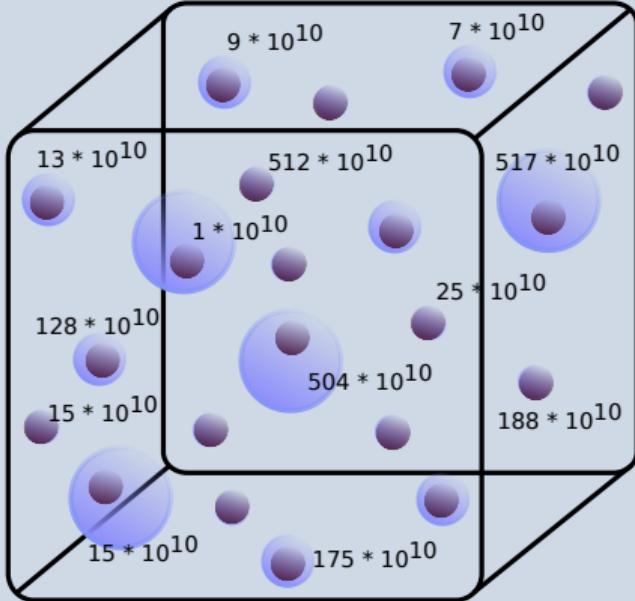


W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

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

Lagranżowski opis mikrofizyki krok po kroku



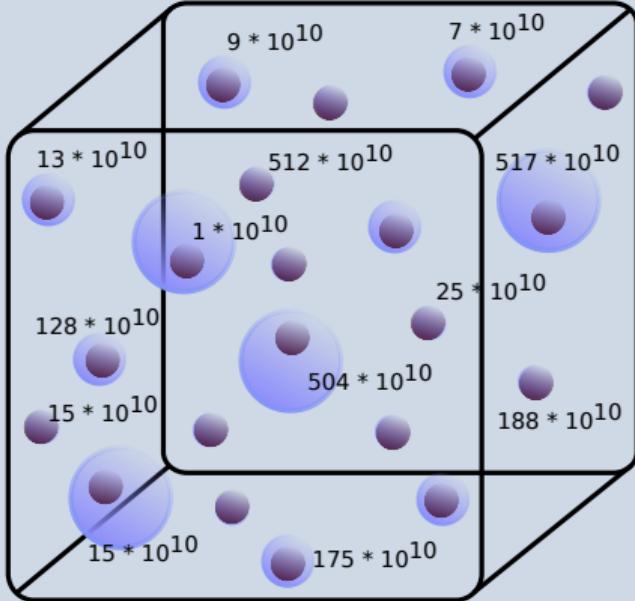
W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

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

Łatwość dodawania kolejnych atrybutów

Lagranżowski opis mikrofizyki krok po kroku



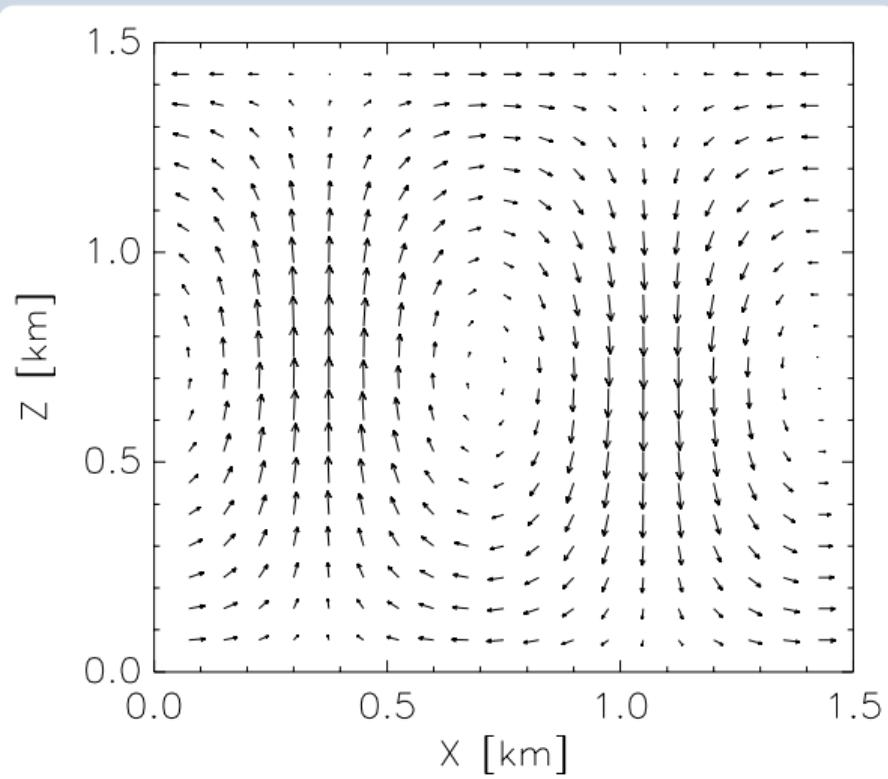
W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

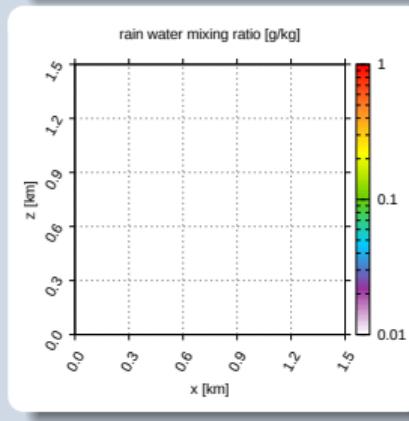
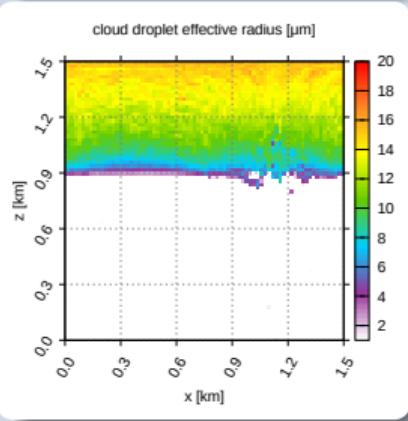
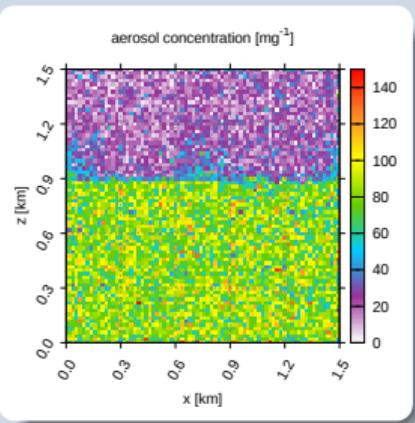
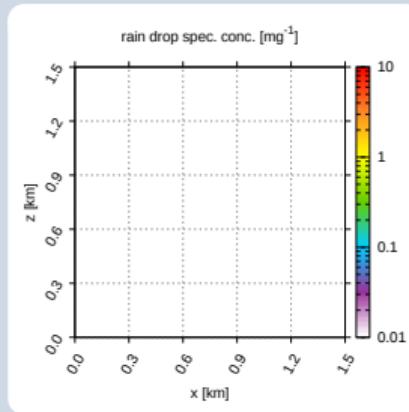
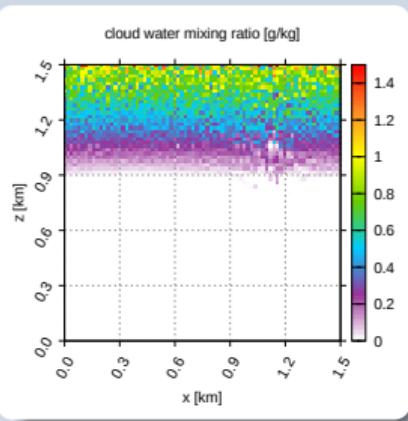
- ▶ położenie
- ▶ promień mokry
- ▶ promień suchy
- ▶ krotność
- ▶ ...

Łatwość dodawania kolejnych atrybutów (np. przy opisie reakcji chemicznych czy procesów zależnych od składu izotopowego)

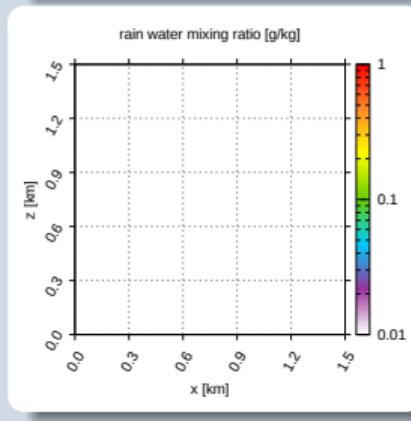
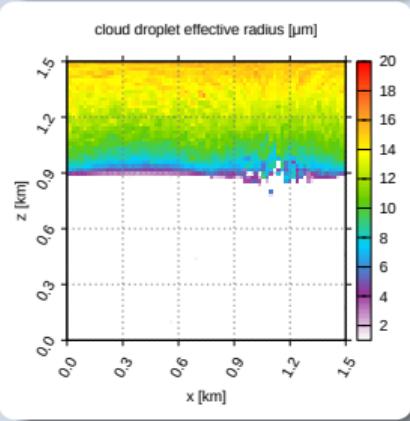
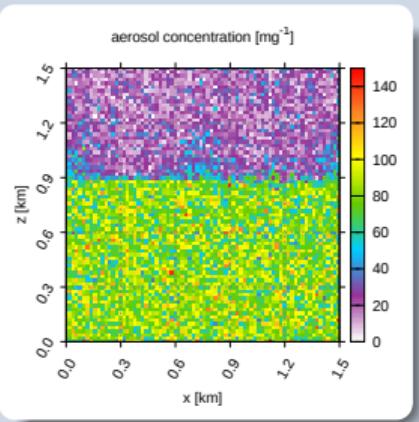
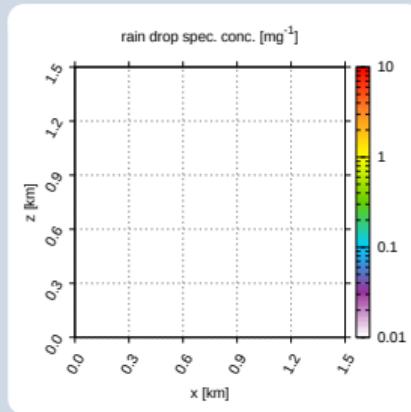
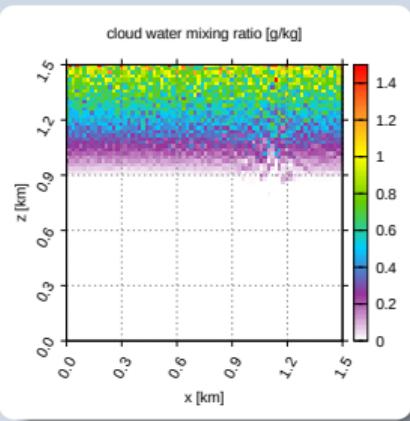
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



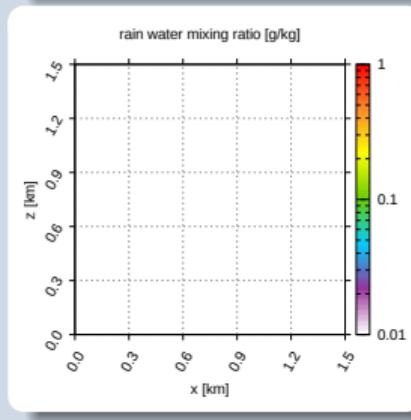
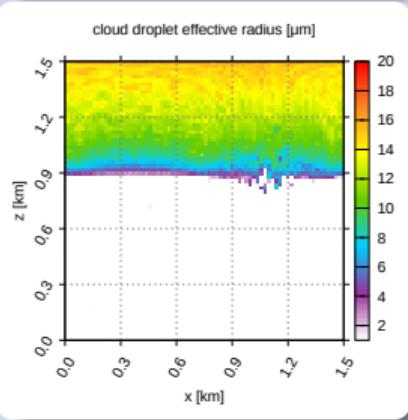
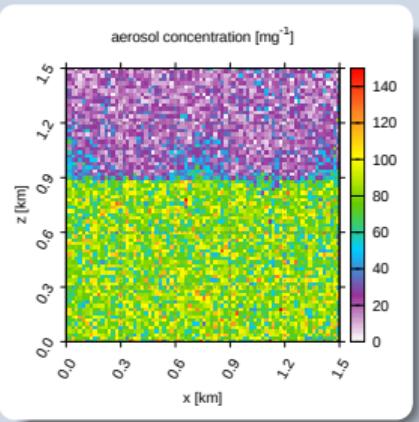
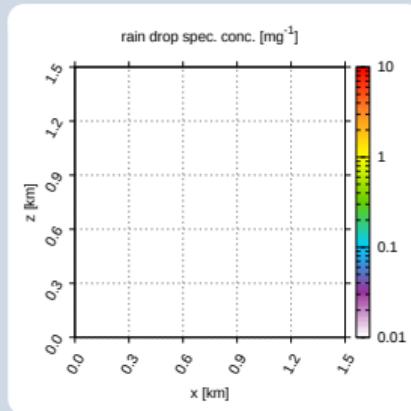
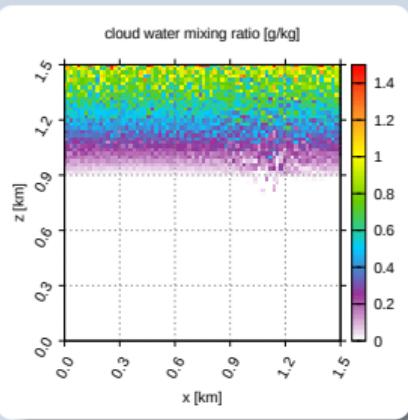
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



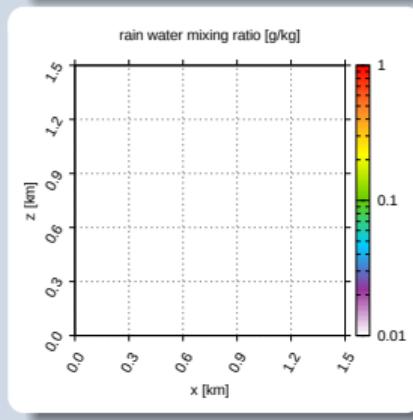
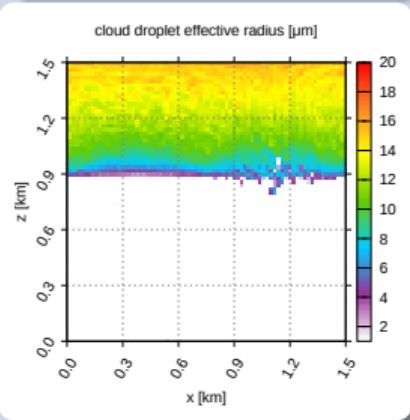
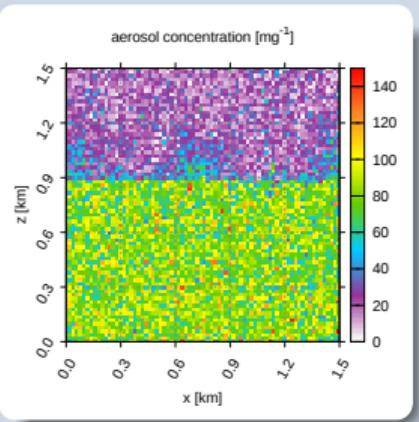
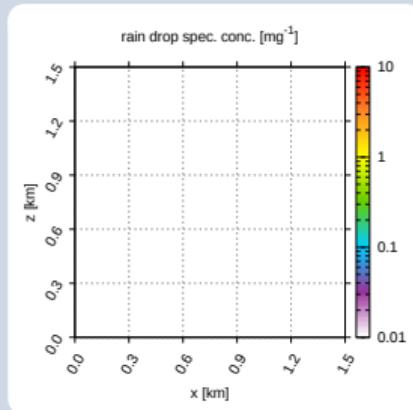
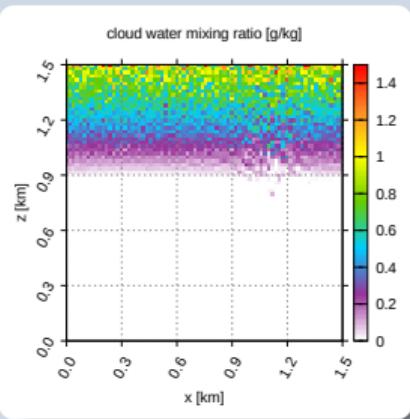
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



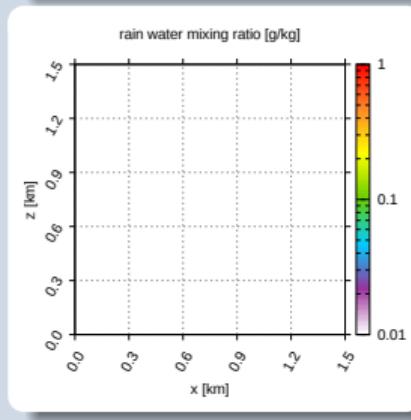
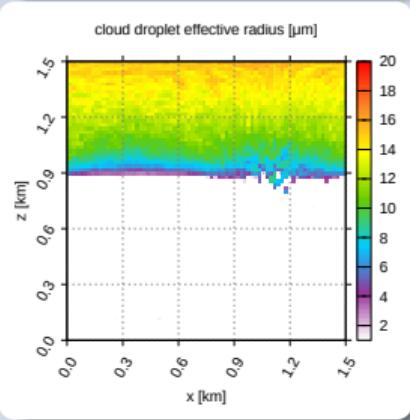
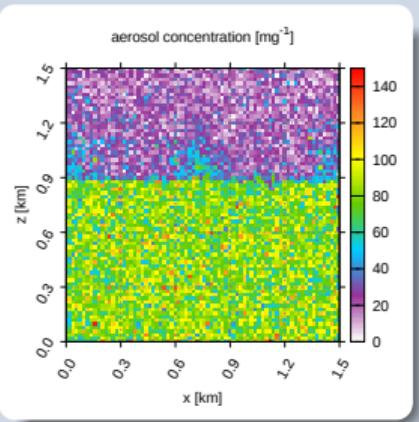
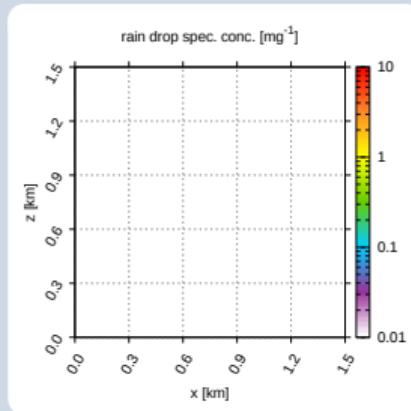
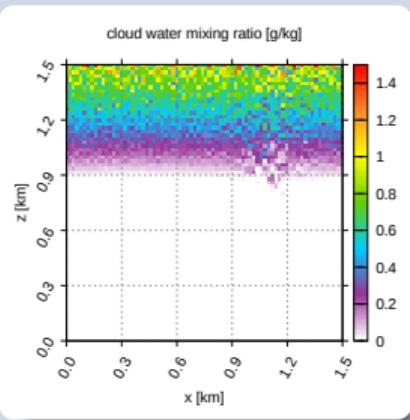
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



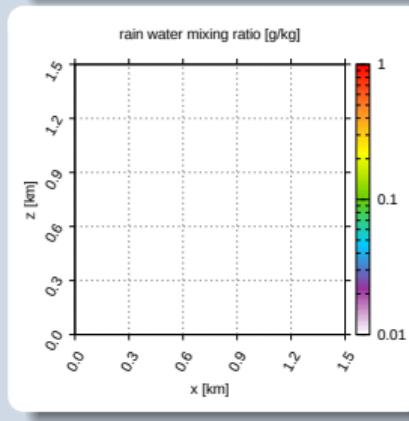
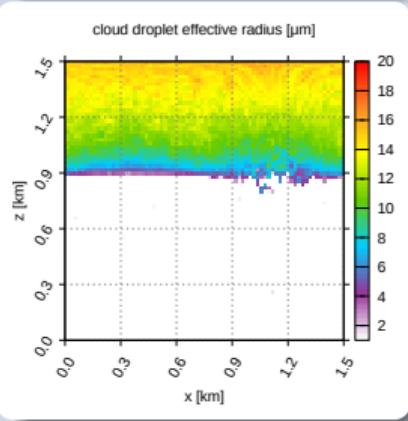
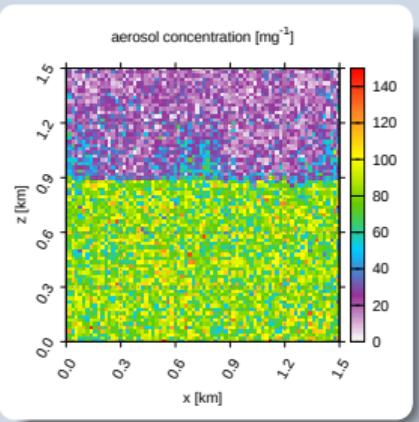
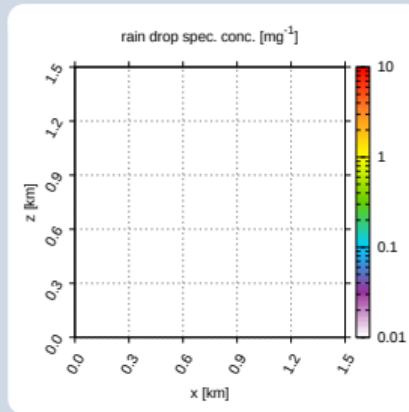
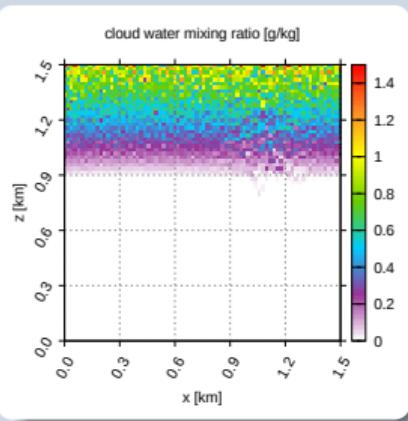
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



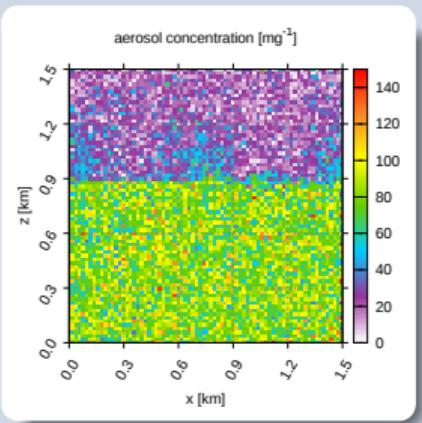
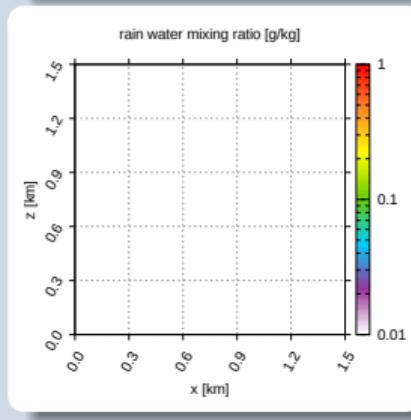
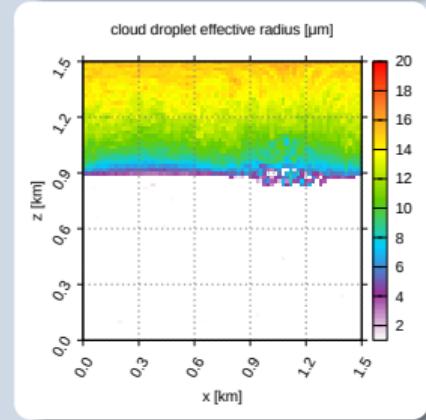
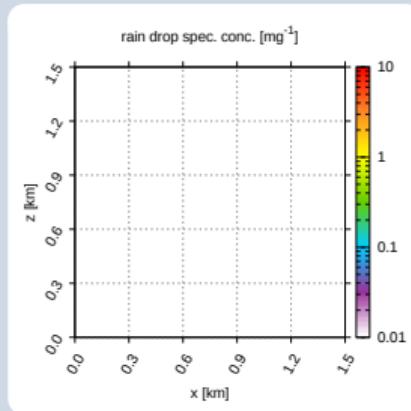
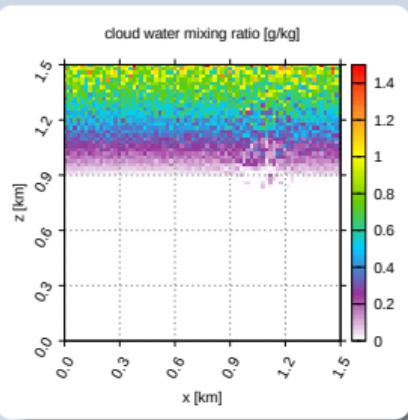
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



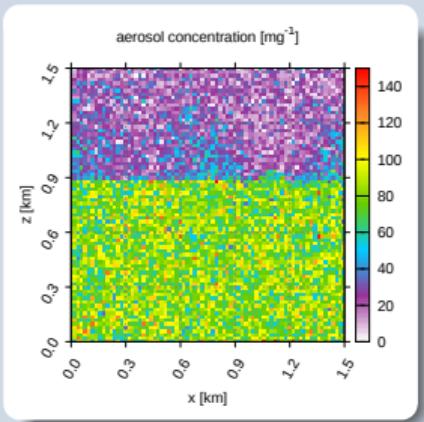
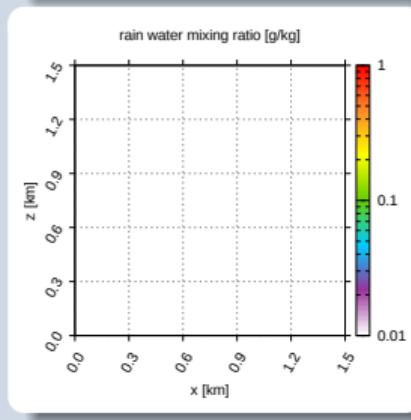
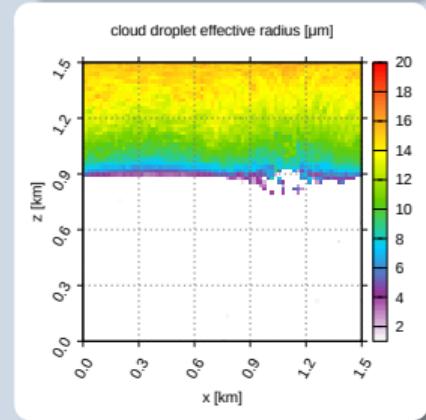
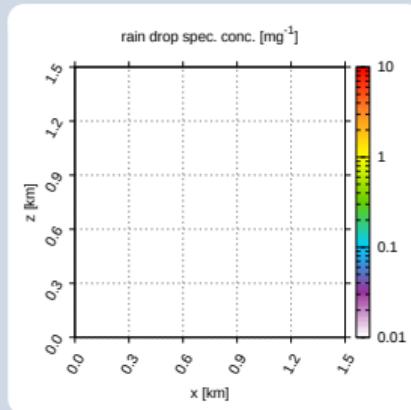
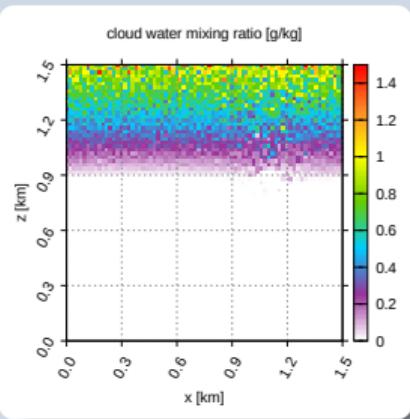
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



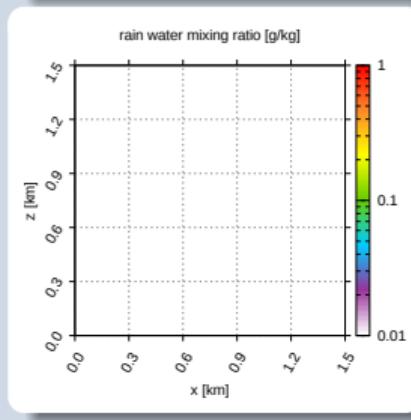
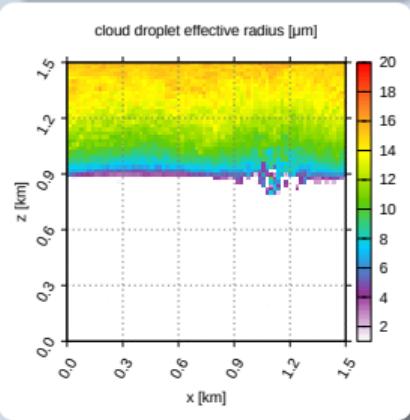
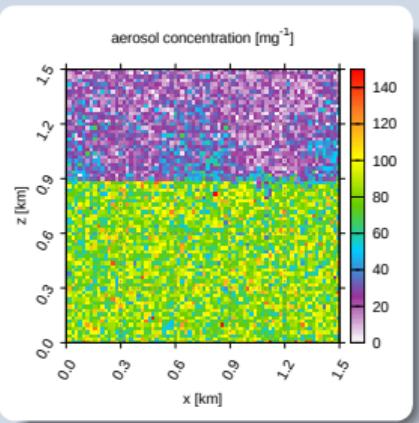
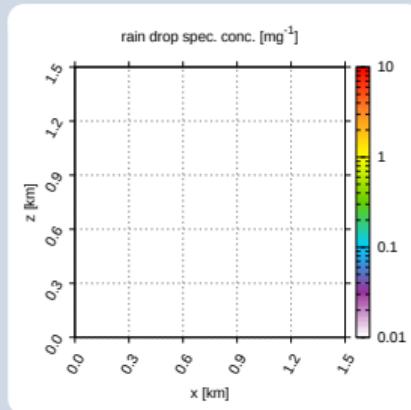
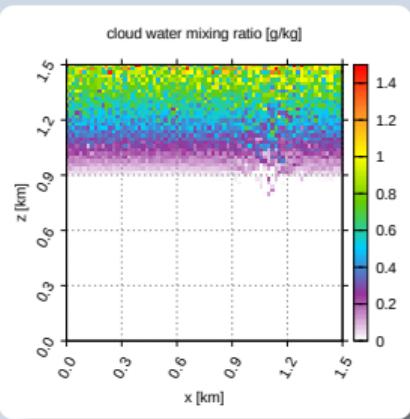
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



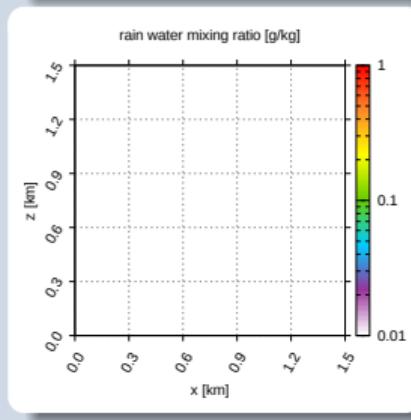
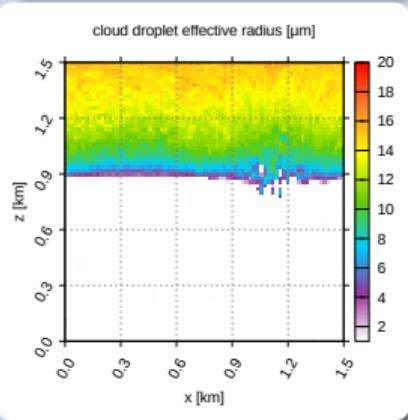
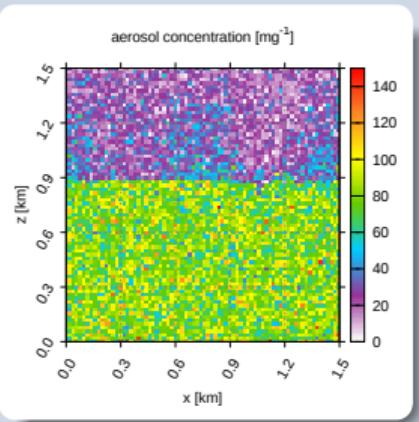
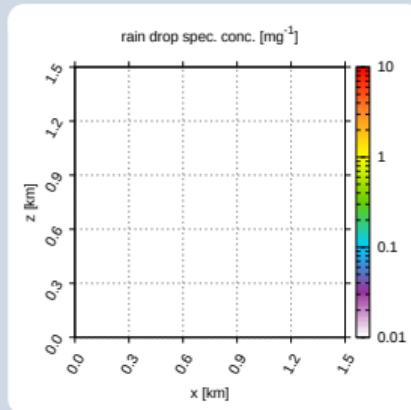
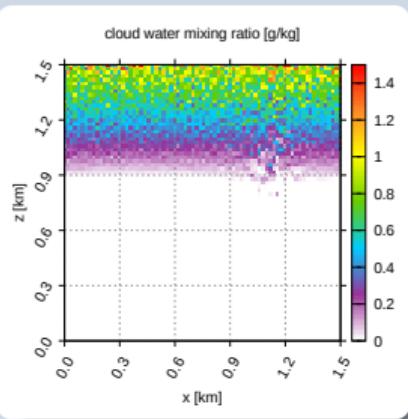
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



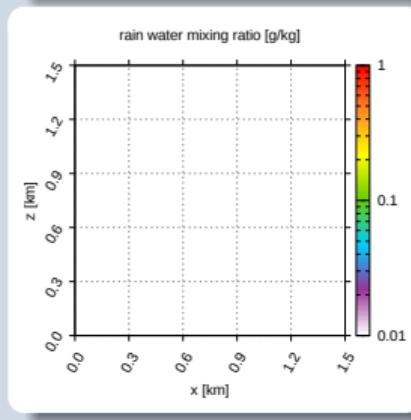
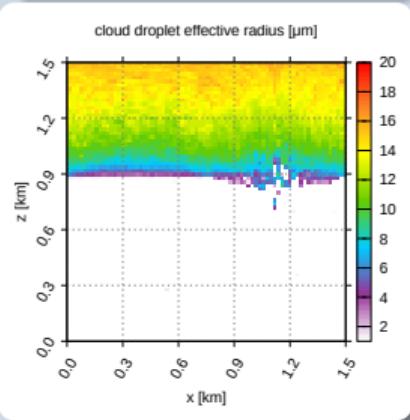
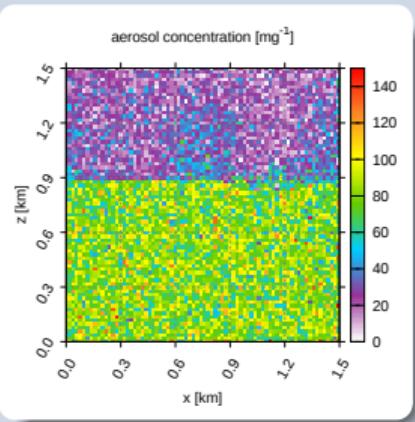
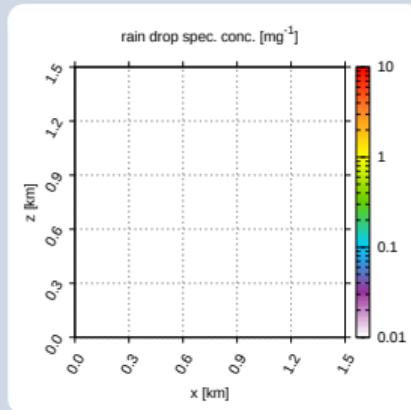
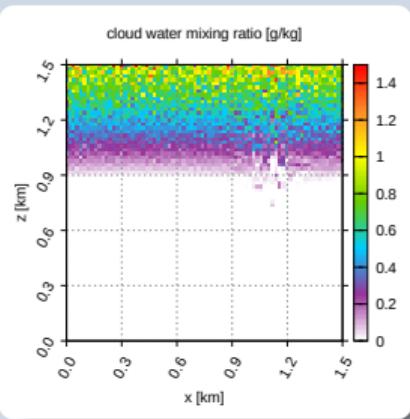
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



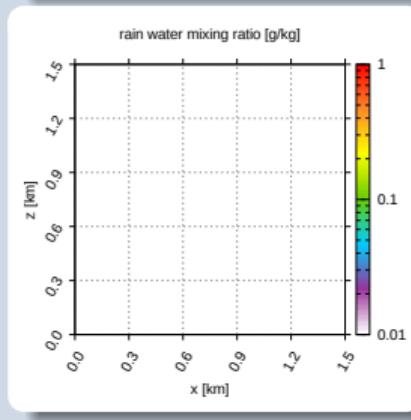
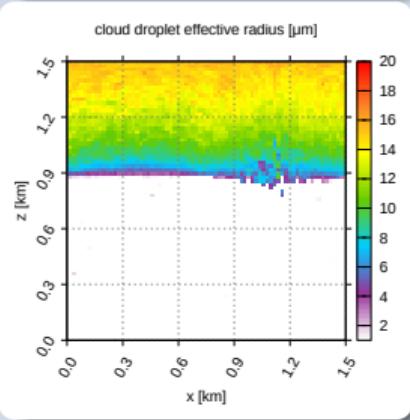
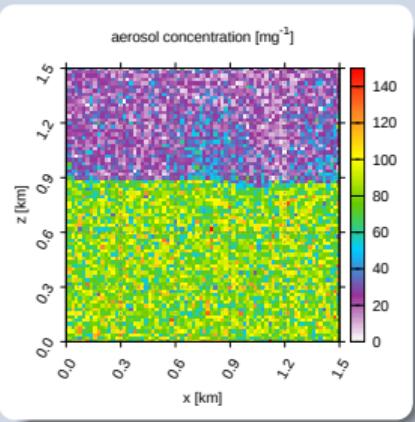
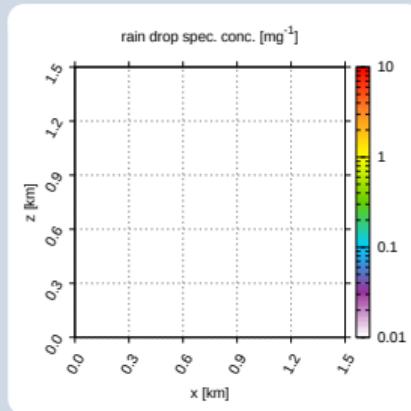
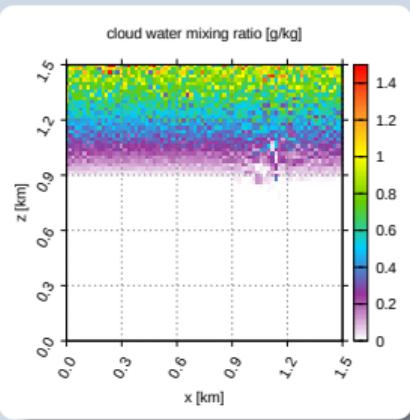
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



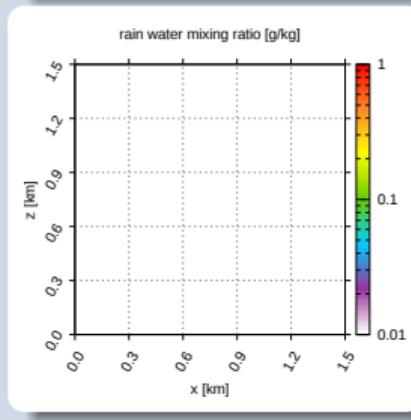
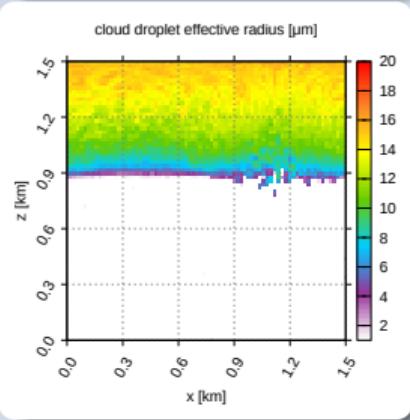
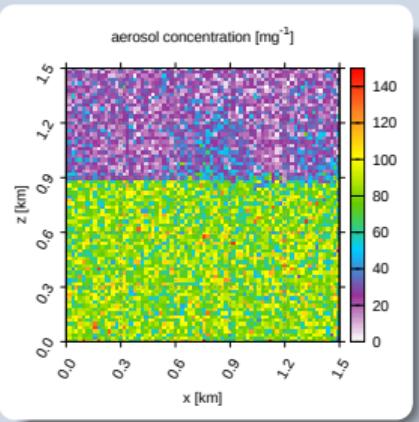
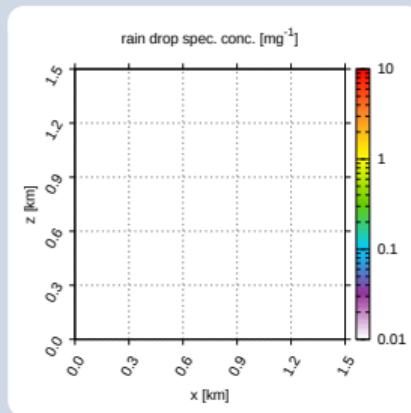
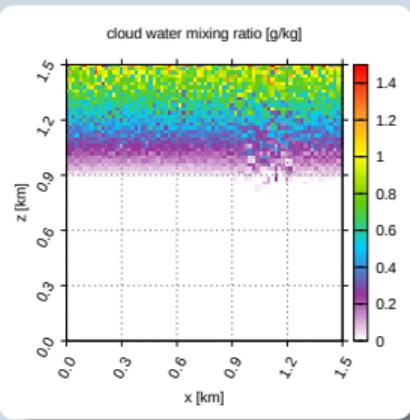
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



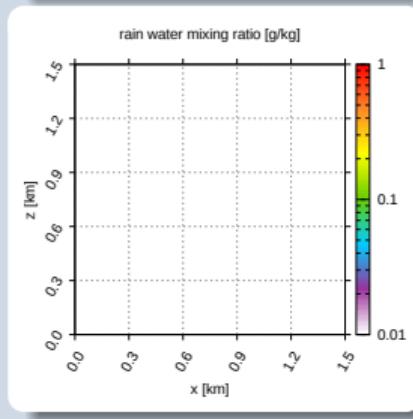
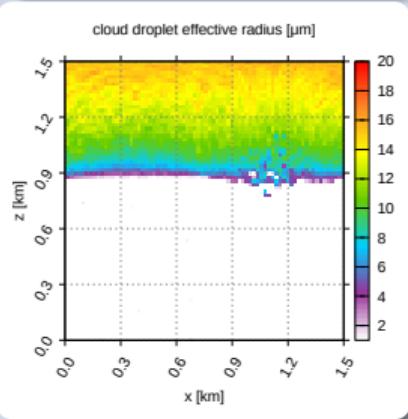
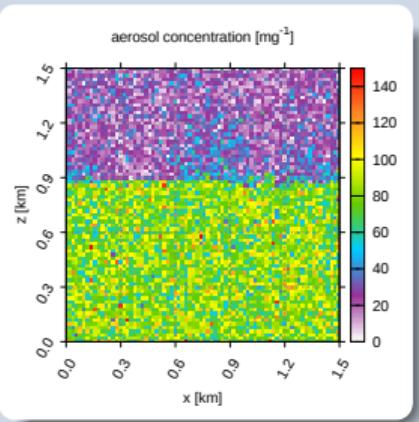
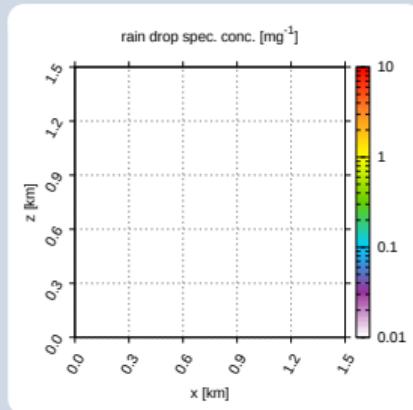
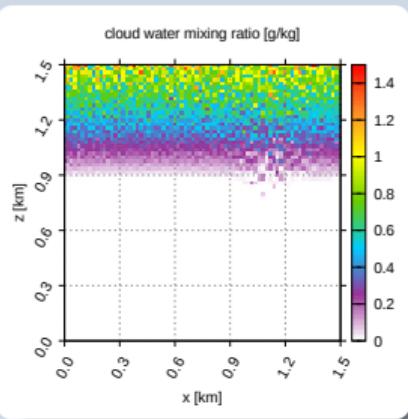
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



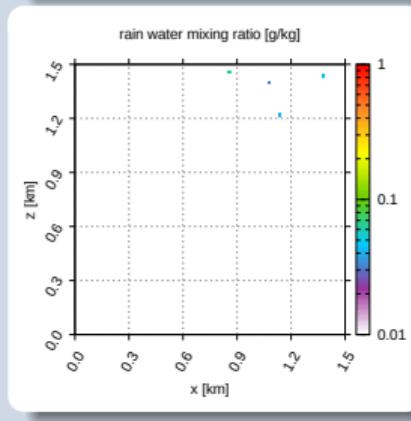
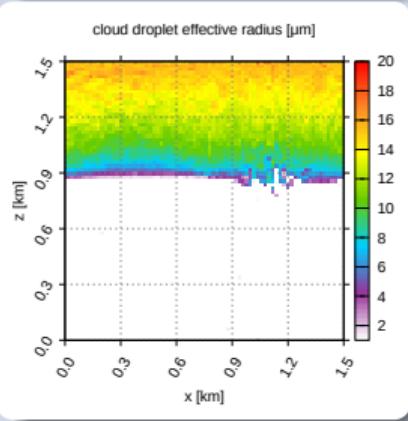
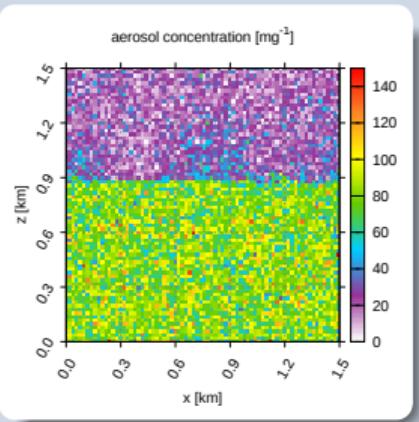
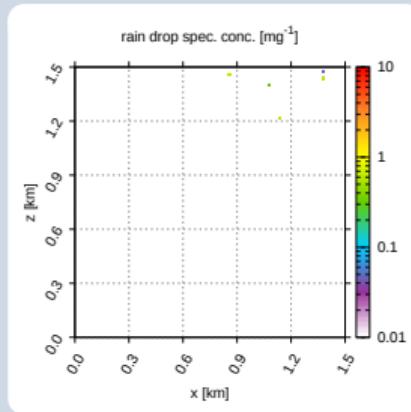
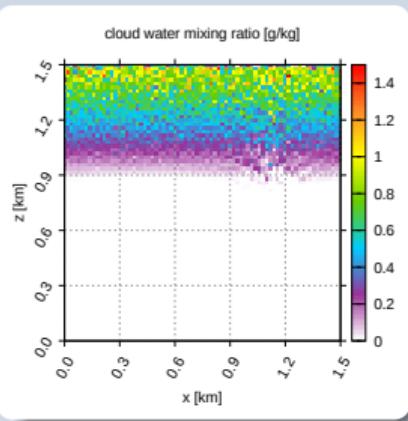
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



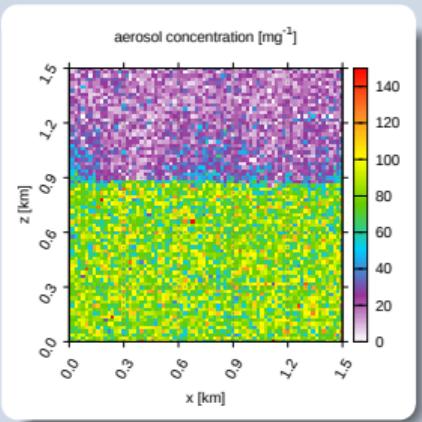
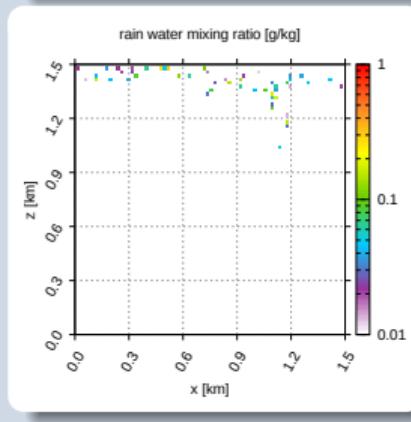
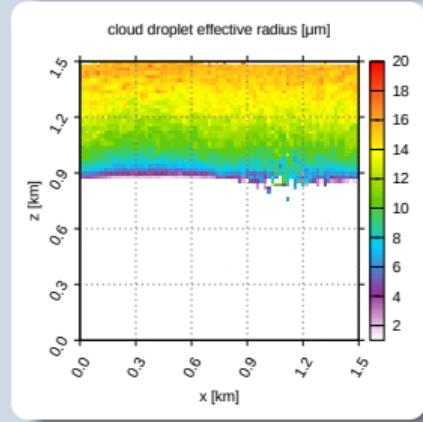
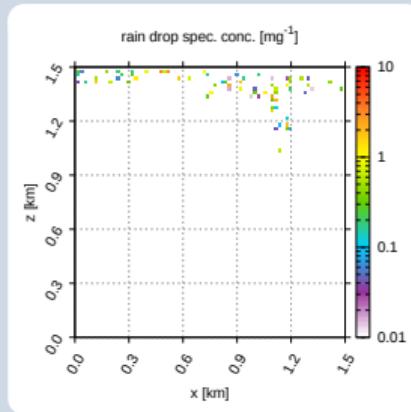
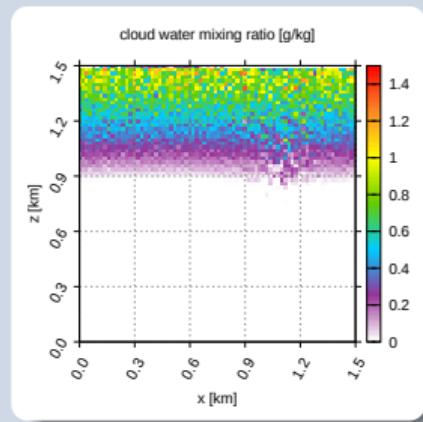
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



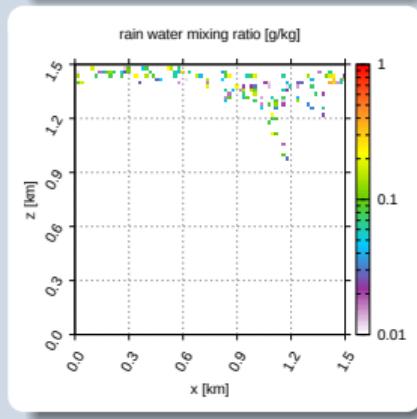
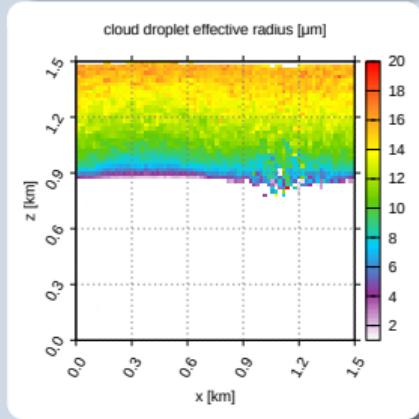
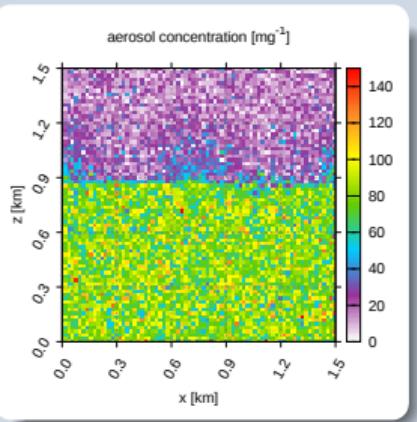
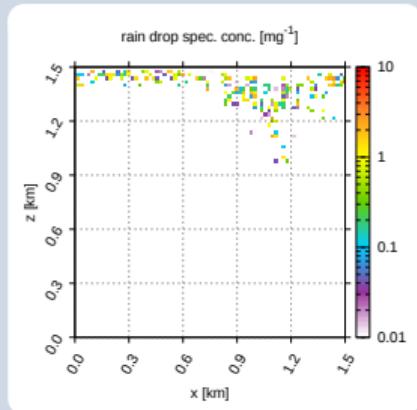
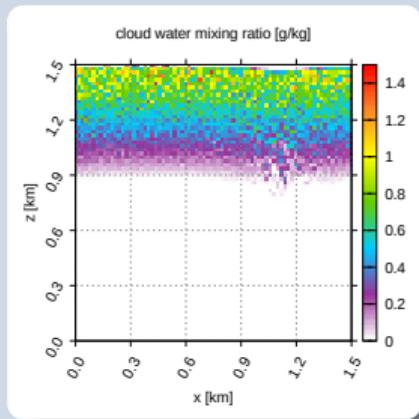
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



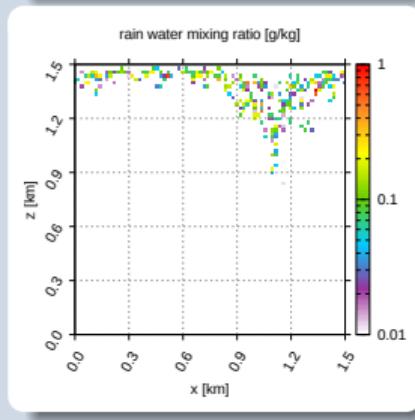
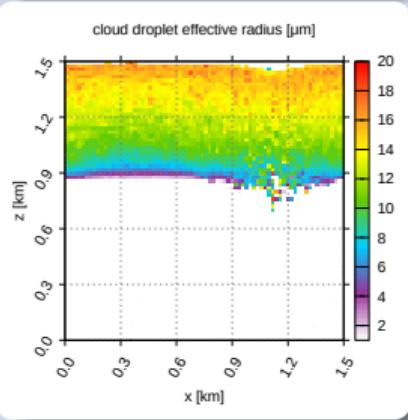
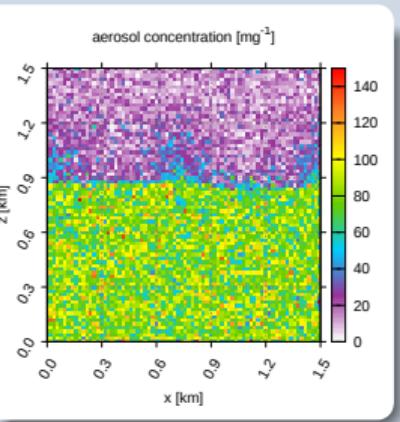
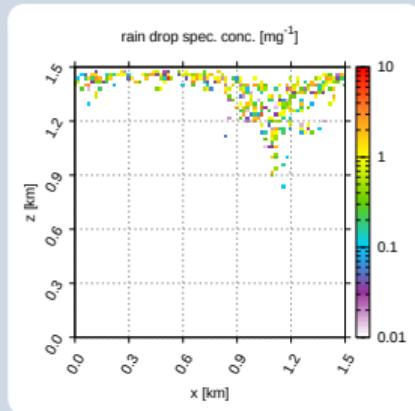
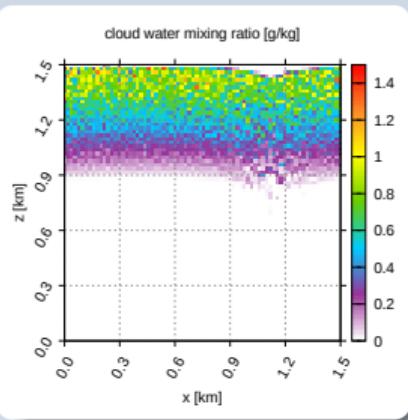
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



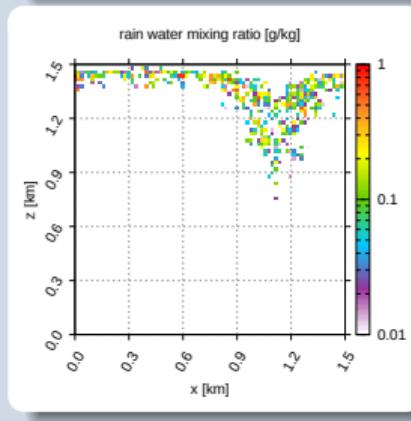
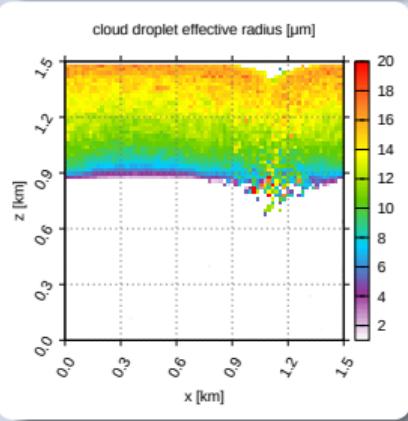
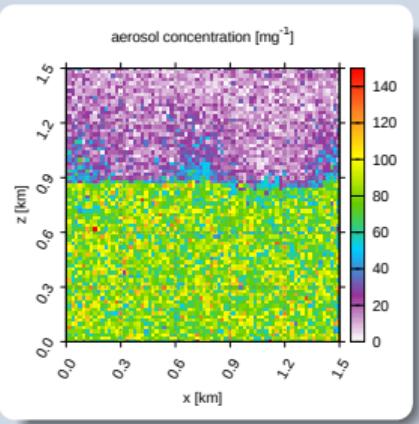
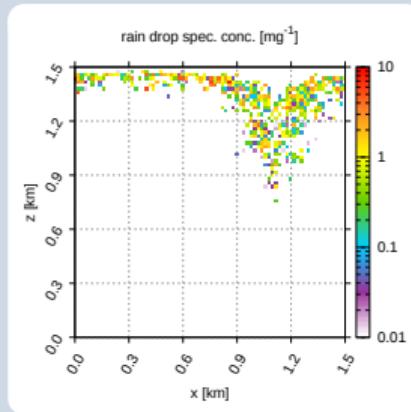
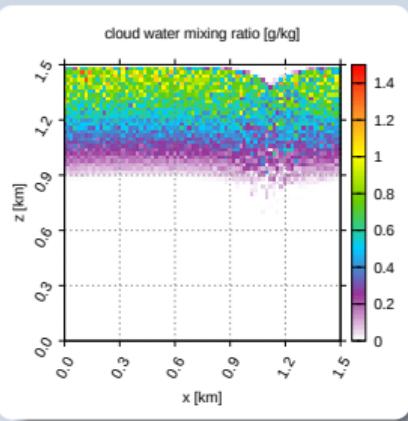
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



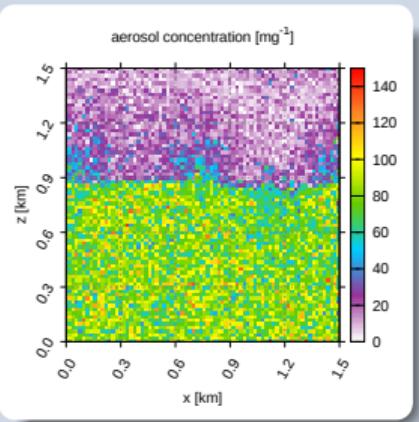
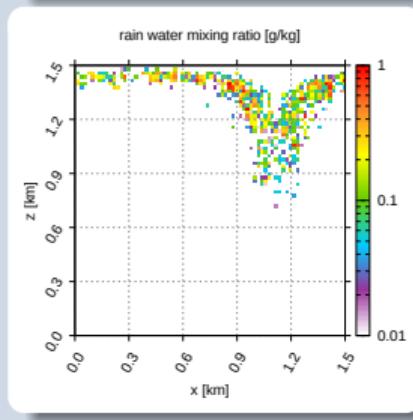
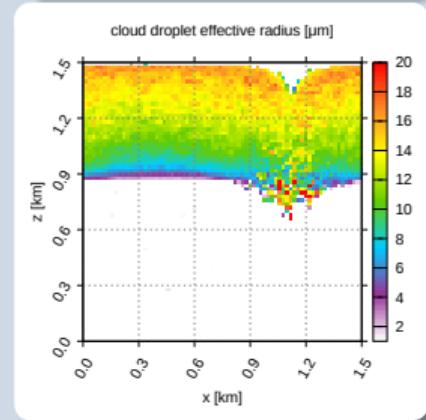
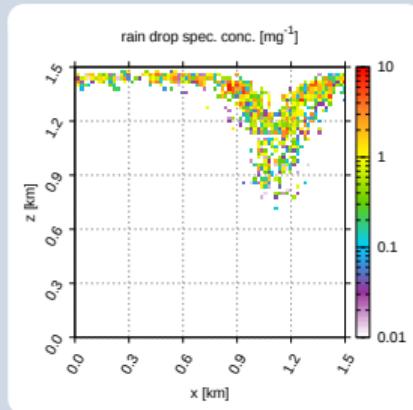
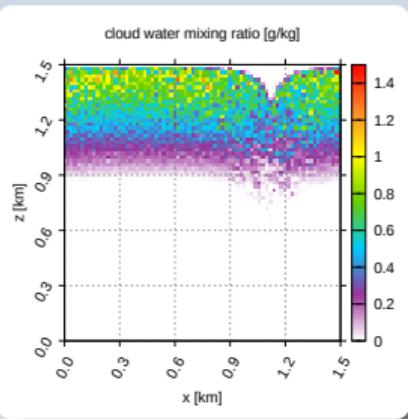
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



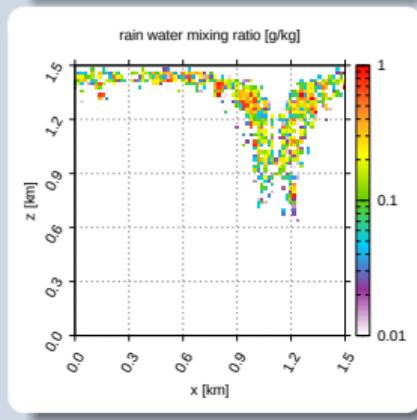
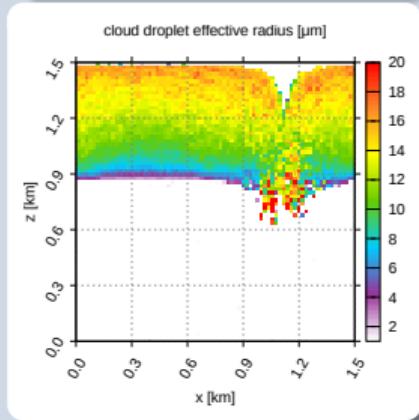
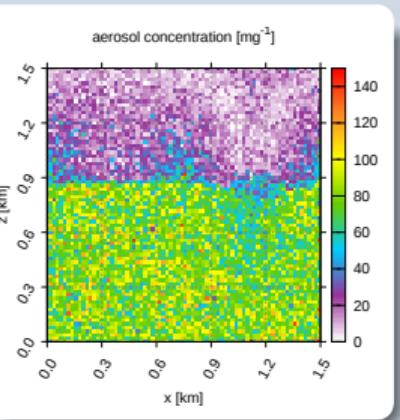
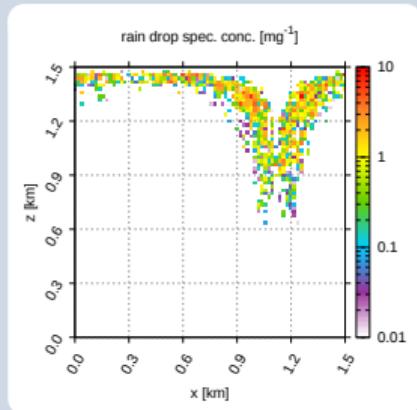
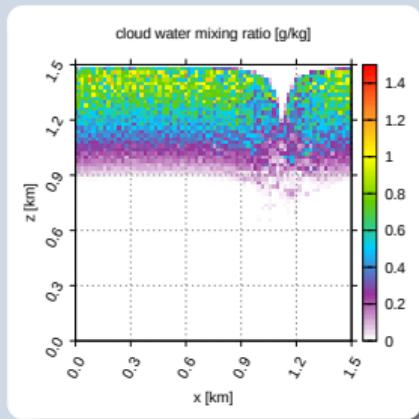
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



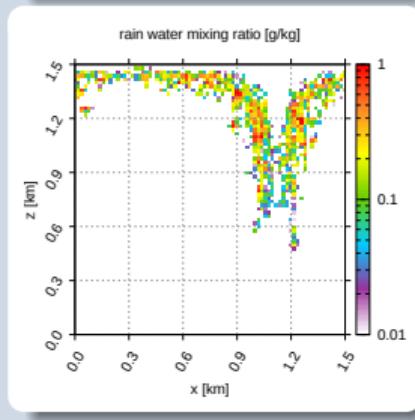
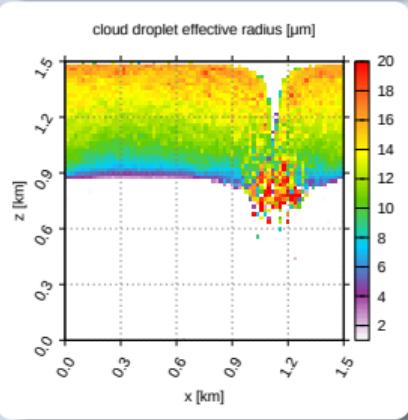
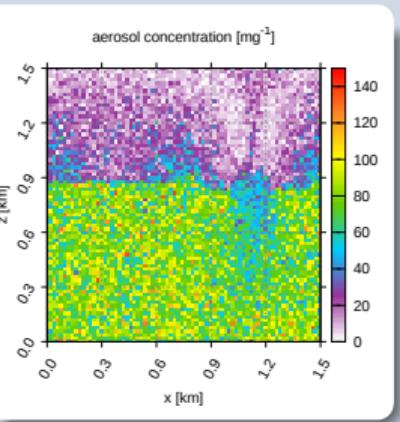
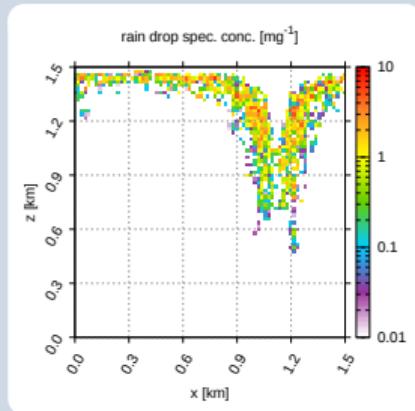
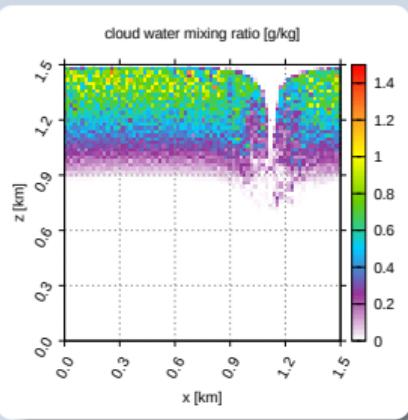
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



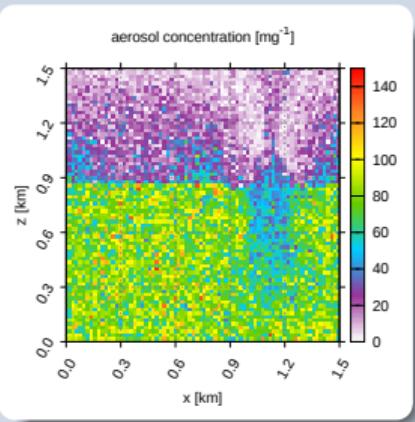
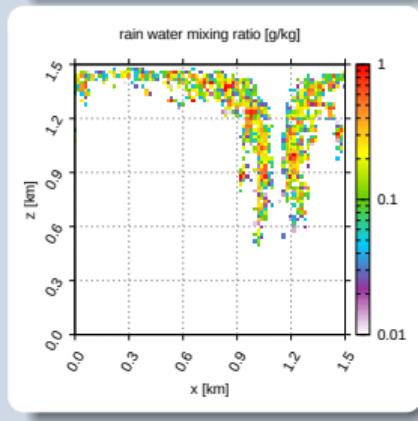
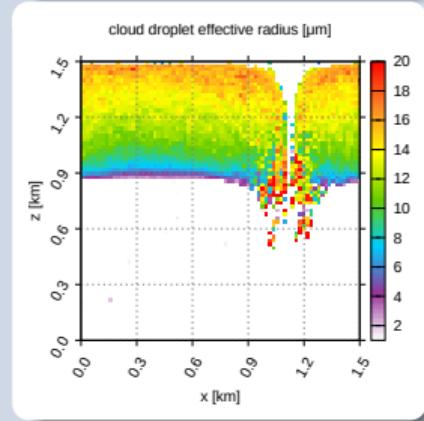
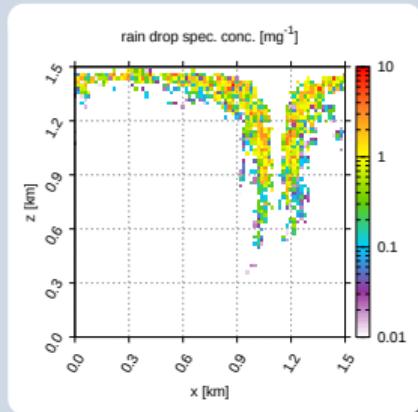
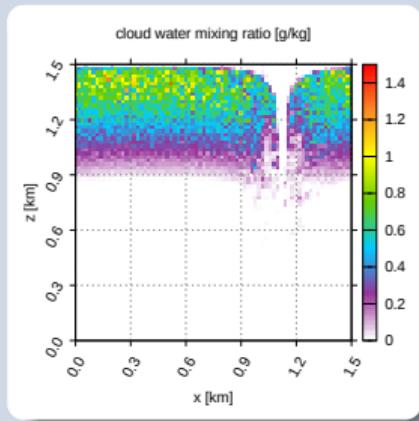
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



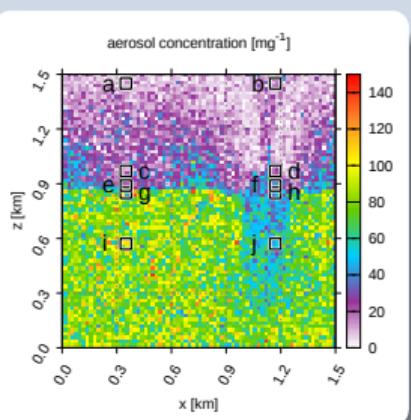
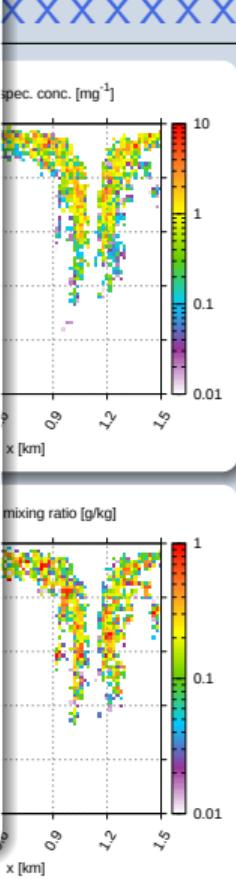
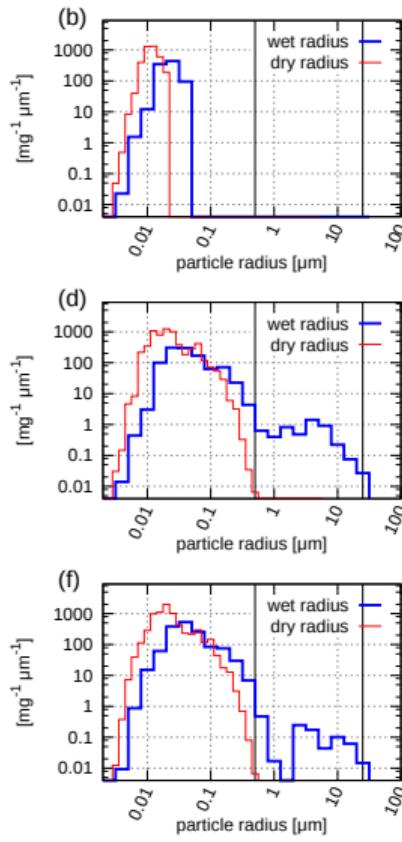
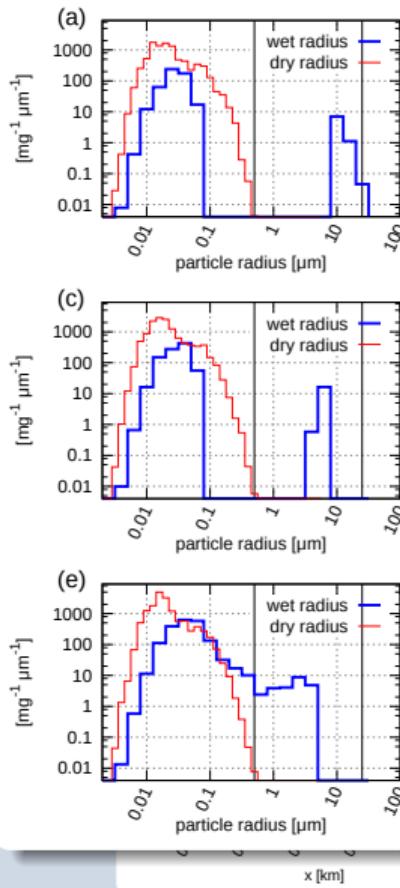
przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



przykładowa symulacja (2D, mikrofizyka lagranżowska, zadany przepływ)



widma rozmiarów cząstek



- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Modelowanie mikrofizyki chmur
- Symulacje Monte-Carlo zderzeń kropel
- Pakiet oprogramowania PySDM

Plan prezentacji

- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Modelowanie mikrofizyki chmur
- Symulacje Monte-Carlo zderzeń kropel
- Pakiet oprogramowania PySDM

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 kropel

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 kropel

- dwie (spójne) możliwości reprezentacji zderzeń w symulacji Monte-Carlo:
 - część z ξ cząstek (określona przez P_{ij}) zderza i łączy się co Δt
 - $\min(\xi_i, \xi_j)$ kropel zdarza się i łączy raz na wiele (określone przez P_{ij}) Δt
~ 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 kropel

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

- dwie (spójne) możliwości reprezentacji zderzeń w symulacji Monte-Carlo:
 - część z ξ cząstek (określona przez P_{ij}) zderza i łączy się co Δt
 - $\min(\xi_i, \xi_j)$ kropel zdarza się i łączy raz na wiele (określone przez P_{ij}) Δt
→ stała liczba super-kropelek (reprezentacja rozmiarów po zderzeniu)!
- schemat Monte-Carlo: liczba losowa porównywana z P_{ij}
- sprawdzanie $[n/2]$ losowych par (i,j) zamiast wszystkich par (i,j)
koszt: $O(n^2) \sim O(n)$, 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 kropel

- dwie (spójne) możliwości reprezentacji zderzeń w symulacji Monte-Carlo:
 - część z ξ cząstek (określona przez P_{ij}) zderza i łączy się co Δt
 - $\min(\xi_i, \xi_j)$ kropel zdarza się i łączy raz na wiele (określone przez P_{ij}) Δt
→ stała liczba super-kropelek (reprezentacja rozmiarów po zderzeniu)!
- schemat Monte-Carlo: liczba losowa porównywana z P_{ij}
- sprawdzanie $[n/2]$ losowych par (i,j) zamiast wszystkich par (i,j)
koszt: $O(n^2) \sim O(n)$, prawdop. skalowane przez $\frac{n \cdot (n-1)}{2} / \left[\frac{n}{2} \right]$
- alternatywa eulerowska (i nie stochastyczna): równanie Smoluchowskiego

Algorytm Monte-Carlo Super-Droplet Method (Shima et al. 2009)



Shin-ichiro Shima

Graduate School of Information Science, [University of Hyogo](#)

Verified email at sim.u-hyogo.ac.jp - [Homepage](#)

Computational Physics Nonlinear Dynamics Complex Systems

TITLE	CITED BY	YEAR
Rotating spiral waves with phase-randomized core in nonlocally coupled oscillators S Shima, Y Kuramoto Physical Review E 69 (3), 036213	323	2004
The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: a particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model S Shima, K Kusano, A Kawano, T Sugiyama, S Kawahara Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 135 (642), 1307-1320	189	2009

Algorytm Monte-Carlo Super-Droplet Method (Shima et al. 2009)



Shin-ichiro Shima

Graduate School of Information Science, [University of Hyogo](#)

Verified email at sim.u-hyogo.ac.jp - [Homepage](#)

Computational Physics Nonlinear Dynamics Complex Systems

TITLE	CITED BY	YEAR
Rotating spiral waves with phase-randomized core in nonlocally coupled oscillators S Shima, Y Kuramoto Physical Review E 69 (3), 036213	323	2004
The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: a particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model S Shima, K Kusano, A Kawano, T Sugiyama, S Kawahara Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 135 (642), 1307-1320	189	2009

- pierwsze zastosowanie w symulacjach 3D (LES):

Arabas & Shima 2013 (JAS, 10.1175/JAS-D-12-0295.1)

Algorytm Monte-Carlo Super-Droplet Method (Shima et al. 2009)



Shin-ichiro Shima

Graduate School of Information Science, [University of Hyogo](#)

Verified email at sim.u-hyogo.ac.jp - [Homepage](#)

Computational Physics Nonlinear Dynamics Complex Systems

TITLE	CITED BY	YEAR
Rotating spiral waves with phase-randomized core in nonlocally coupled oscillators S Shima, Y Kuramoto Physical Review E 69 (3), 036213	323	2004
The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: a particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model S Shima, K Kusano, A Kawano, T Sugiyama, S Kawahara Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 135 (642), 1307-1320	189	2009

- ▶ pierwsze zastosowanie w symulacjach 3D (LES):
Arabas & Shima 2013 (JAS, 10.1175/JAS-D-12-0295.1)
- ▶ pierwsza implementacja na GPU (C++):
Arabas et al. 2015 (GMD, 10.5194/gmd-8-1677-2015)

Algorytm Monte-Carlo Super-Droplet Method (Shima et al. 2009)



Shin-ichiro Shima

Graduate School of Information Science, [University of Hyogo](#)

Verified email at sim.u-hyogo.ac.jp - [Homepage](#)

Computational Physics Nonlinear Dynamics Complex Systems

TITLE	CITED BY	YEAR
Rotating spiral waves with phase-randomized core in nonlocally coupled oscillators S Shima, Y Kuramoto Physical Review E 69 (3), 036213	323	2004
The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: a particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model S Shima, K Kusano, A Kawano, T Sugiyama, S Kawahara Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 135 (642), 1307-1320	189	2009

- ▶ pierwsze zastosowanie w symulacjach 3D (LES):
Arabas & Shima 2013 (JAS, 10.1175/JAS-D-12-0295.1)
- ▶ pierwsza implementacja na GPU (C++):
Arabas et al. 2015 (GMD, 10.5194/gmd-8-1677-2015)
- ▶ wysokowydajna impl. w Pythonie (na wielordzeniowe CPU i GPU):
Bartman & Arabas 2021 (LNCS / ICCS@AGH, 10.1007/978-3-030-77964-1_2)

Algorytm Monte-Carlo Super-Droplet Method (Shima et al. 2009)



Shin-ichiro Shima

Graduate School of Information Science, [University of Hyogo](#)

Verified email at sim.u-hyogo.ac.jp - [Homepage](#)

Computational Physics Nonlinear Dynamics Complex Systems

TITLE	CITED BY	YEAR
Rotating spiral waves with phase-randomized core in nonlocally coupled oscillators S Shima, Y Kuramoto Physical Review E 69 (3), 036213	323	2004
The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: a particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model S Shima, K Kusano, A Kawano, T Sugiyama, S Kawahara Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 135 (642), 1307-1320	189	2009

- ▶ pierwsze zastosowanie w symulacjach 3D (LES):
Arabas & Shima 2013 (JAS, 10.1175/JAS-D-12-0295.1)
- ▶ pierwsza implementacja na GPU (C++):
Arabas et al. 2015 (GMD, 10.5194/gmd-8-1677-2015)
- ▶ wysokowydajna impl. w Pythonie (na wielordzeniowe CPU i GPU):
Bartman & Arabas 2021 (LNCS / ICCS@AGH, 10.1007/978-3-030-77964-1_2)
- ▶ rozszerzenie o opis rozpadu kropel przy zderzeniach:
de Jong, Mackay, Jaruga & Arabas 2022 (GMD, 10.5194/egusphere-2022-1243)

Algorytm Monte-Carlo Super-Droplet Method (Shima et al. 2009)



Shin-ichiro Shima

Graduate School of Information Science, University of Hyogo

Verified email at sim.u-hyogo.ac.jp - Homepage

Computational Physics Nonlinear Dynamics Complex Systems

TITLE	CITED BY	YEAR
Rotating spiral waves with phase-randomized core in nonlocally coupled oscillators S Shima, Y Kuramoto Physical Review E 69 (3), 036213	323	2004
The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: a particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model S Shima, K Kusano, A Kawano, T Sugiyama, S Kawahara Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 135 (642), 1307-1320	189	2009

- ▶ pierwsze zastosowanie w symulacjach 3D (LES):
Arabas & Shima 2013 (JAS, 10.1175/JAS-D-12-0295.1)
- ▶ pierwsza implementacja na GPU (C++):
Arabas et al. 2015 (GMD, 10.5194/gmd-8-1677-2015)
- ▶ wysokowydajna impl. w Pythonie (na wielordzeniowe CPU i GPU):
Bartman & Arabas 2021 (LNCS / ICCS@AGH, 10.1007/978-3-030-77964-1_2)
- ▶ rozszerzenie o opis rozpadu kropel przy zderzeniach:
de Jong, Mackay, Jaruga & Arabas 2022 (GMD, 10.5194/egusphere-2022-1243)
- ▶ połączenie z symulacją Monte-Carlo nukleacji lodu:
Arabas, Riemer, et al. (w przygotowaniu, zob. np.: <http://youtu.be/00Je-JFMDpU>)

- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Modelowanie mikrofizyki chmur
- Symulacje Monte-Carlo zderzeń kropel
- Pakiet oprogramowania PySDM

Plan prezentacji

- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Modelowanie mikrofizyki chmur
- Symulacje Monte-Carlo zderzeń kropel
- Pakiet oprogramowania PySDM



PySDM v1: particle-based cloud modeling package for warm-rain microphysics and aqueous chemistry

Piotr Bartman¹, Oleksii Bulenok¹, Kamil Górska¹, Anna Jaruga², Grzegorz Łazarski^{1,3}, Michael A. Olesik⁴, Bartosz Piasecki¹, Clare E. Singer², Aleksandra Talar¹, and Sylvester Arabas^{5,1}

1 Faculty of Mathematics and Computer Science, Jagiellonian University, Kraków, Poland **2** Department of Environmental Science and Engineering, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA **3** Faculty of Chemistry, Jagiellonian University, Kraków, Poland **4** Faculty of Physics, Astronomy and Applied Computer Science, Jagiellonian University, Kraków, Poland **5** University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA

DOI: [10.21105/joss.03219](https://doi.org/10.21105/joss.03219)

Software

- [Review ↗](#)
- [Repository ↗](#)
- [Archive ↗](#)

Editor: [David Hagan](#) ↗

Reviewers:

- [@darothen](#)
- [@josephhardinee](#)

Submitted: 31 March 2021

Published: 24 April 2022

License

Authors of papers retain

Introduction

PySDM is an open-source Python package for simulating the dynamics of particles undergoing condensational and collisional growth, interacting with a fluid flow and subject to chemical composition changes. It is intended to serve as a building block for process-level as well as computational-fluid dynamics simulation systems involving representation of a continuous phase (air) and a dispersed phase (aerosol), with PySDM being responsible for representation of the dispersed phase. For major version 1 (v1), the development has been focused on atmospheric cloud physics applications, in particular on modeling the dynamics of particles immersed in moist air using the particle-based approach to represent the evolution of the size spectrum of aerosol/cloud/rain particles. The particle-based approach contrasts the more commonly used bulk and bin methods in which atmospheric particles are segregated into multiple categories (aerosol, cloud and rain) and their evolution is governed by deterministic dynamics solved on the same Eulerian grid as the dynamics of the continuous phase. Particle-based methods employ discrete computational (super) particles for modeling the dispersed phase. Each super particle

Download paper

Software archive

Review

Editor: [@dhhagan](#) ([all papers](#))

Reviewers: [@darothen](#) ([all reviews](#)),

[@josephhardinee](#) ([all reviews](#))

Authors

Piotr Bartman ([0000-0003-0265-6428](#)), Oleksii Bulenok ([0000-0003-2272-8548](#)), Kamil Górska, Anna Jaruga ([0000-0003-3194-6440](#)), Grzegorz Łazarski ([0000-0002-5595-371X](#)), Michael A. Olesik ([0000-0002-6319-8358](#)), Bartosz Piasecki, Clare E. Singer ([0000-0002-1708-0997](#)), Aleksandra Talar, Sylvester Arabas ([0000-0003-2361-0082](#))

Citation

Bartman et al., (2022). PySDM v1: particle-based cloud modeling package for warm-rain microphysics and aqueous chemistry. *Journal of Open Source Software*, 7(72), 3219, <https://doi.org/10.21105/joss.03219>

[Copy citation string](#) · [Copy BibTeX](#) ↗

Tags

[aerosol-simulation](#) [monte-carlo-simulation](#) [open-computing](#) [atmospheric-modeling](#) [particle-system](#) [numerical](#) [thesis](#) [metacite](#) [git](#) [atmospheric-physics](#)

Altmetrics



Markdown badge

[joss](#) [10.21105/joss.03219](#) ↗

License

Authors of JOSS papers retain copyright.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](#).



PySDM: technologie

- ▶ 100% Python python.org
- ▶ Numba (JIT \sim LLVM, multi-threading) numba.pydata.org
- ▶ ThrustRTC (GPU-resident) pypi.org/p/ThrustRTC



PySDM: technologie

- ▶ 100% Python python.org
- ▶ Numba (JIT \sim LLVM, multi-threading) numba.pydata.org
- ▶ ThrustRTC (GPU-resident) pypi.org/p/ThrustRTC

- ▶ GitHub & GitHub Actions github.com
- ▶Codecov codecov.io
- ▶ AppVeyor appveyor.com



PySDM: technologie

- ▶ 100% Python python.org
- ▶ Numba (JIT \sim LLVM, multi-threading) numba.pydata.org
- ▶ ThrustRTC (GPU-resident) pypi.org/p/ThrustRTC

- ▶ GitHub & GitHub Actions github.com
- ▶Codecov codecov.io
- ▶ AppVeyor appveyor.com

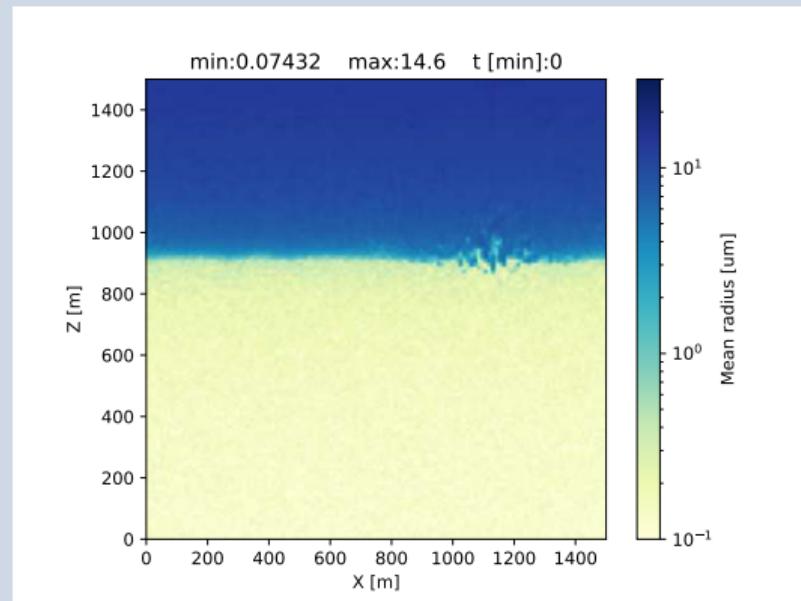
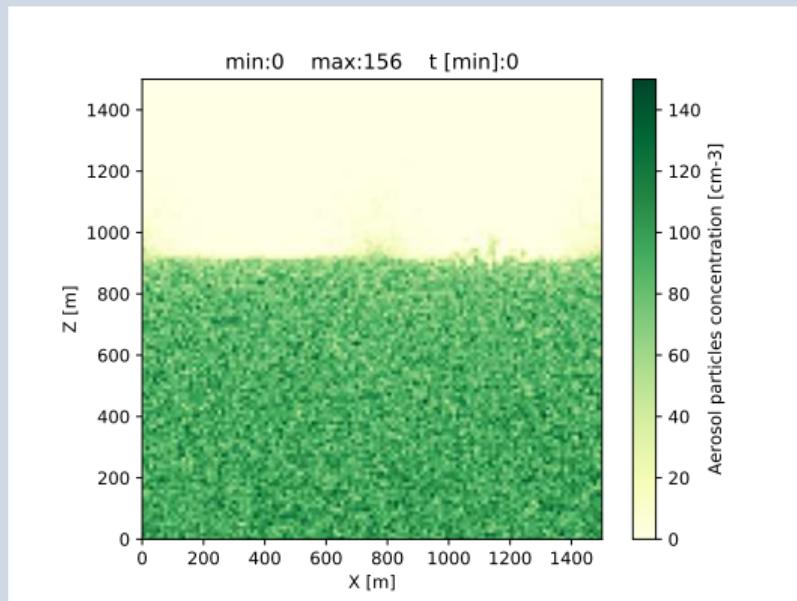
- ▶ Jupyter jupyter.org
- ▶ Binder mybinder.org
- ▶ Colab colab.research.google.com



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

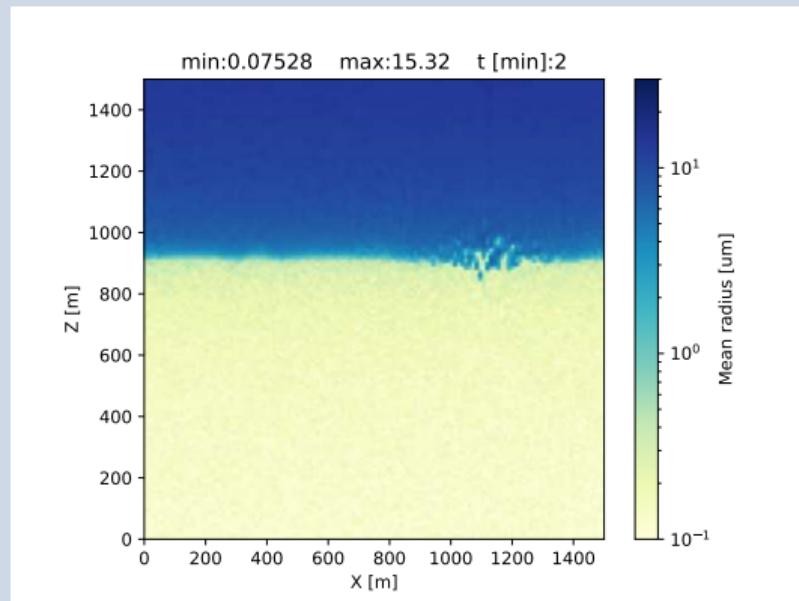
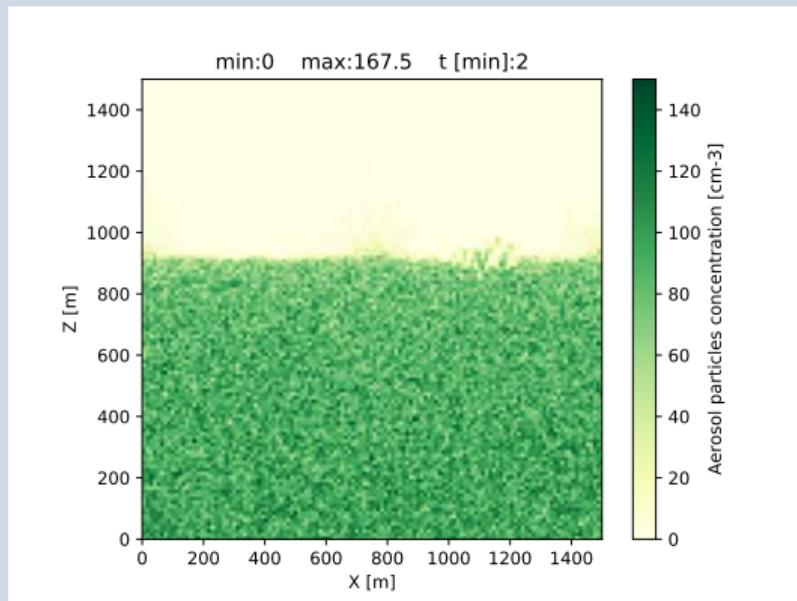
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

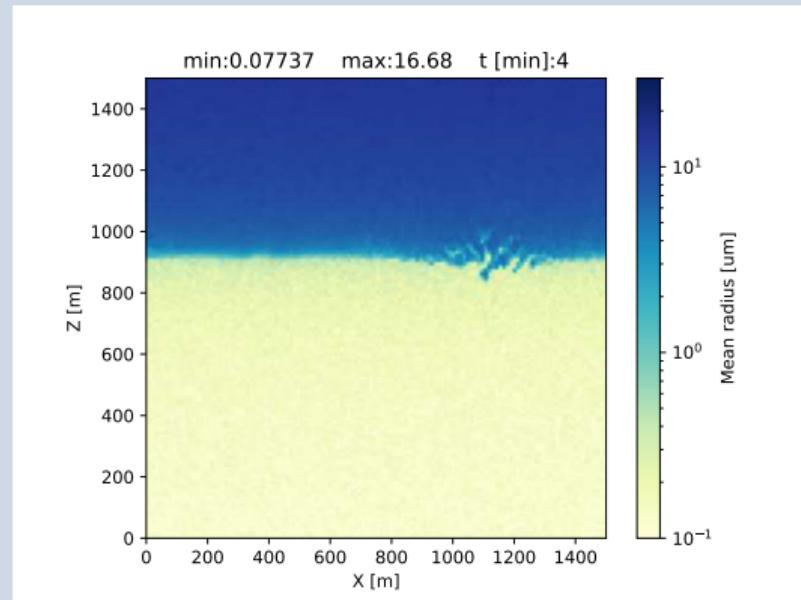
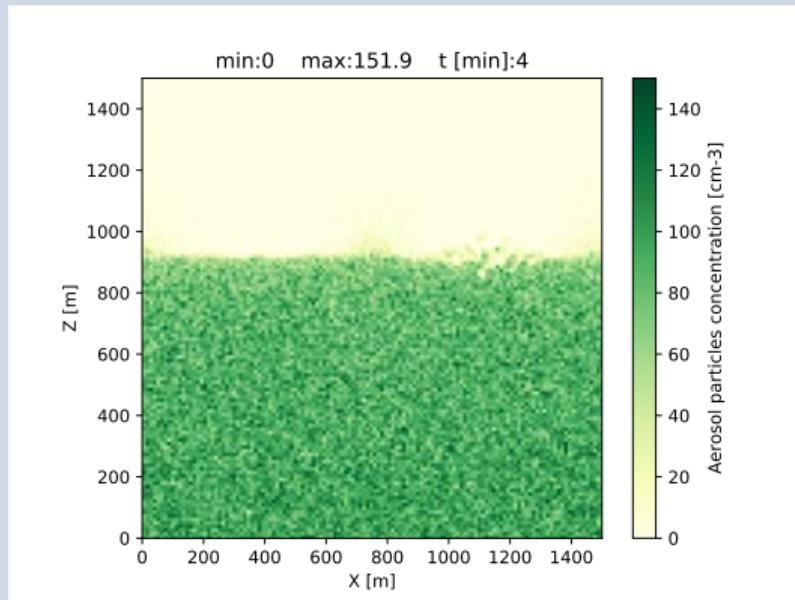
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

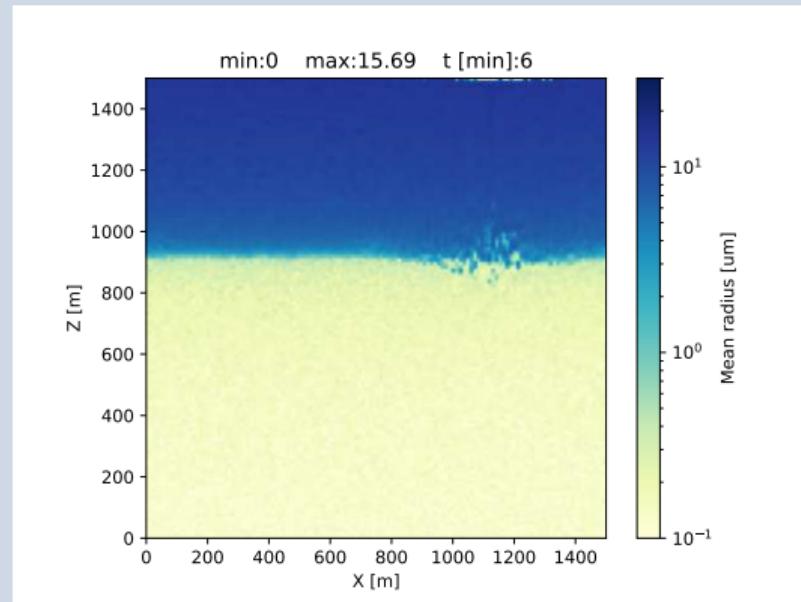
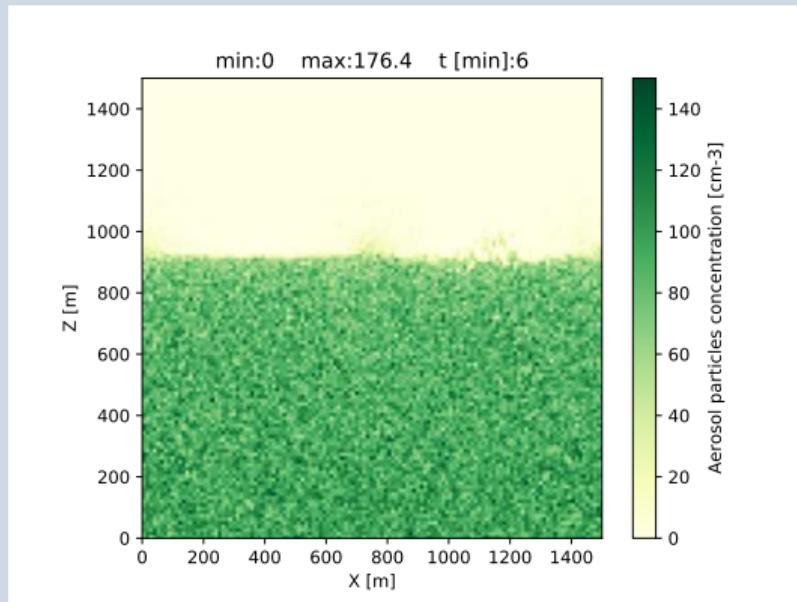
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

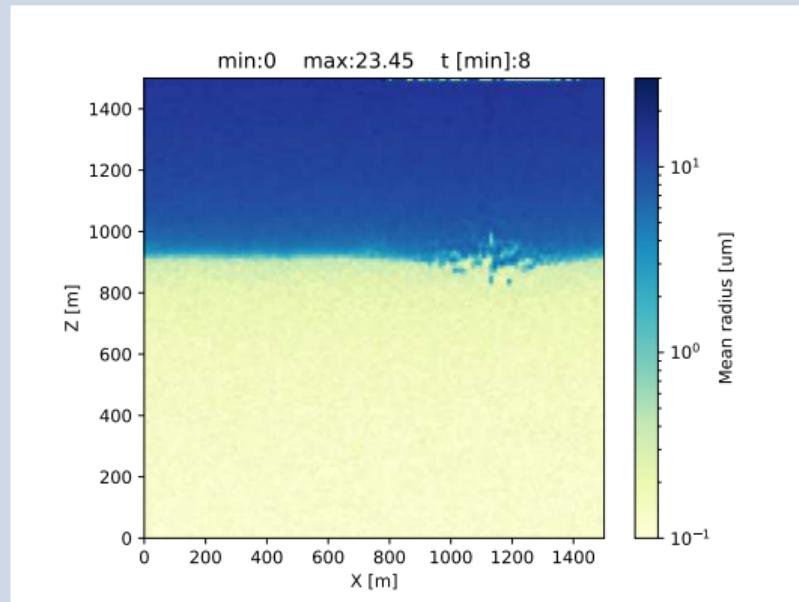
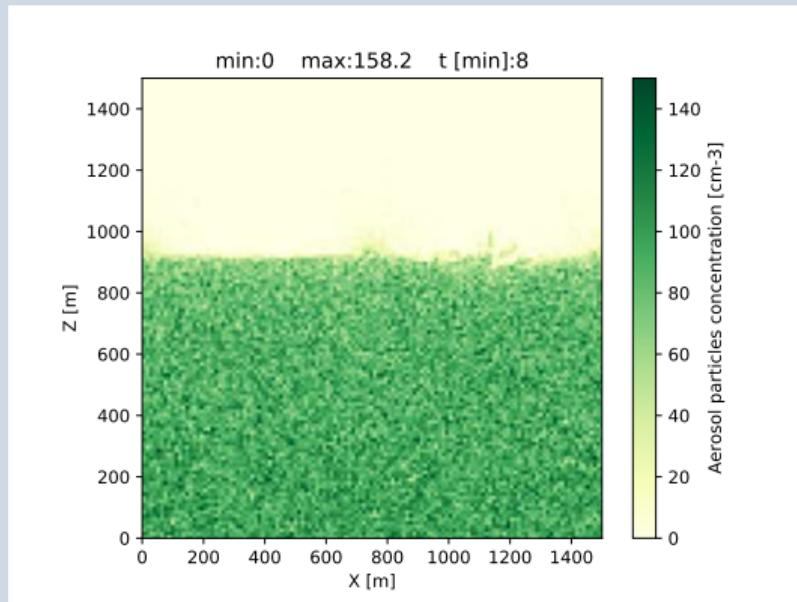
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

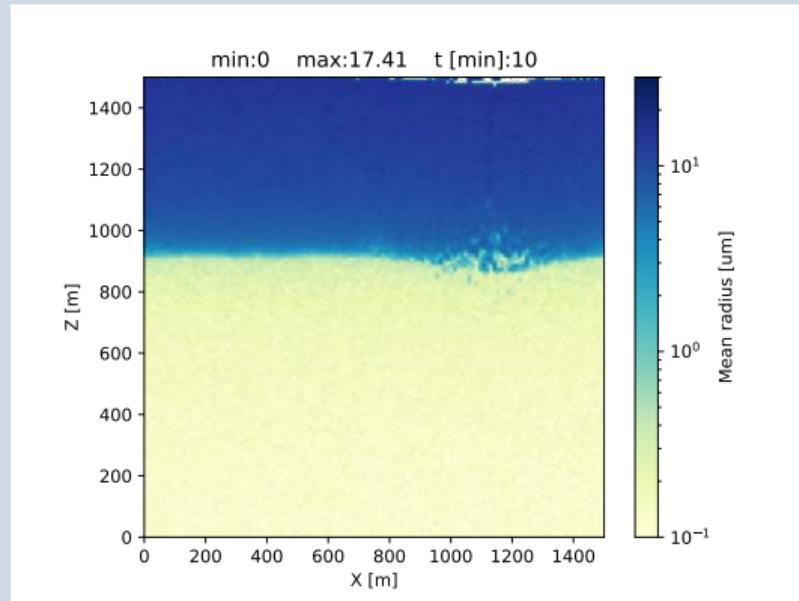
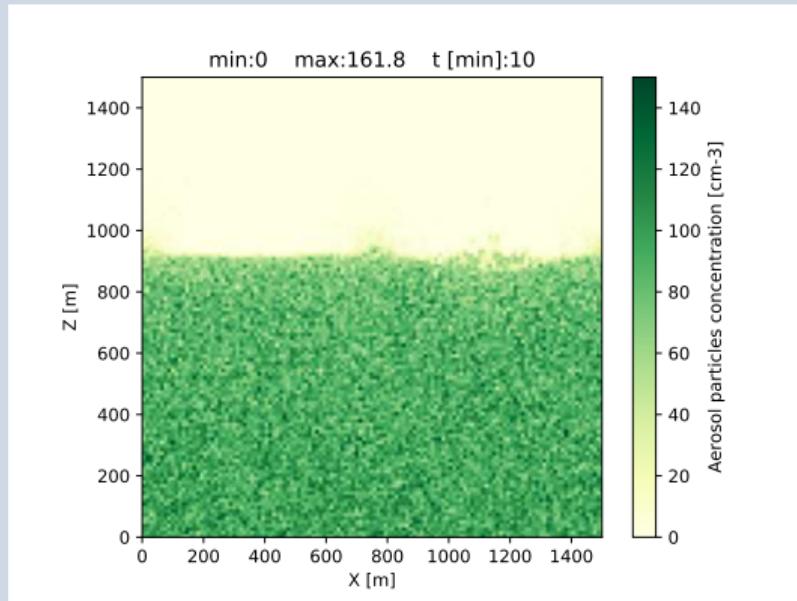
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

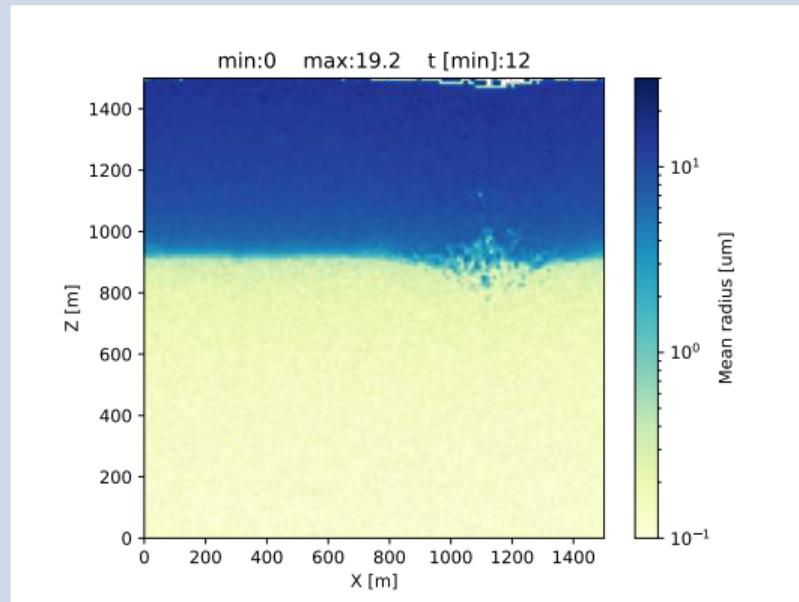
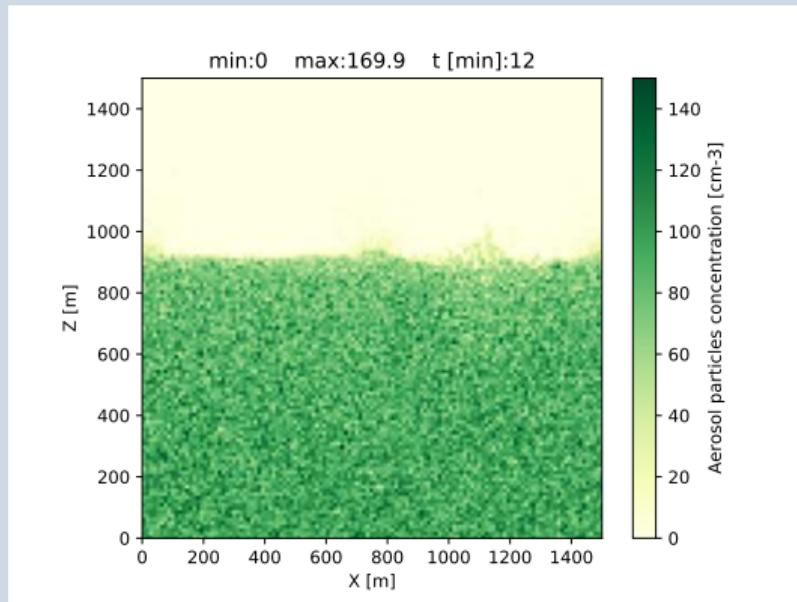
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

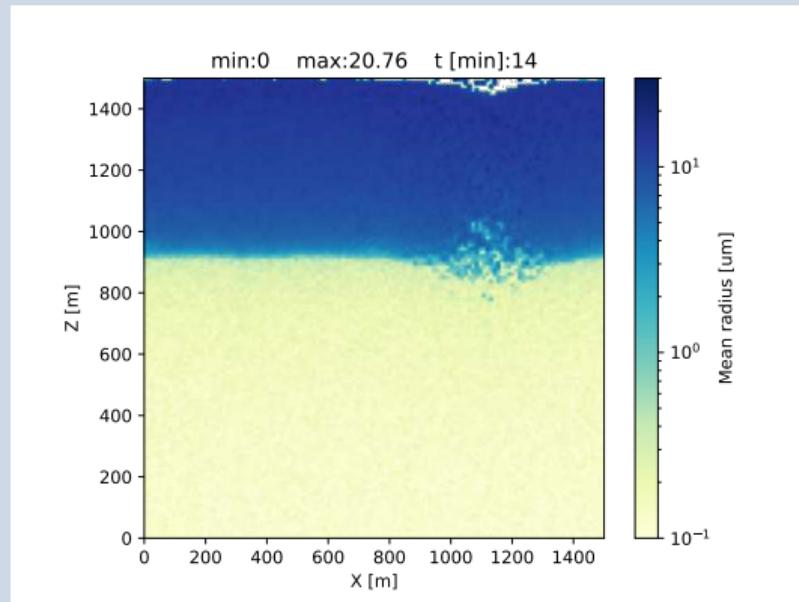
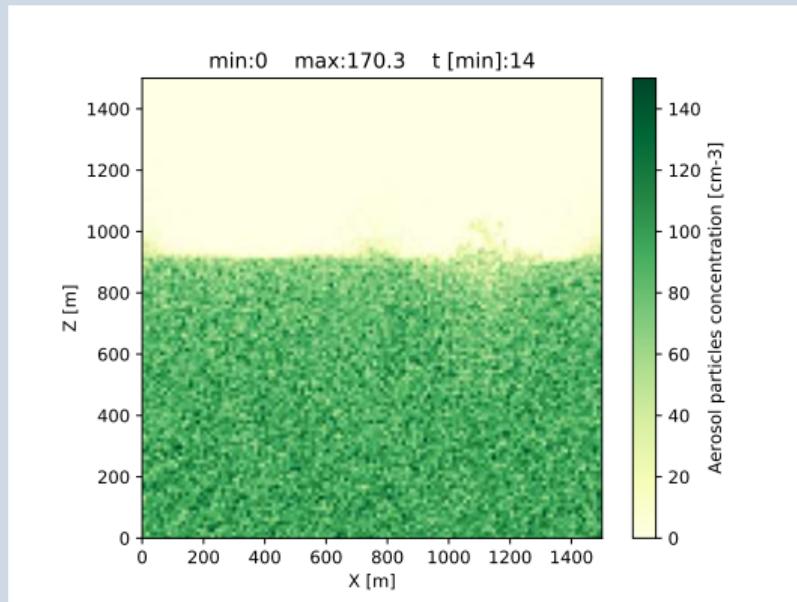
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

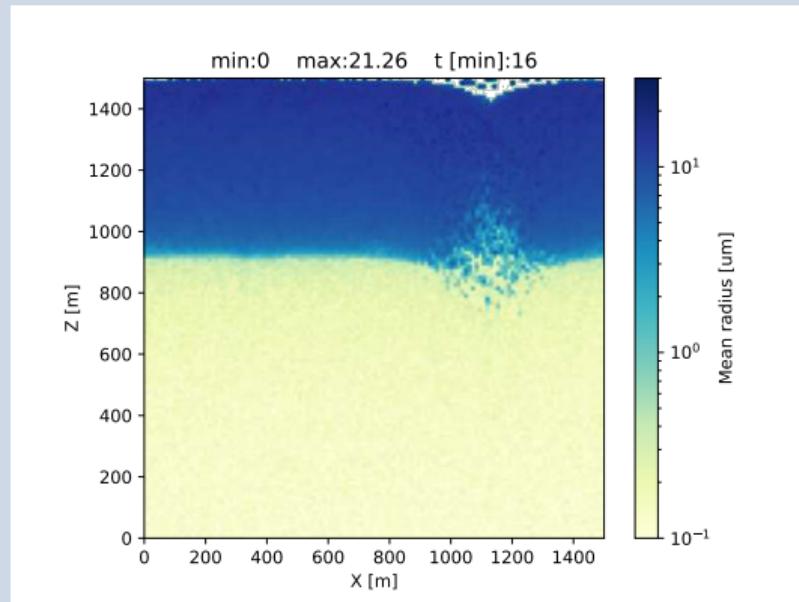
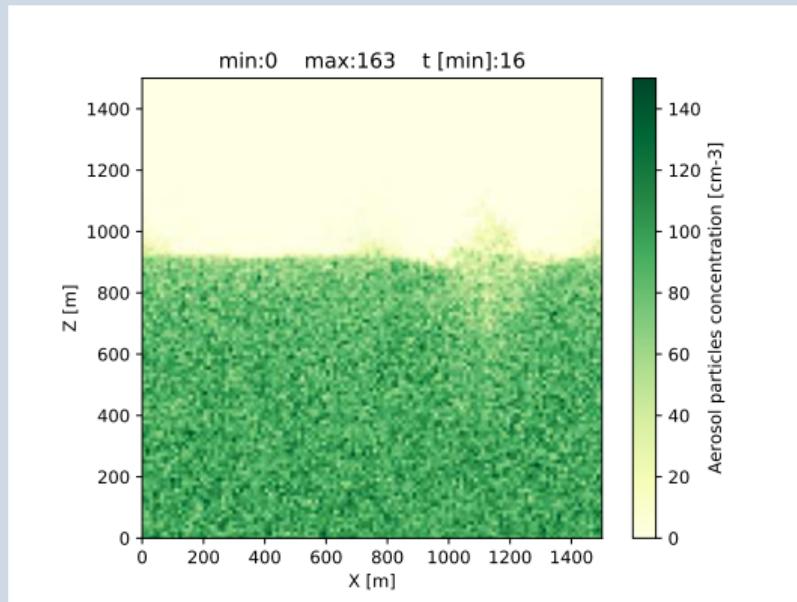
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

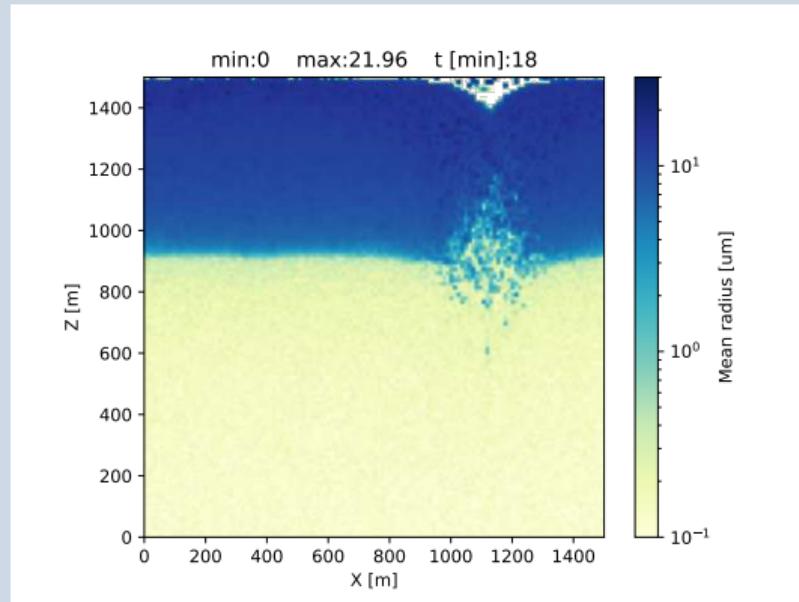
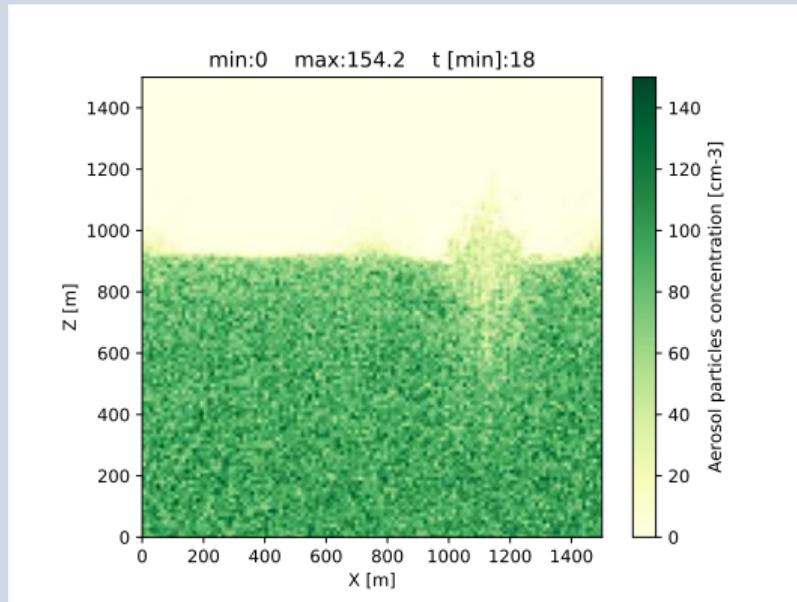
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

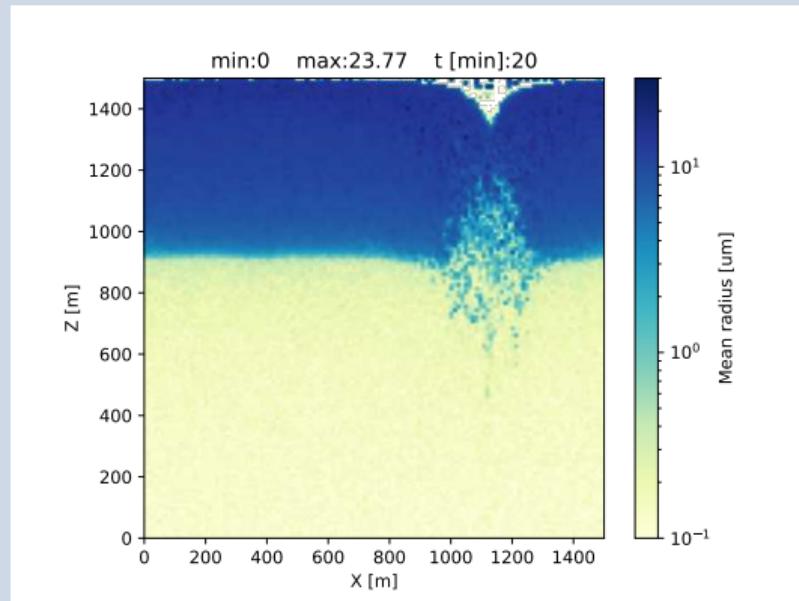
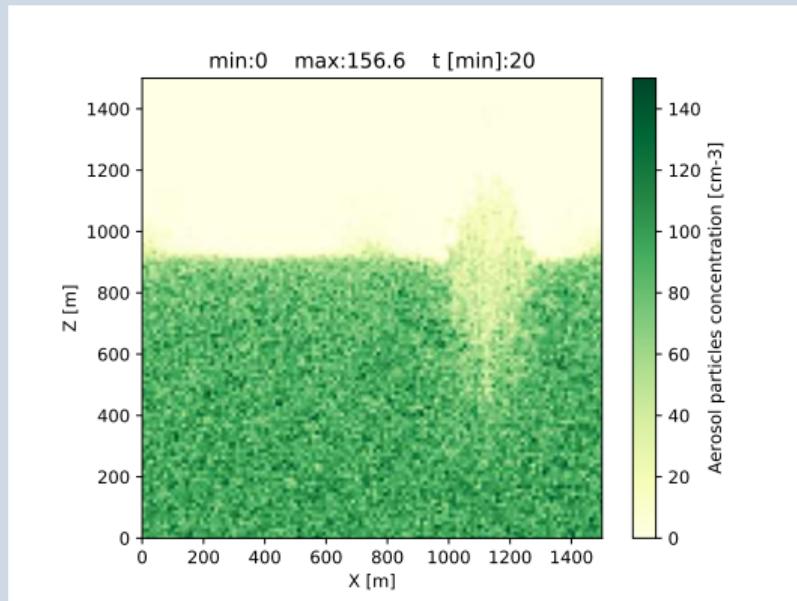
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

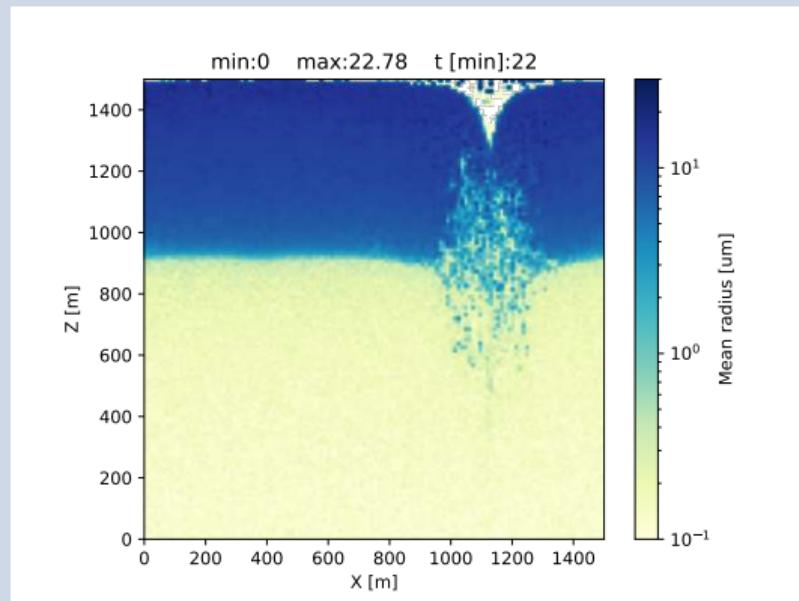
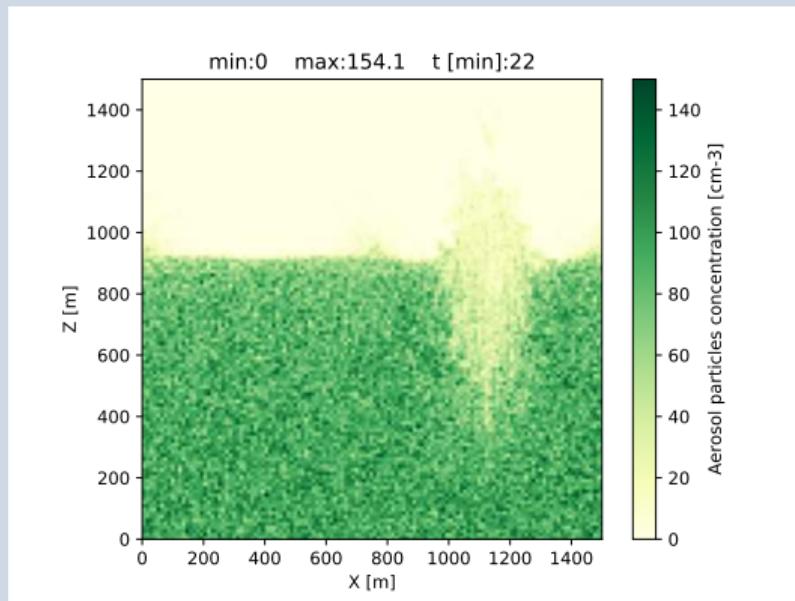
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

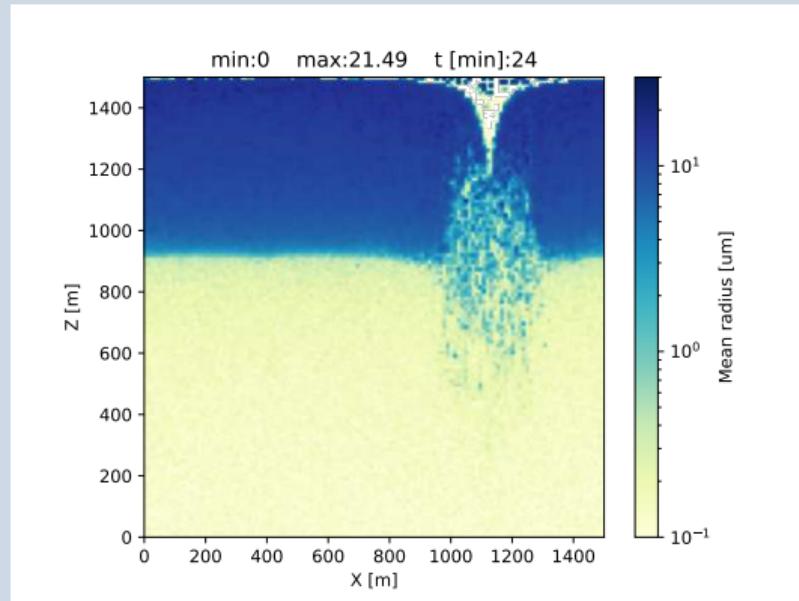
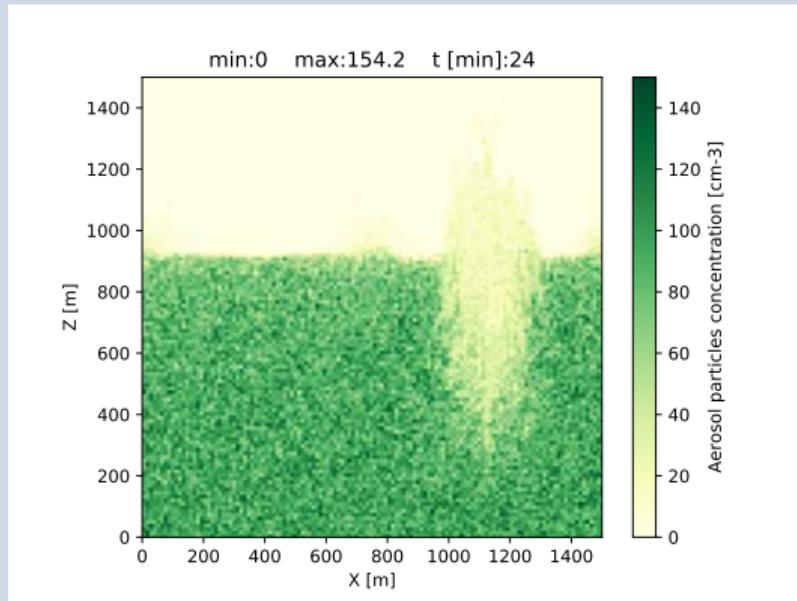
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

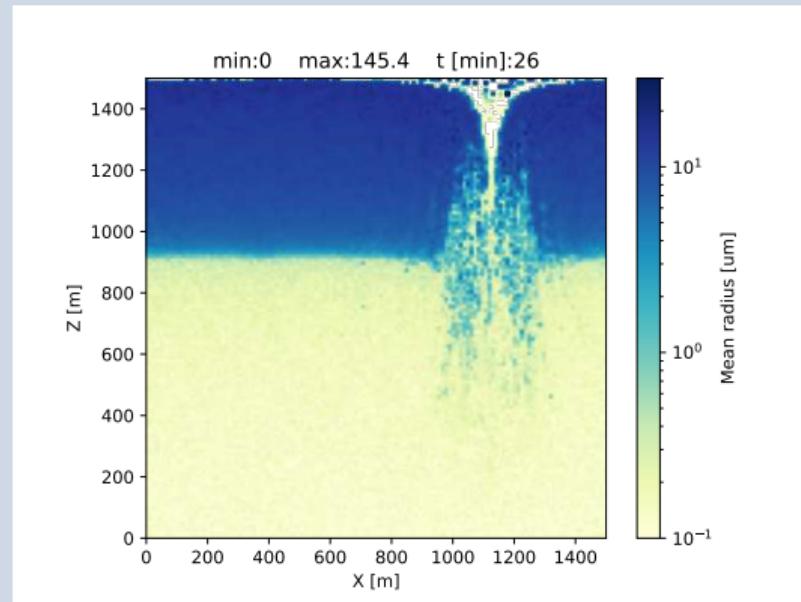
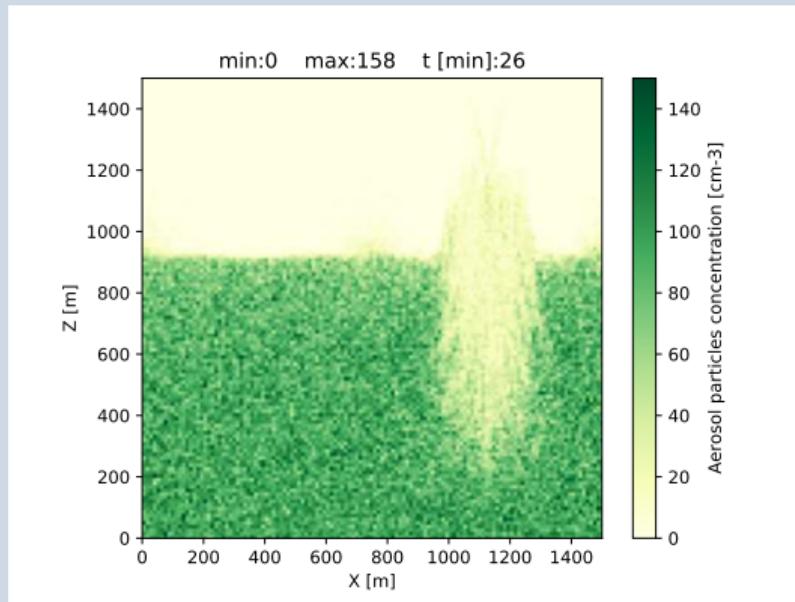
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

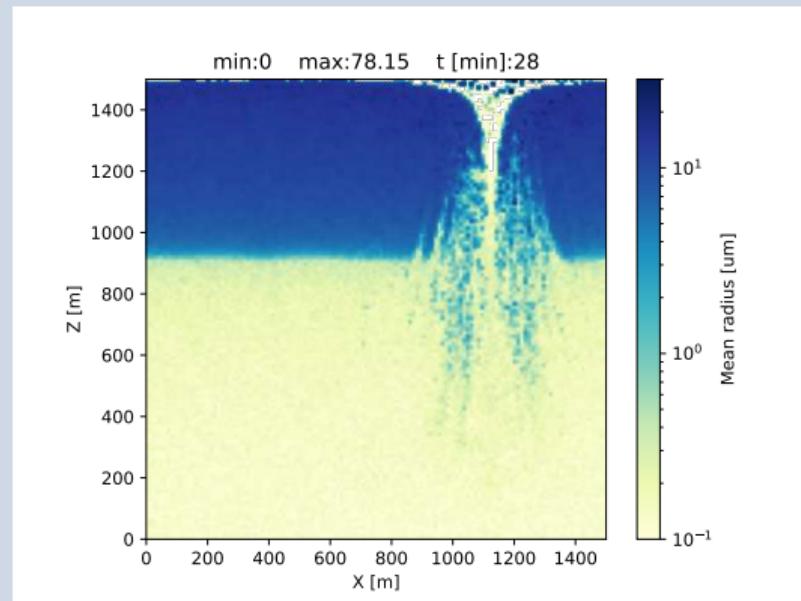
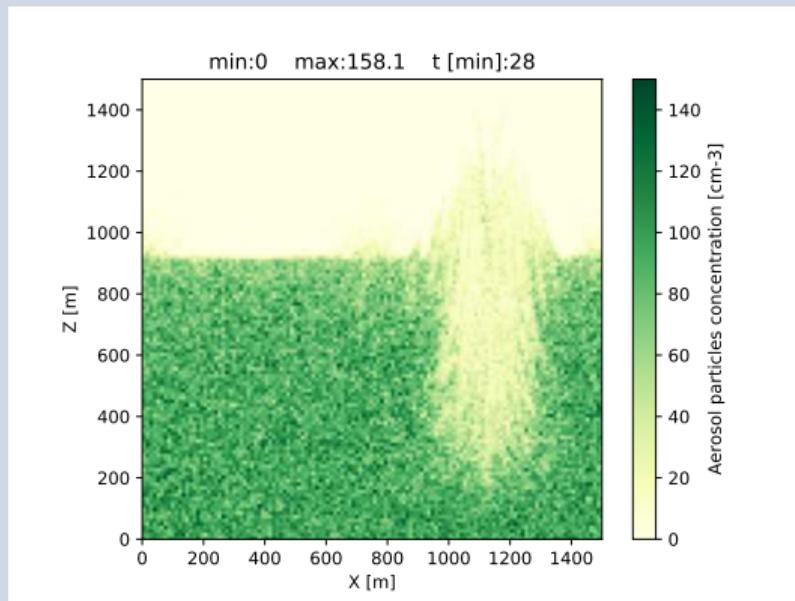
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

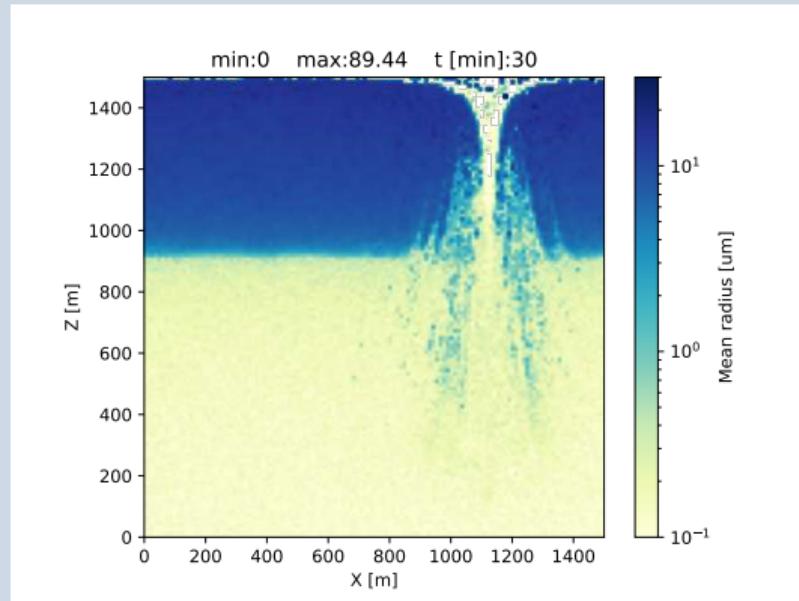
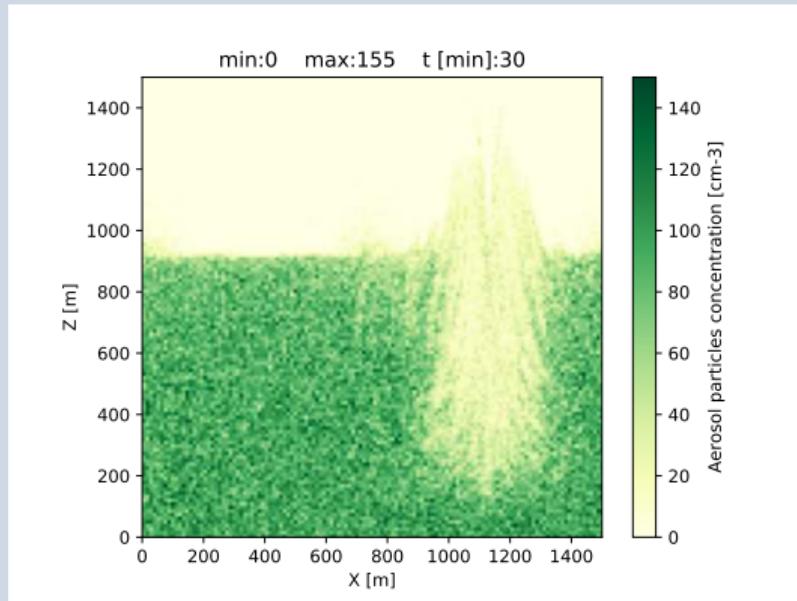
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

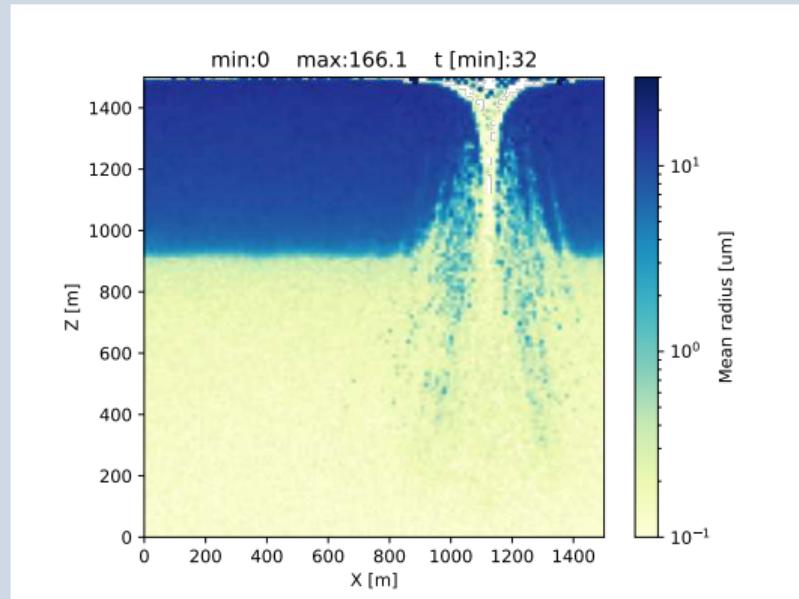
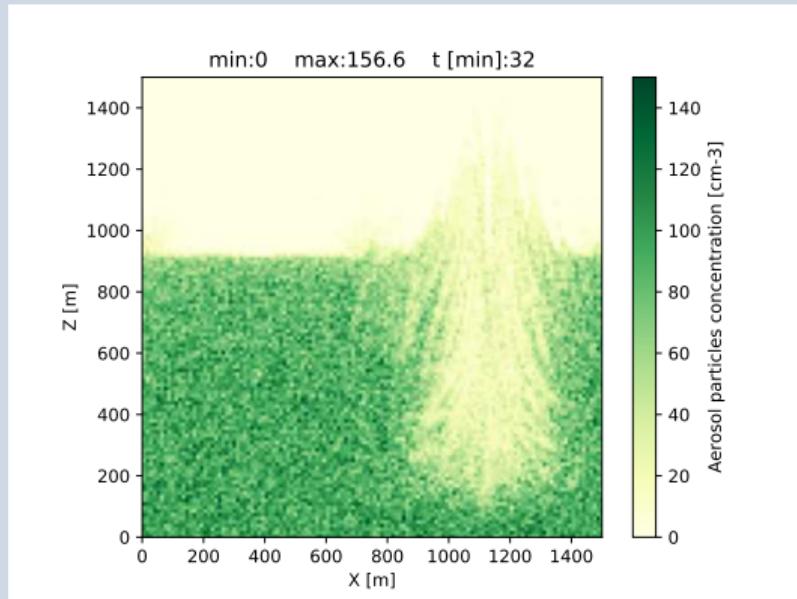
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

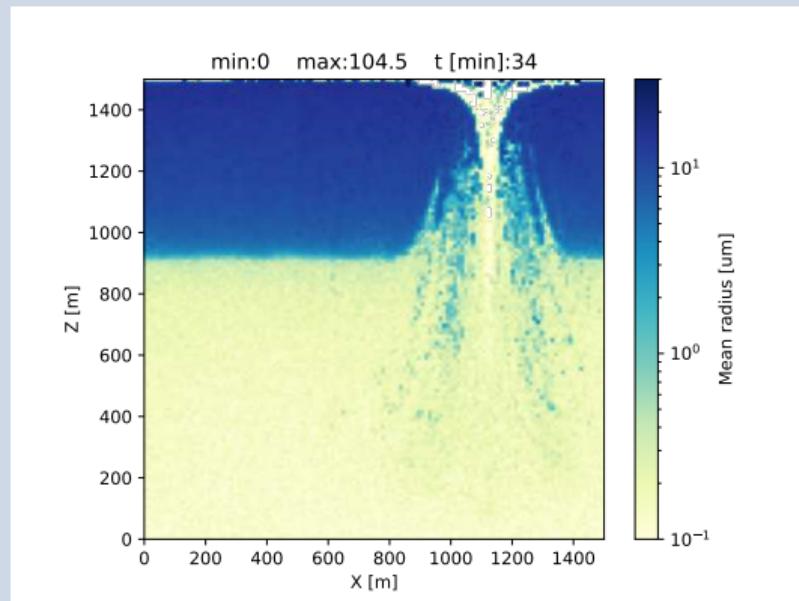
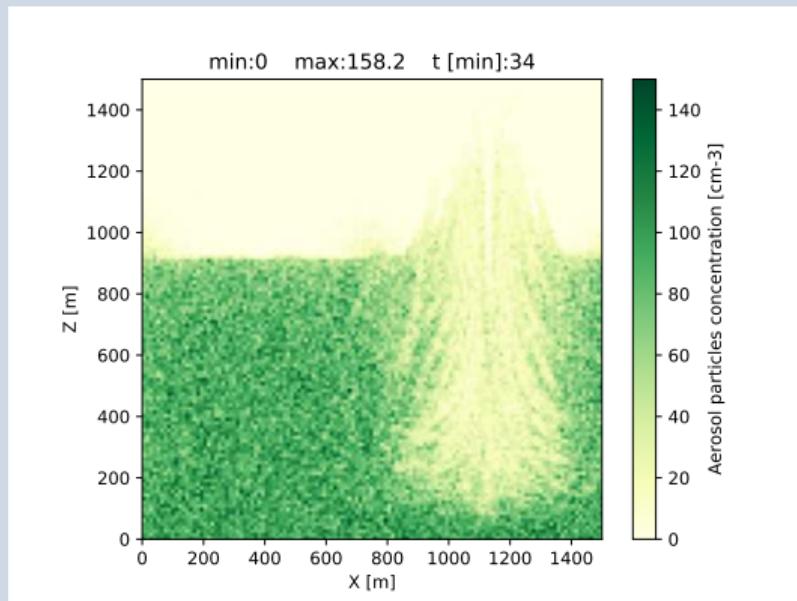
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

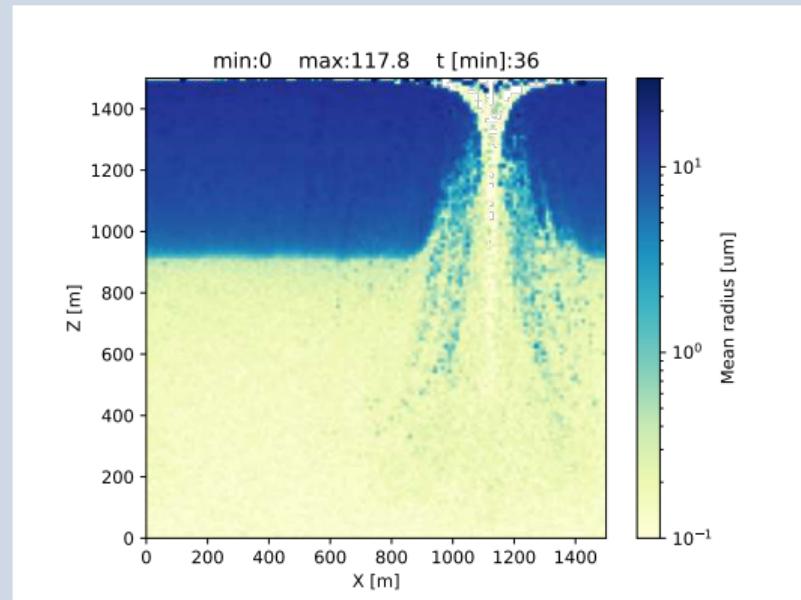
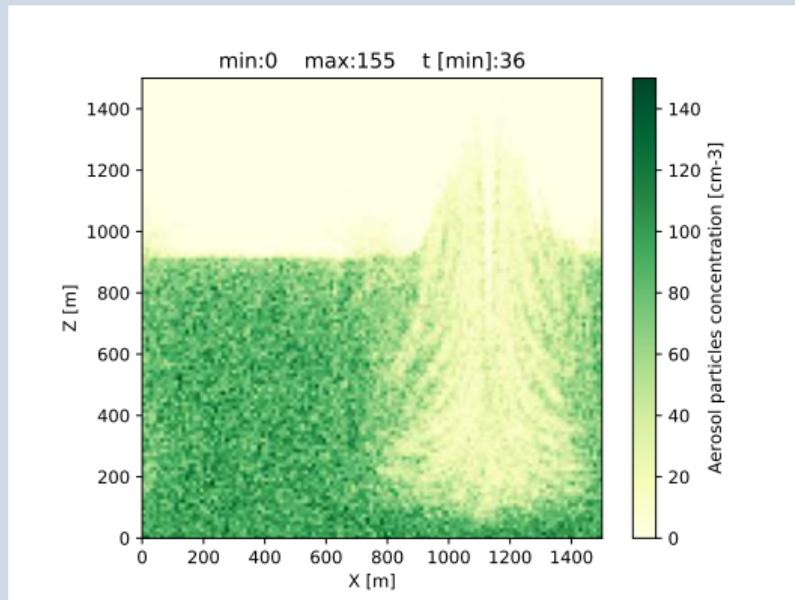
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

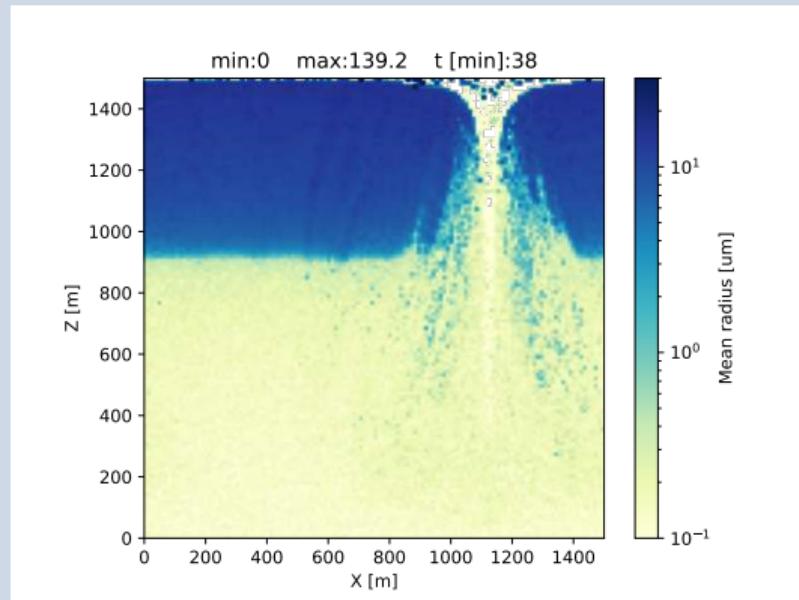
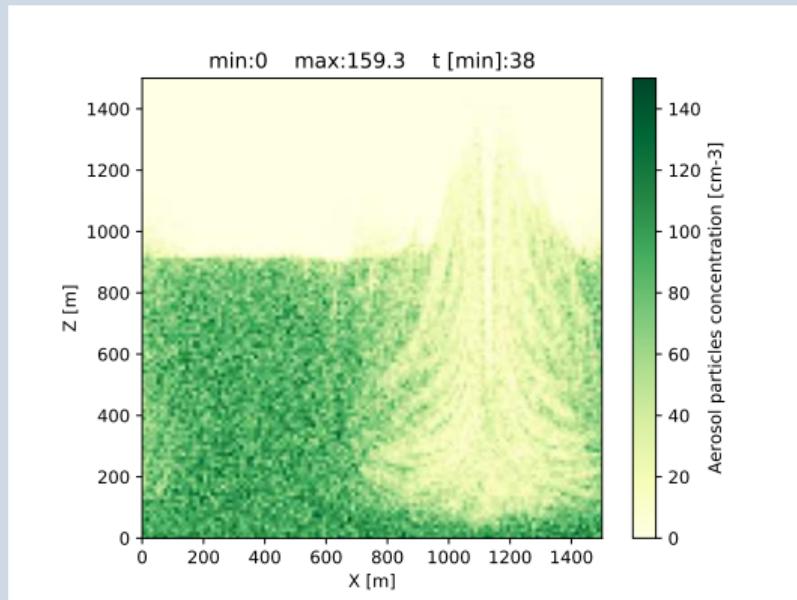
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

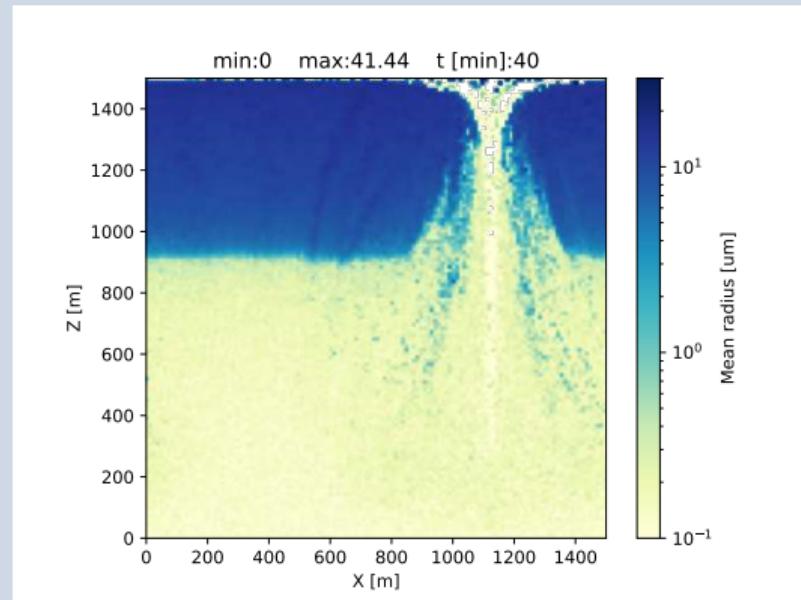
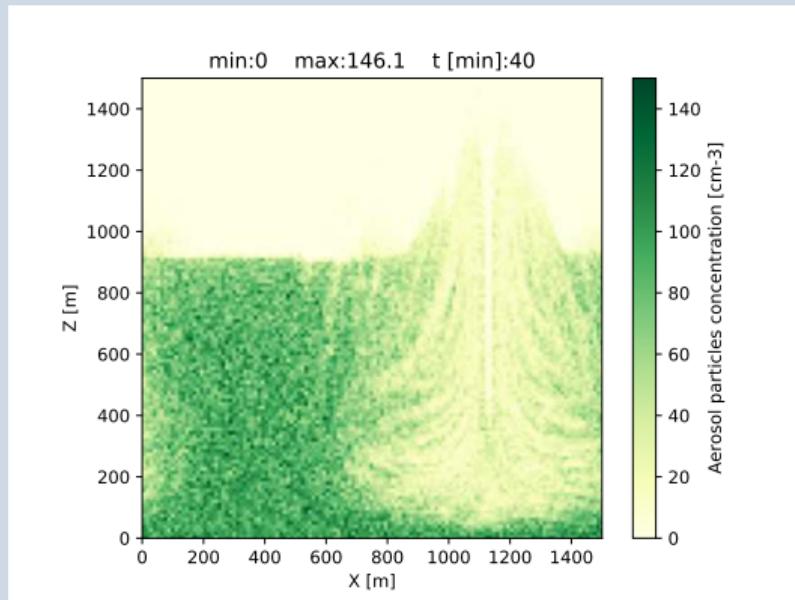
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek

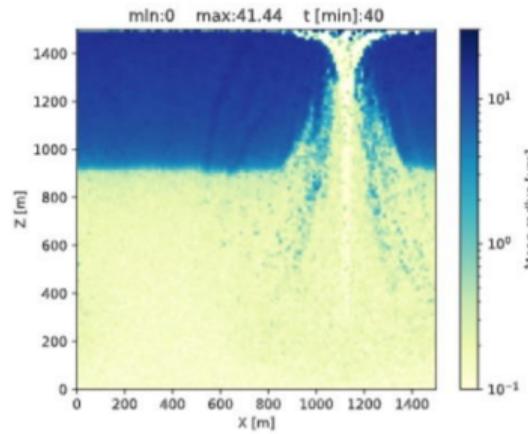
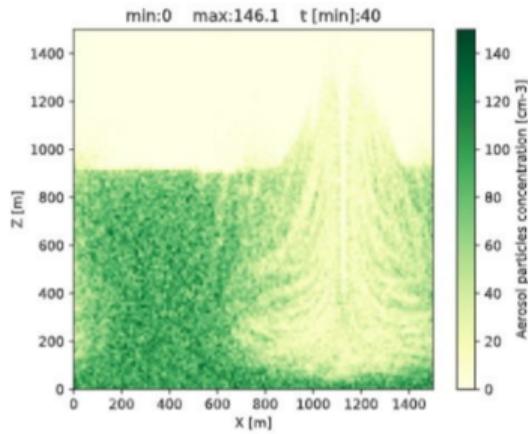


PySDM: przykładowa symulacja

Rozdzielcość siatki eulerowskiej: 128x128

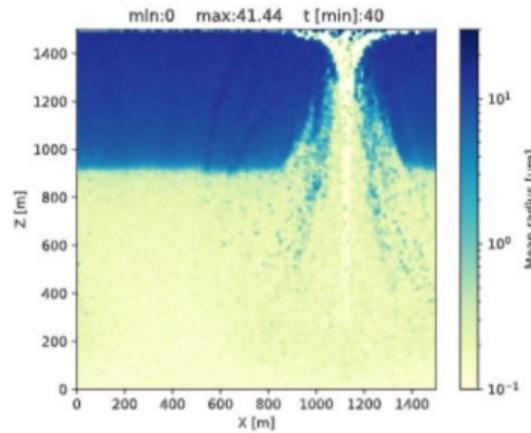
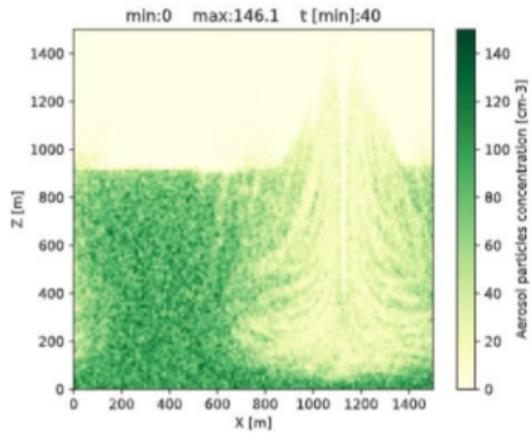
Rozdzielcość symulacji lagranżowskiej: 2^{21} super-kropelek



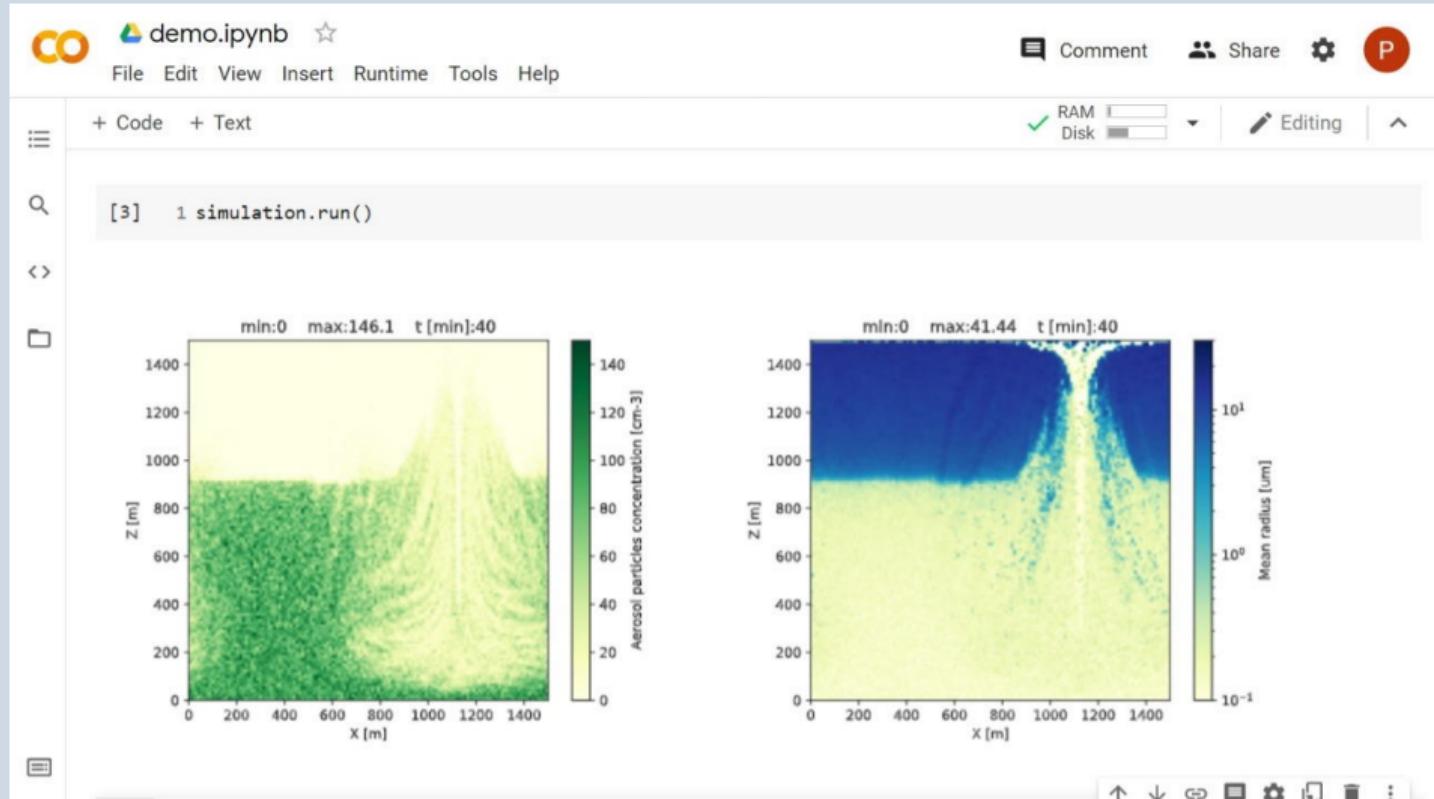


PySDM: 100% Python

```
[3] 1 simulation.run()
```



PySDM: 100% Python, Jupyter \rightsquigarrow przykłady



PySDM: 100% Python, Jupyter \rightsquigarrow przykłady, backendy CPU i GPU

The screenshot shows a Jupyter Notebook interface in Google Colab. The notebook title is "demo.ipynb". The menu bar includes File, Edit, View, Insert, Runtime, Tools, Help, and a status message "All changes saved". The toolbar has "Code" and "Text" buttons. The code cell [3] contains the command `simulation.run()`. In the background, there are two plots: one showing a spatial distribution of aerosol concentration (labeled "Aerosol") over a domain from 0 to 1400 m in both X and Z directions, and another showing a vertical profile of mean radius over time (labeled "t [min]:40"). A "Notebook settings" dialog is overlaid on the screen. It shows a dropdown for "Hardware accelerator" set to "GPU" with a help icon. Below it is a note: "To get the most out of Colab, avoid using a GPU unless you need one. [Learn more](#)". There is also a checkbox labeled "Omit code cell output when saving this notebook". At the bottom of the dialog are "CANCEL" and "SAVE" buttons.

<https://atmos.ii.uj.edu.pl/>

 Atmospheric Cloud Simulation Group @ Jagiellonian University

Poland <http://atmos.ii.uj.edu.pl/>

Overview Repositories 8 Projects Packages Teams 2 People 19 Settings

README .asd

News:

[JOSS under review] PySDM v2 outline paper
[youtube] Sylwester's talk at Caltech on PySDM/PyMPDATA mixed-phase cloud simulations
[PR] Ołeksii Bulenok's PR to ClimateMachine.jl exemplifying coupling with PySDM
[JOSS under review] PyMPDATA outline paper
[youtube] Piotr Bartman's Monte-Carlo on GPU with Python talk at NCAR's 2021 Improving Scientific Software conference
→ 2103.17238 PySDM outline paper (published in JOSS)
→ 2101.06318 Piotr Bartman's paper on the PySDM coagulation solver design (published in LNCS)
→ 2011.14726 Michael Olesik's paper on an application of PyMPDATA in bin microphysics (published in GMD)

Our technological stack:

Python NumPy Jupyter ThrustRTC/CUDA PySDM docs
Colab Codecov GitHub Actions Jupyter PyCharm

Our Python packages (with usage examples for Julia & Matlab):

PySDM: [pip package 2.0](#) [Codecov 76%](#) [PySDM docs](#) [pdoc3](#)
PySDM-examples: [pip package 2.0](#) [PySDM examples docs](#) [pdoc3](#)
PyMPDATA: [pip package 1.0.1](#) [Codecov 91%](#) [PyMPDATA docs](#) [pdoc3](#)
PyMPDATA-examples: [pip package 1.0.1](#) [PyMPDATA examples docs](#) [pdoc3](#)
numba-mpi: [pip package 0.3](#) [numba mpi docs](#) [pdoc3](#)
atmos-cloud-sim-utils: [pip package 0.5](#) [utilis docs](#) [pdoc3](#)

Funding:

EU Funding by FNP PL Funding by NCN US DOE Funding by ASR

View as: Public You are viewing this page as a public user.

People

Invite someone

Top languages

Python Jupyter Notebook

Most used topics

#pypi-package #python #atmospheric-modelling
#numba #atmospheric-physics

współautorzy

- ▶ **@uj.edu.pl:** P. Bartman, M. Olesik, G. Łazarski, O. Bulenok, K. Derlatka, ...
- ▶ **@caltech.edu:** E. de Jong, C. Singer, A. Jaruga, B. Mackay, S. Azimi, ...
- ▶ **@illinois.edu:** N. Riemer, M. West & J. Curtis

Podziękowania

współautorzy

- ▶ **@uj.edu.pl:** P. Bartman, M. Olesik, G. Łazarski, O. Bulenok, K. Derlatka, ...
- ▶ **@caltech.edu:** E. de Jong, C. Singer, A. Jaruga, B. Mackay, S. Azimi, ...
- ▶ **@illinois.edu:** N. Riemer, M. West & J. Curtis

finansowanie

- ▶ **PL** / Narodowe Centrum Nauki
- ▶ **EU** / Fundacja na rzecz Nauki Polskiej
- ▶ **US** / DOE Atmospheric System Research & Schmidt Futures

Podziękowania

współautorzy

- ▶ **@uj.edu.pl:** P. Bartman, M. Olesik, G. Łazarski, O. Bulenok, K. Derlatka, ...
- ▶ **@caltech.edu:** E. de Jong, C. Singer, A. Jaruga, B. Mackay, S. Azimi, ...
- ▶ **@illinois.edu:** N. Riemer, M. West & J. Curtis

finansowanie

- ▶ **PL** / Narodowe Centrum Nauki
- ▶ **EU** / Fundacja na rzecz Nauki Polskiej
- ▶ **US** / DOE Atmospheric System Research & Schmidt Futures

Dziękuję za uwagę!

<https://atmos.ii.uj.edu.pl/>
sylwester.arabas@uj.edu.pl

Lagranżowski opis μ -fizyki a dynamika płynu

komponent eulerowski (PDE)

komponent lagranżowski (ODE/Monte-Carlo)

Lagranżowski opis μ -fizyki a dynamika płynu

komponent eulerowski (PDE)	komponent lagranżowski (ODE/Monte-Carlo)
adwekcja ciepła adwekcja wilgoci	transport cząstek

Lagranżowski opis μ -fizyki a dynamika płynu

komponent eulerowski (PDE)	komponent lagranżowski (ODE/Monte-Carlo)
adwekcja ciepła adwekcja wilgoci	transport cząstek wzrost kondensacyjny wzrost koagulacyjny osiadanie

Lagranżowski opis μ -fizyki a dynamika płynu

komponent eulerowski (PDE)	komponent lagranżowski (ODE/Monte-Carlo)
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 μ -fizyki a dynamika płynu

komponent eulerowski (PDE)	komponent lagranżowski (ODE/Monte-Carlo)
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
...	...