

# Nowoczesny model chmury

Hanna Pawłowska, Anna Jaruga, Sylwester Arabas

Instytut Geofizyki  
Wydział Fizyki  
Uniwersytet Warszawski

24 maja 2013





NARODOWE CENTRUM NAUKI

konkurs HARMONIA – badania podstawowe  
realizowane w ramach współpracy międzynarodowej

- ▶ Projekt: **Przetwarzanie aerozolu przez chmury - budowa wszechstronnego zaprogramowanego obiektowo narzędzia do symulacji numerycznych.**





NARODOWE CENTRUM NAUKI

konkurs HARMONIA – badania podstawowe  
realizowane w ramach współpracy międzynarodowej

- ▶ Projekt: **Przetwarzanie aerozolu przez chmury - budowa wszechstronnego zaprogramowanego obiektowo narzędzia do symulacji numerycznych.**
- ▶ Czas trwania: 3 lata





NARODOWE CENTRUM NAUKI

konkurs HARMONIA – badania podstawowe  
realizowane w ramach współpracy międzynarodowej

- ▶ Projekt: **Przetwarzanie aerozolu przez chmury - budowa wszechstronnego zaprogramowanego obiektowo narzędzia do symulacji numerycznych.**
- ▶ Czas trwania: 3 lata
- ▶ Budżet: 996 890,00 zł.





NARODOWE CENTRUM NAUKI

konkurs HARMONIA – badania podstawowe  
realizowane w ramach współpracy międzynarodowej

- ▶ Projekt: **Przetwarzanie aerozolu przez chmury - budowa wszechstronnego zaprogramowanego obiektowo narzędzia do symulacji numerycznych.**
- ▶ Czas trwania: 3 lata
- ▶ Budżet: 996 890,00 zł.
- ▶ Współpraca:

Piotr Smolarkiewicz   Wojciech Grabowski



# Nowoczesny model chmury: wyzwania

---



# Nowoczesny model chmury: wyzwania

Stevens & Feingold 2009

doi:10.1038/nature08281

„the difficulty in untangling relationships among the aerosol, clouds and precipitation reflects the inadequacy of existing tools and methodologies”



# Nowoczesny model chmury: wyzwania

Stevens & Feingold 2009

doi:10.1038/nature08281

„the difficulty in untangling relationships among the aerosol, clouds and precipitation reflects the inadequacy of existing tools and methodologies”

Morin et al. 2012

doi:10.1126/science.1218263

„the inability to reproduce many published computational results or to perform credible peer review in the absence of program source code has contributed to a perceived “credibility crisis” for research computation”



# Nowoczesny model chmury: wyzwania

Stevens & Feingold 2009

doi:10.1038/nature08281

„the difficulty in untangling relationships among the aerosol, clouds and precipitation reflects the inadequacy of existing tools and methodologies”

Morin et al. 2012

doi:10.1126/science.1218263

„the inability to reproduce many published computational results or to perform credible peer review in the absence of program source code has contributed to a perceived “credibility crisis” for research computation”

Ince et al. 2012

doi:10.1038/nature10836

„anything less than the release of source programs is intolerable for results that depend on computation”

# Podstawowy cel naszego projektu HARMONIA

---

stworzenie **nowoczesnego modelu chmury:**



# Podstawowy cel naszego projektu HARMONIA

---

stworzenie **nowoczesnego modelu chmury:**

- ▶ umożliwiającego badanie oddziaływania aerozolu z chmurami i opadem



stworzenie **nowoczesnego modelu chmury:**

- ▶ umożliwiającego badanie oddziaływania aerozolu z chmurami i opadem
- ▶ zapewniającego, w praktyce, sprawdzalność wyników



stworzenie **nowoczesnego modelu chmury:**

- ▶ umożliwiającego badanie oddziaływania aerozolu z chmurami i opadem
- ▶ zapewniającego, w praktyce, sprawdzalność wyników
  - ▶ publiczna dostępność kodu

stworzenie **nowoczesnego modelu chmury:**

- ▶ umożliwiającego badanie oddziaływania aerozolu z chmurami i opadem
- ▶ zapewniającego, w praktyce, sprawdzalność wyników
  - ▶ publiczna dostępność kodu
  - ▶ możliwość jednoznacznego określenia wersji kodu (i środowiska)

# Podstawowy cel naszego projektu HARMONIA

---

stworzenie **nowoczesnego modelu chmury:**

- ▶ umożliwiającego badanie oddziaływania aerozolu z chmurami i opadem
- ▶ zapewniającego, w praktyce, sprawdzalność wyników
  - ▶ publiczna dostępność kodu
  - ▶ możliwość jednoznacznego określenia wersji kodu (i środowiska)
  - ▶ łatwość użycia = dokumentacja + przenośność + niezawodność



# Plan prezentacji

---

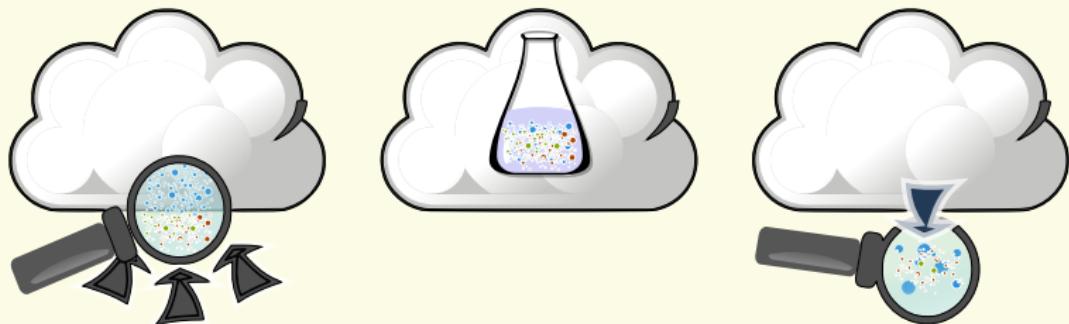
- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Jak opisać w modelu oddziaływanie, aerozolu chmur i opadu?
- Jak napisać kod modelu łatwy w użyciu, zrozumieniu i rozbudowie?
- Zaproszenie do współpracy

# Plan prezentacji

---

- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Jak opisać w modelu oddziaływanie, aerozolu chmur i opadu?
- Jak napisać kod modelu łatwy w użyciu, zrozumieniu i rozbudowie?
- Zaproszenie do współpracy

# Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: procesy



- ▶ aktywacja kropelek na aerozolu
- ▶ kondensacja

# Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: procesy



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

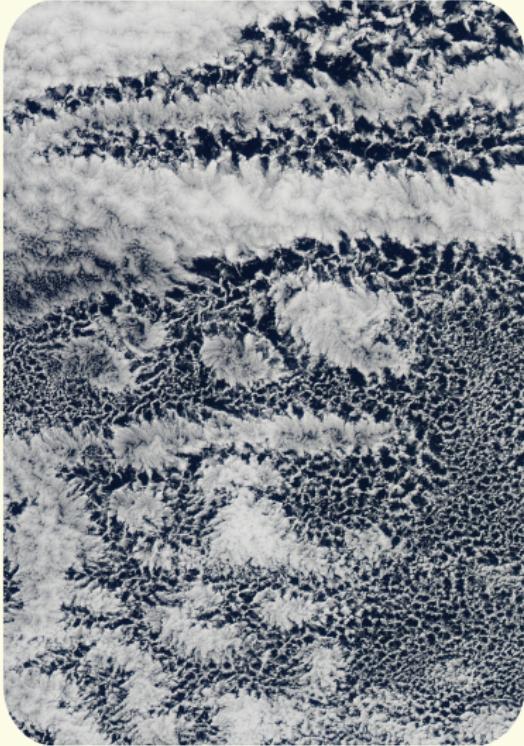
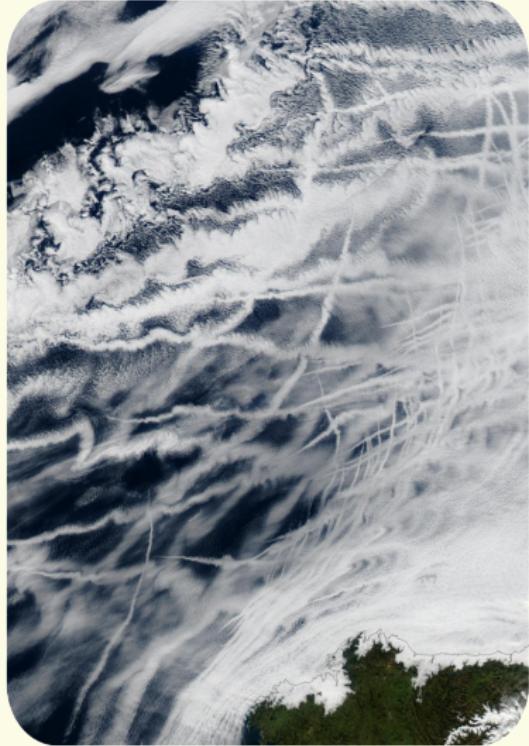


# Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: procesy

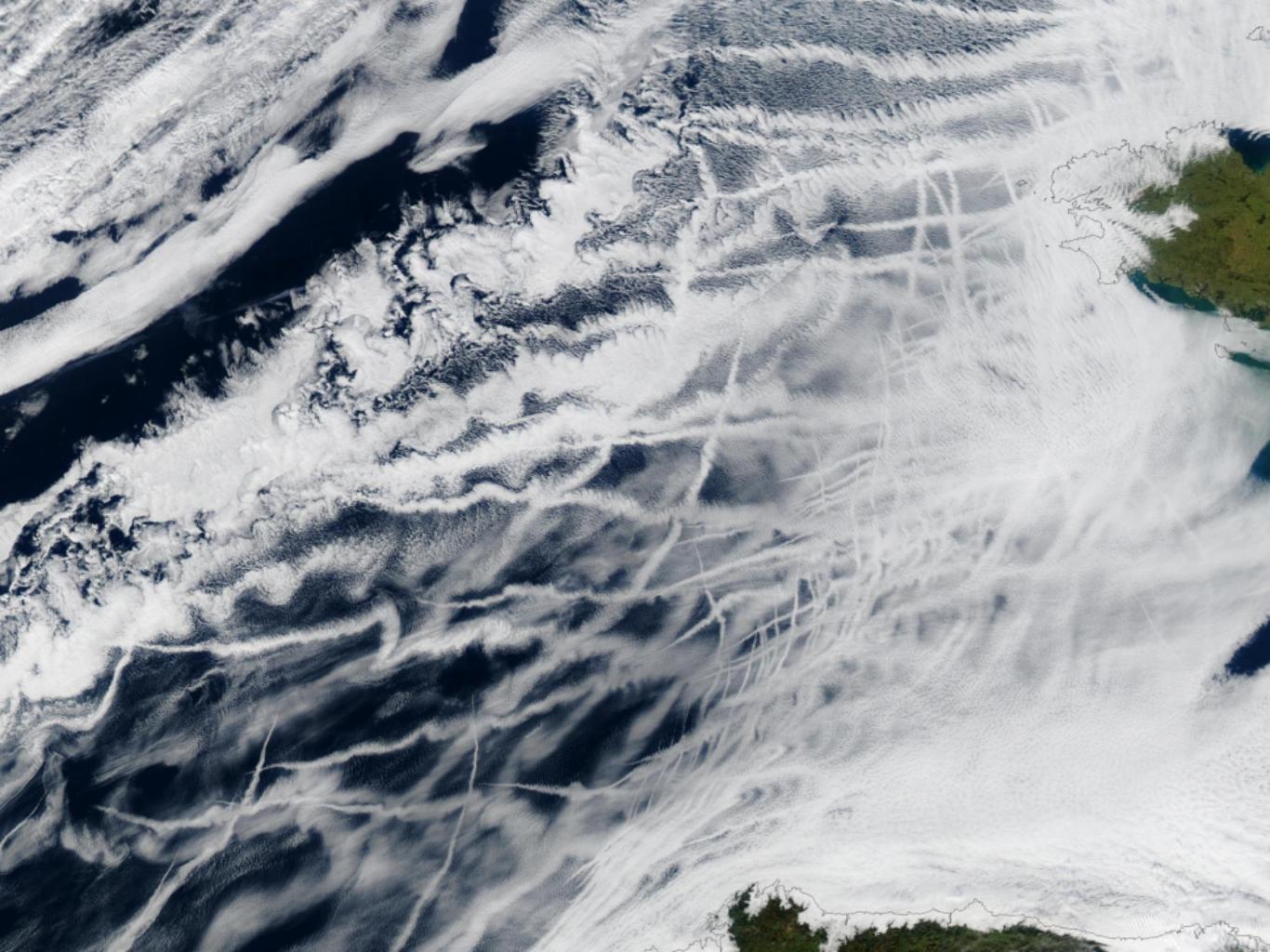


- ▶ aktywacja kropelek na aerozolu
- ▶ kondensacja
- ▶ zderzenia pomiędzy kropelkami
- ▶ procesy chemiczne zachodzące w kropelkach
- ▶ opad
- ▶ wymywanie aerozolu
- ▶ odparowywanie kropelek

## Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: przykłady

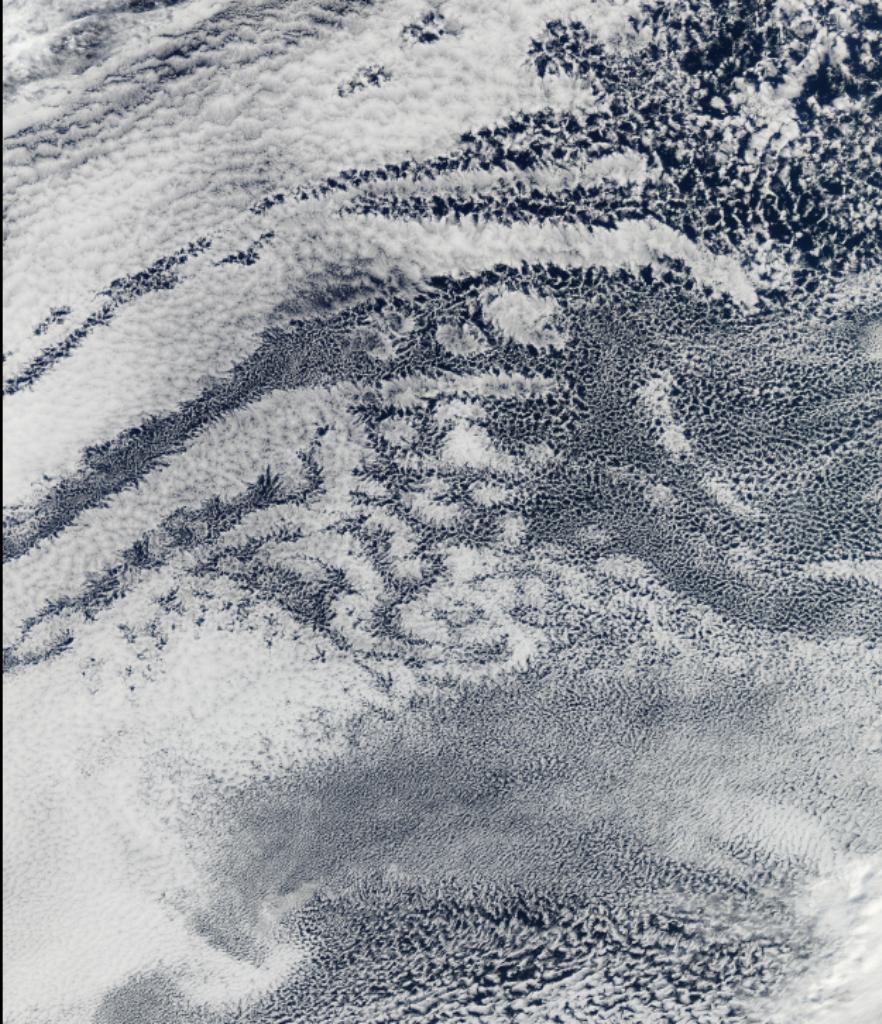


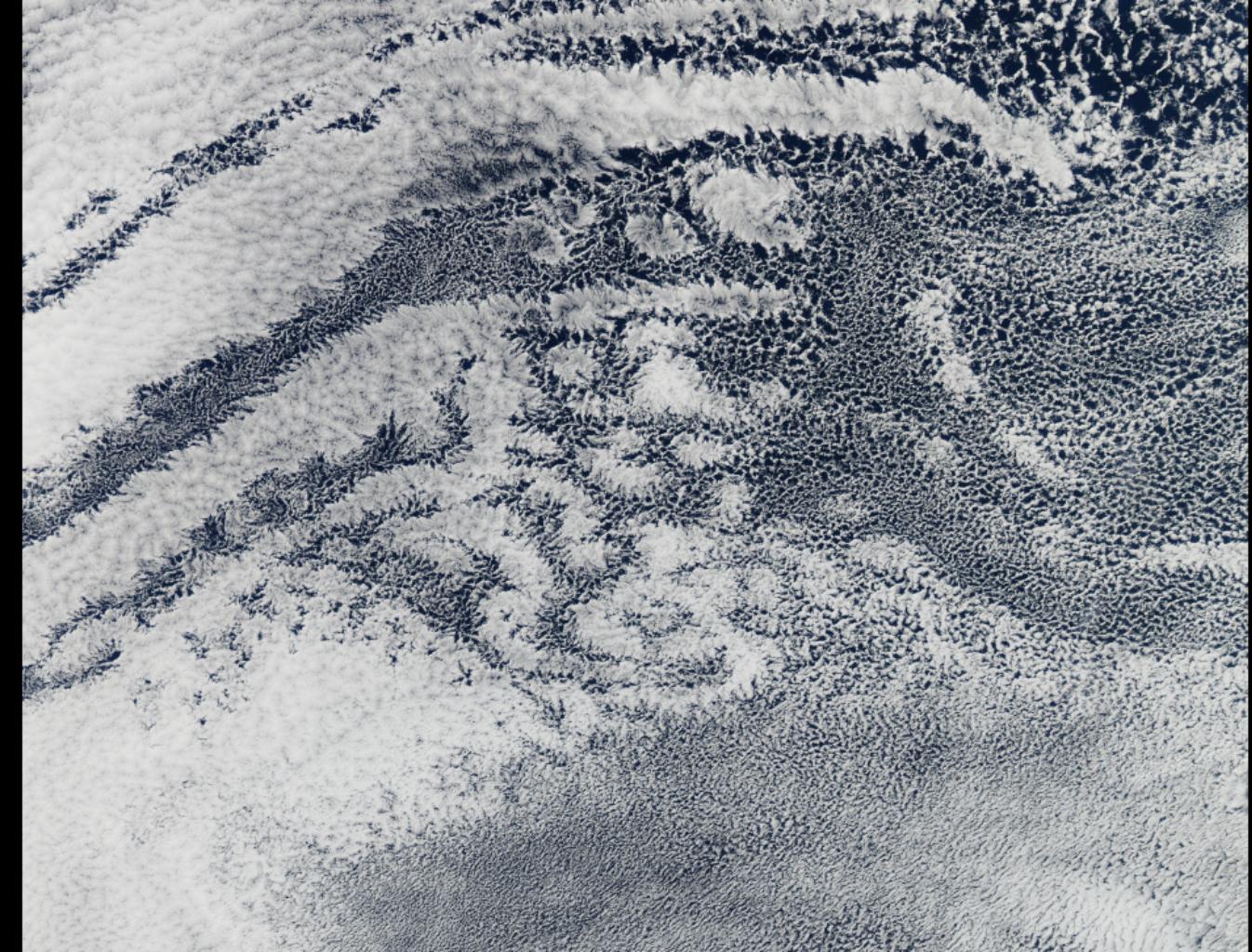
źródło: NASA (27 I 2003 – Zatoka Biskajska; 17 IV 2010 – Pacyfik u wybrzeży Peru)

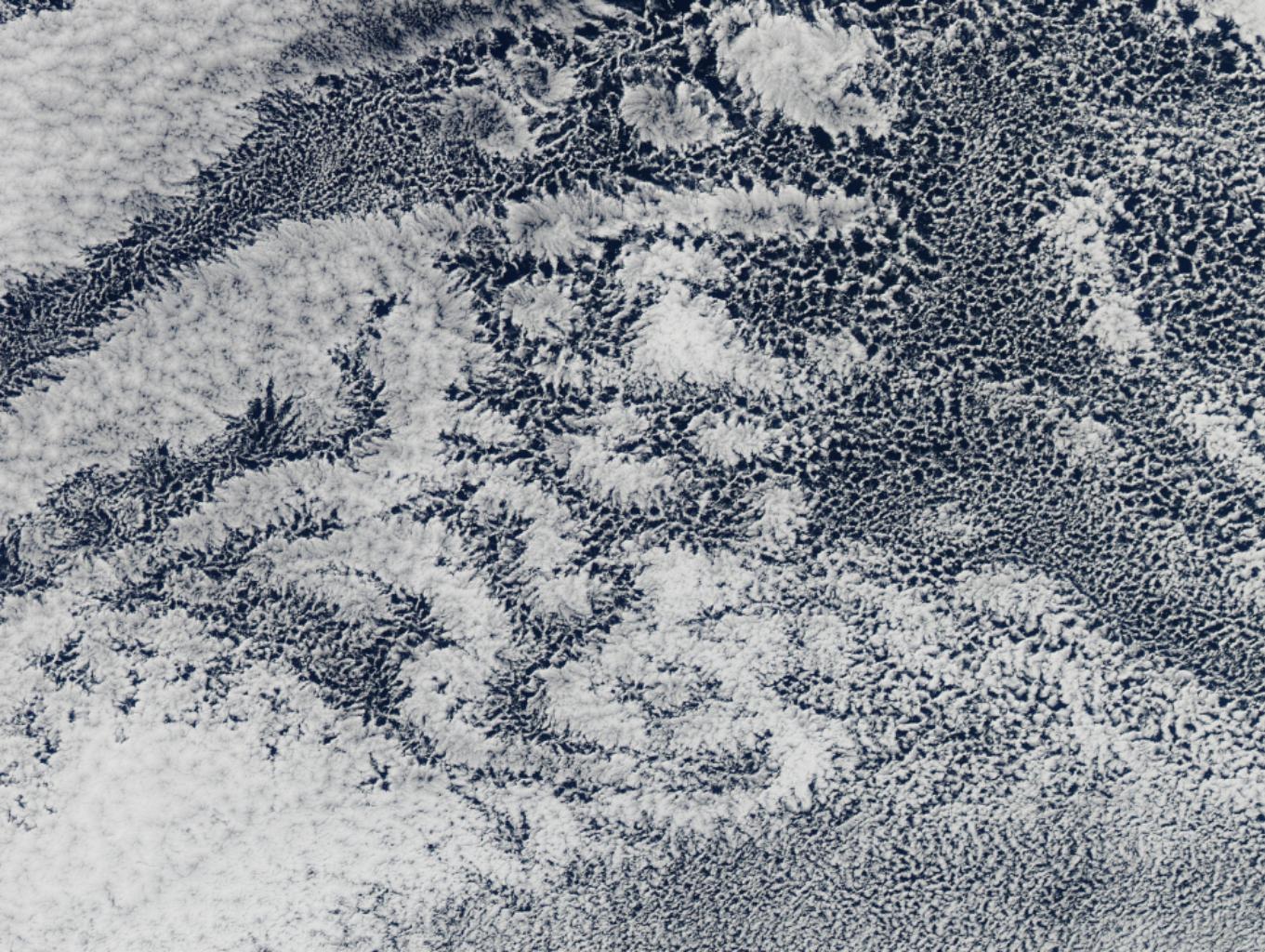


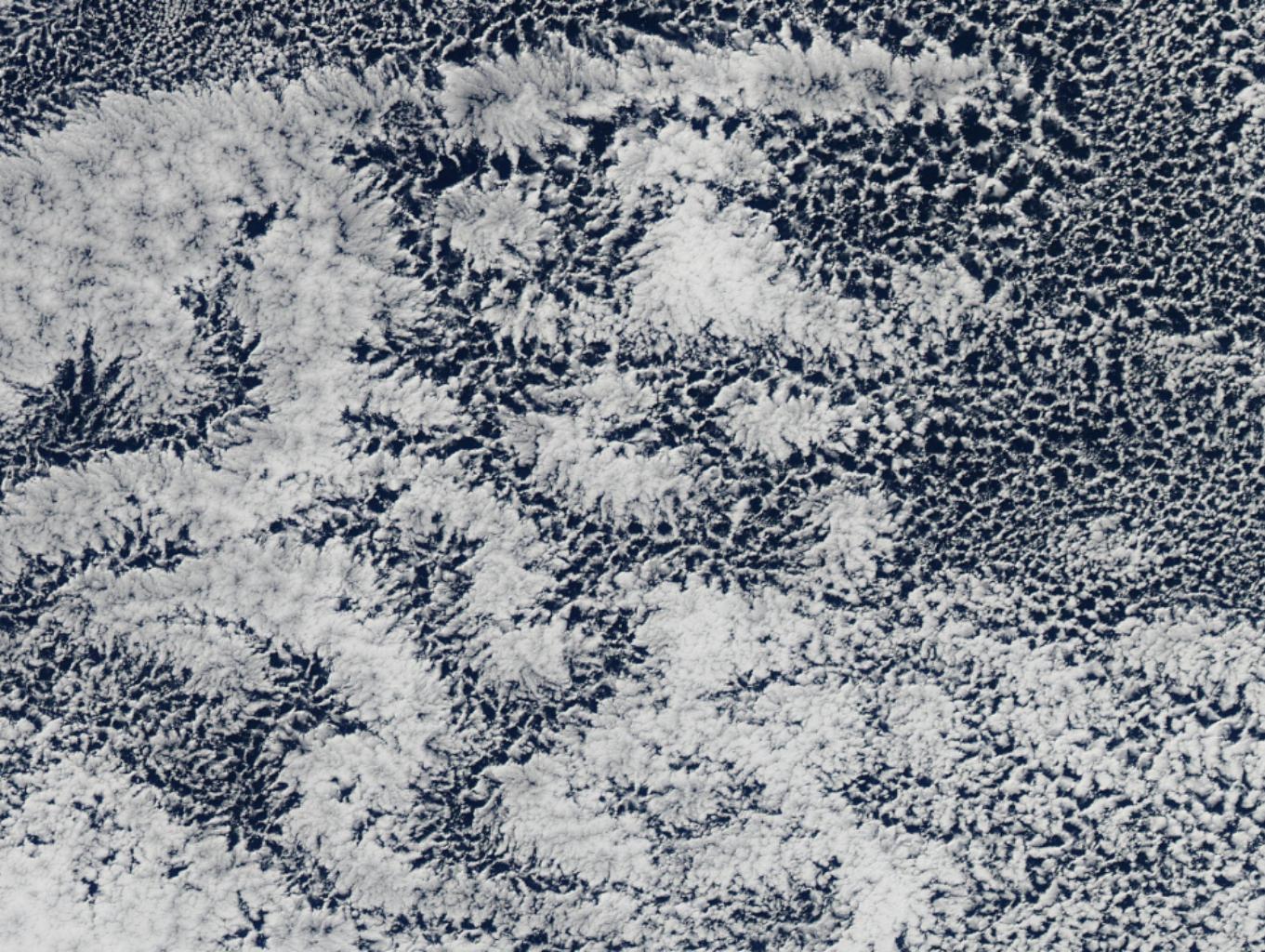


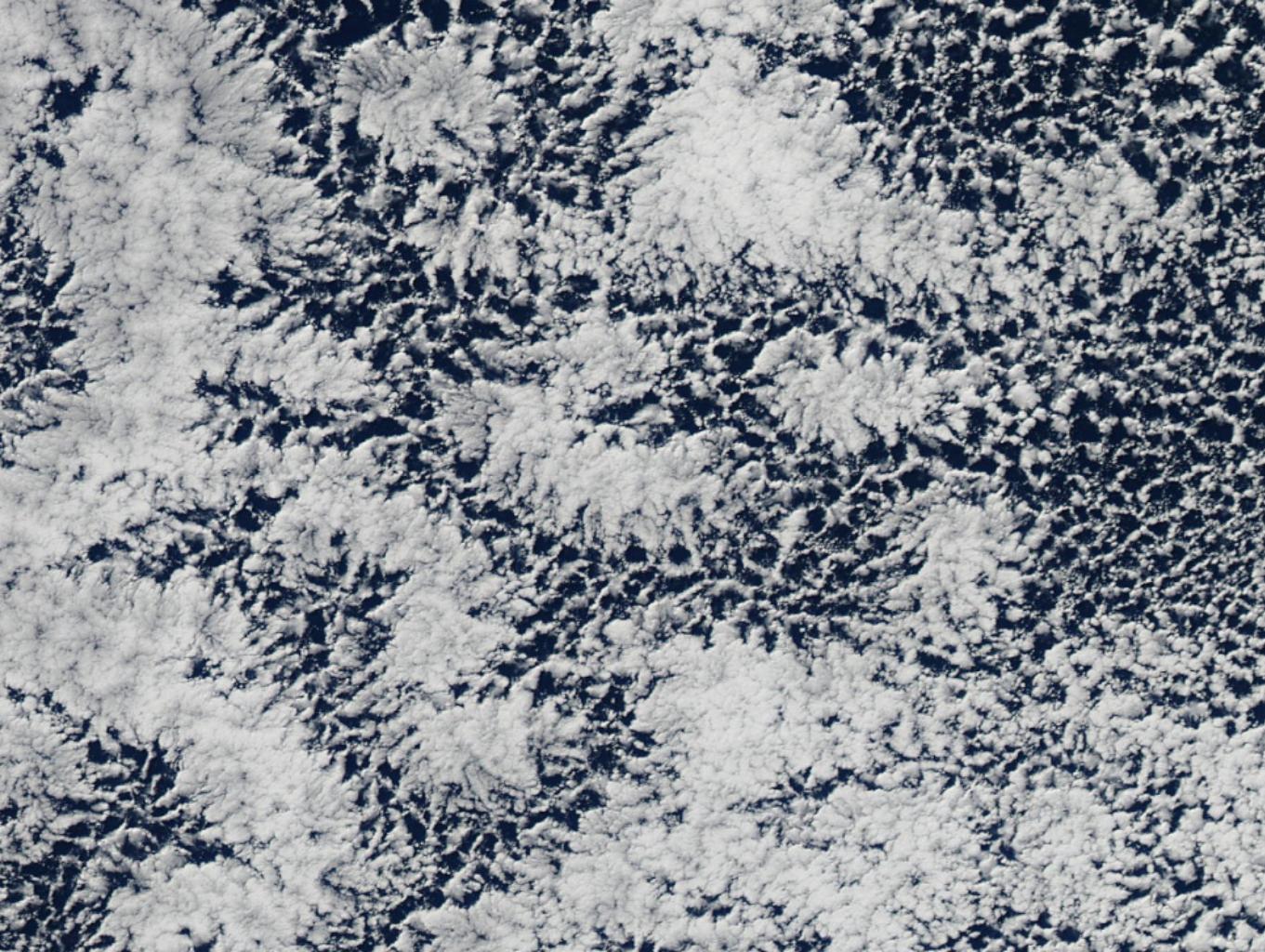
źródło: NASA

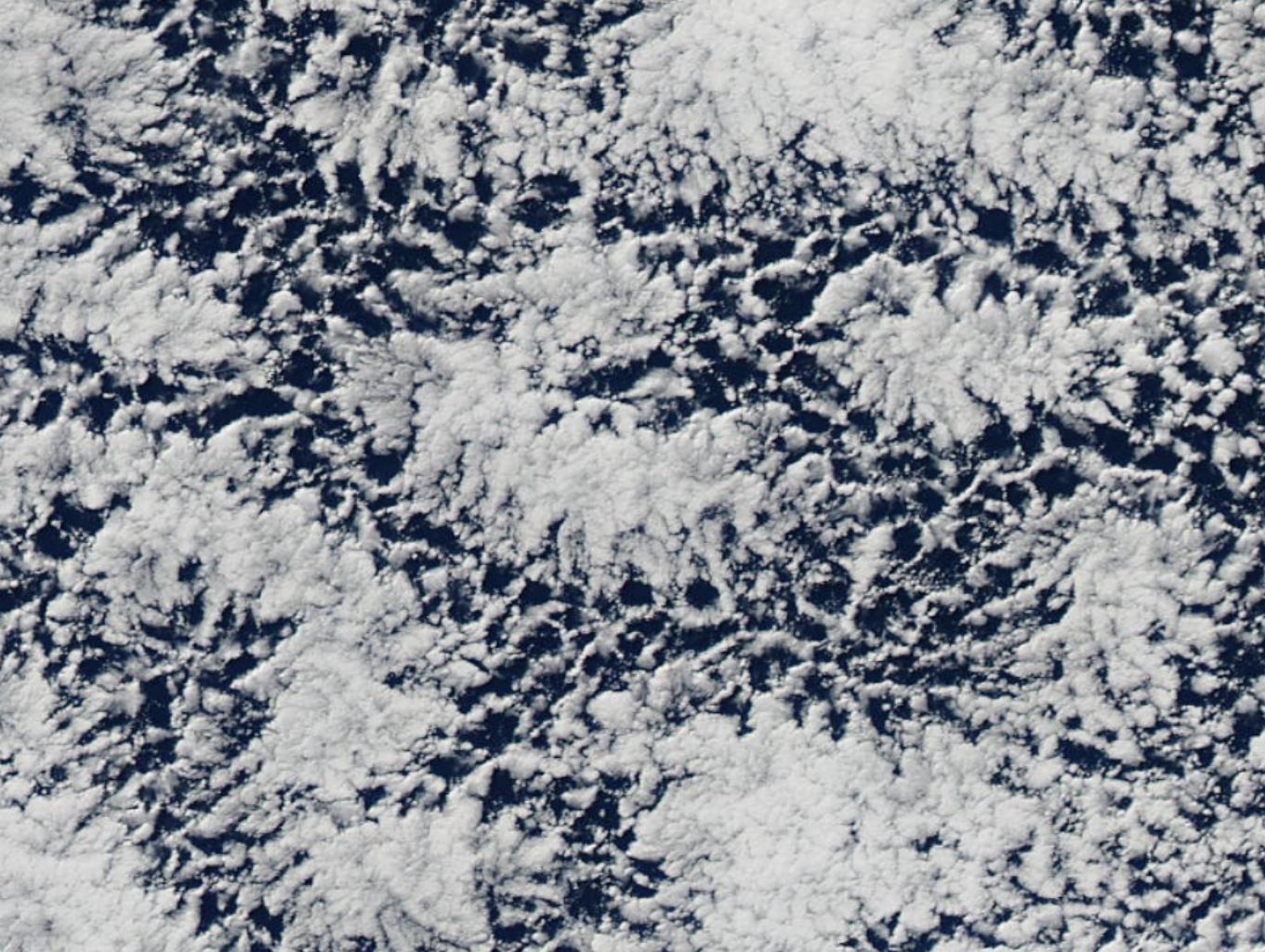




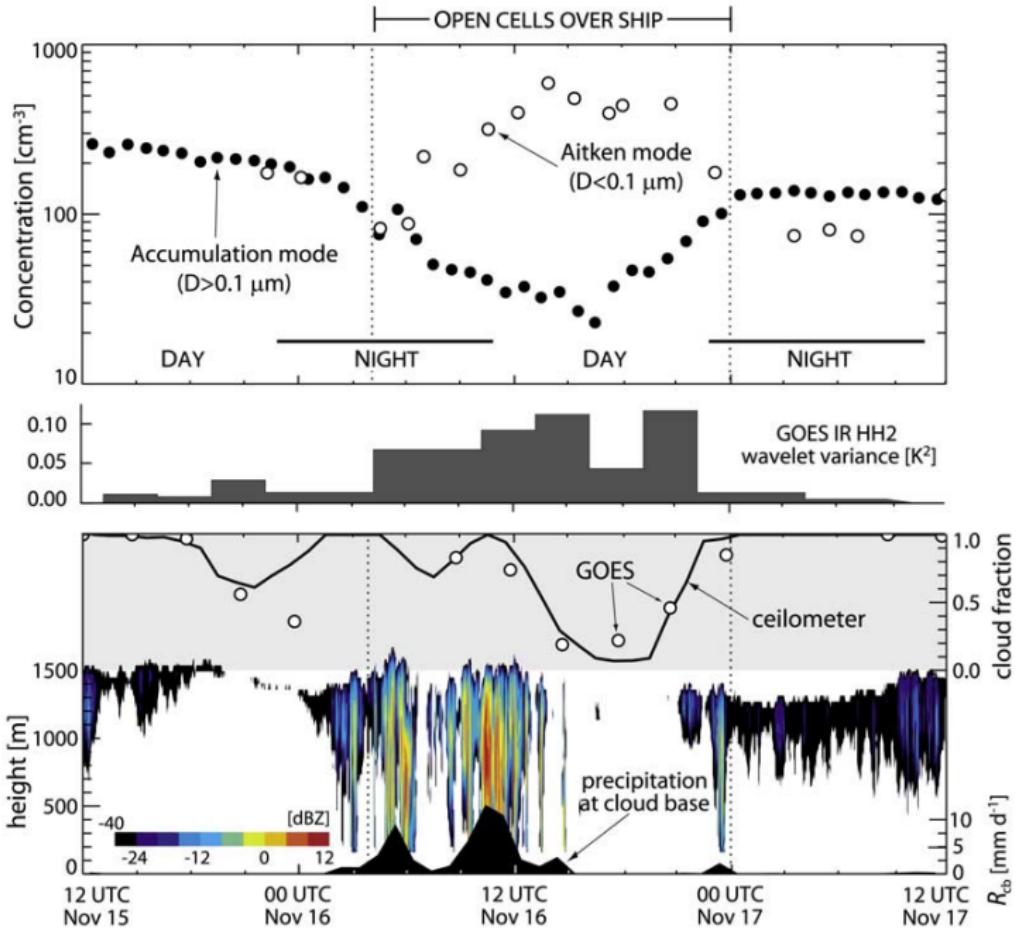








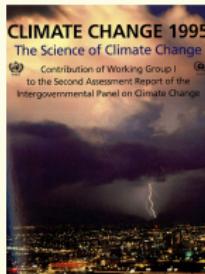




# Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: czy istotne?

---

# Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: czy istotne?



IPCC 1995

(1992) and Hoyt and Schatten (1993), while the upper range of 0.6% is in reasonable agreement with Nesme-Ribes *et al.* (1993) and corresponds to a radiative forcing of 1.4

expands that conclusion to show that the variations in solar output over the coming century are unlikely to exceed those observed since the Maunder Minimum.

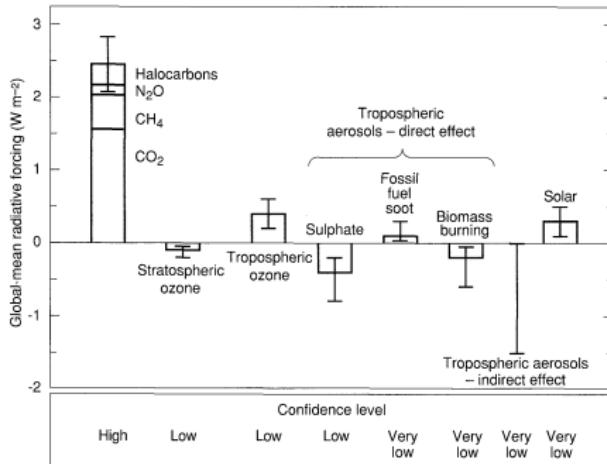
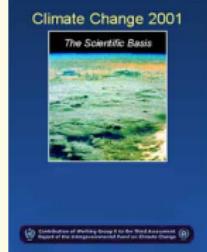
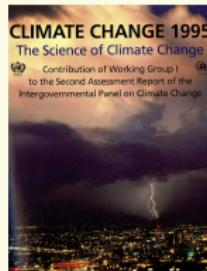


Figure 2.16: Estimates of the globally and annually averaged anthropogenic radiative forcing (in  $\text{W m}^{-2}$ ) due to changes in concentrations of greenhouse gases and aerosols from pre-industrial times to the present day and to natural changes in solar output from 1850 to the present day. The height of the rectangular bar indicates a mid-range estimate of the forcing whilst the error bars show an

# Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: czy istotne?



IPCC 2001

392

Radiative Forcing of Climate Change

Global and annual mean radiative forcing (1750 to present)

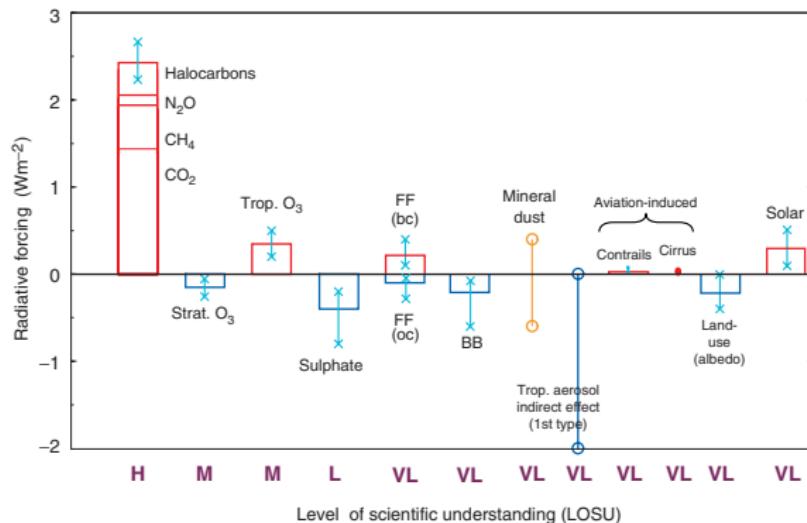
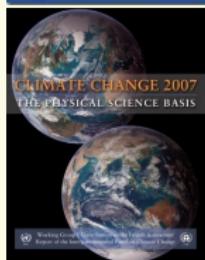
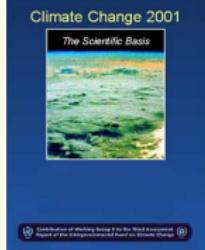
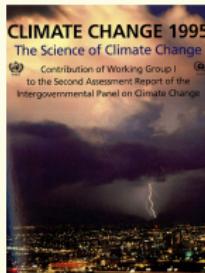


Figure 6.6: Global, annual mean radiative forcings ( $\text{Wm}^{-2}$ ) due to a number of agents for the period from pre-industrial (1750) to present (late 1990s; about 2000) (numerical values are also listed in Table 6.11). For detailed explanations see Section 6.13. The height of the rectangular bar denotes a central or best estimate value while its absence denotes no best estimate is possible. The vertical line about the rectangular bar with “x”



# Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: czy istotne?



## IPCC 2007

in Radiative Forcing

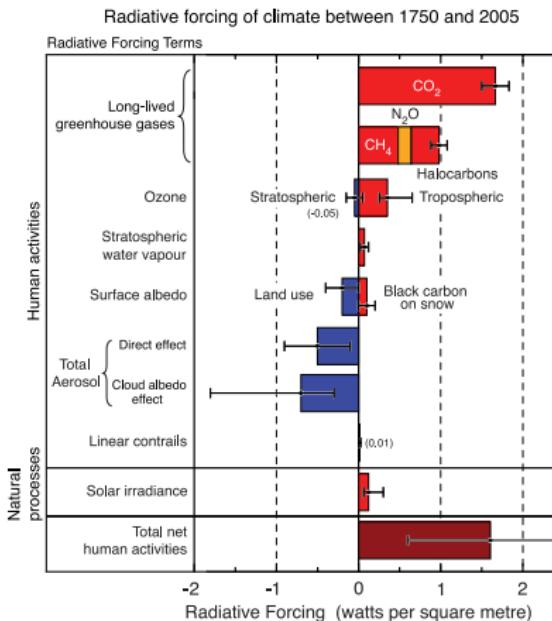
Chapter 2

processes  
osphere.  
dust re-  
aerosols,  
and and  
aerosols

ected by

forcing  
1 by hu-  
2. The  
ve to the  
'50). The  
increases,  
ose due  
use each  
on in the  
e gases,  
t forcing  
increas-  
g, while contrib-

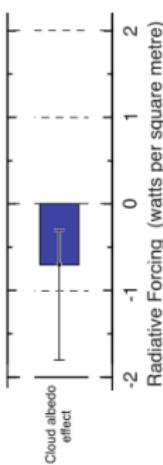
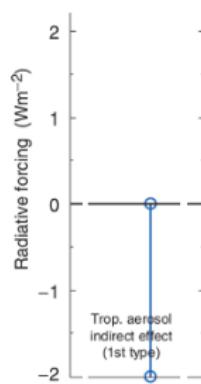
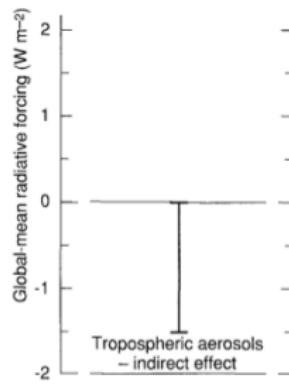
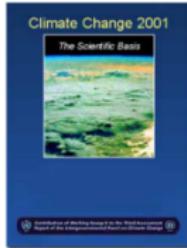
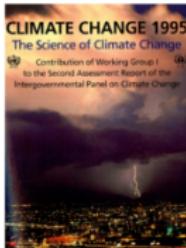
ive for-  
isorption  
e atmo-  
e forcing  
; The di-  
l aerosol  
: a nega-  
ugh the



FAQ 2.1, Figure 2. Summary of the principal components of the radiative forcing of climate change. All these radiative forcings result from one or more factors that affect climate and are associated with human activities or

# Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: czy istotne?

1995 – 2001 – 2007



# Plan prezentacji

---

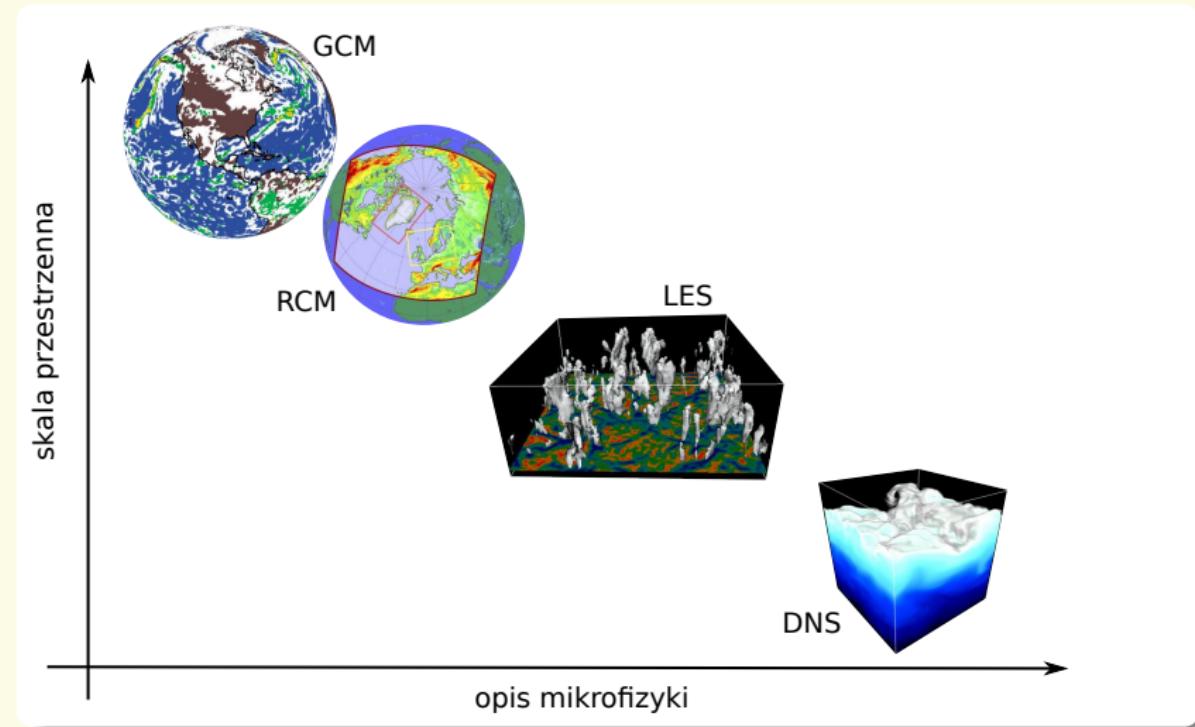
- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Jak opisać w modelu oddziaływanie, aerozolu chmur i opadu?
- Jak napisać kod modelu łatwy w użyciu, zrozumieniu i rozbudowie?
- Zaproszenie do współpracy

# Plan prezentacji

---

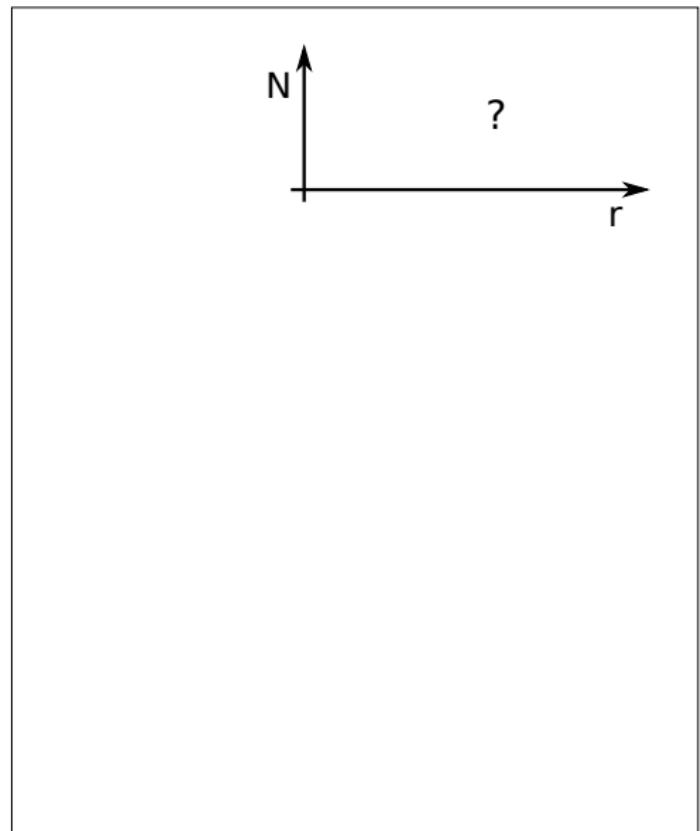
- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Jak opisać w modelu oddziaływanie, aerozolu chmur i opadu?
- Jak napisać kod modelu łatwy w użyciu, zrozumieniu i rozbudowie?
- Zaproszenie do współpracy

# Reprezentacja mikrofizyki a skala modeli



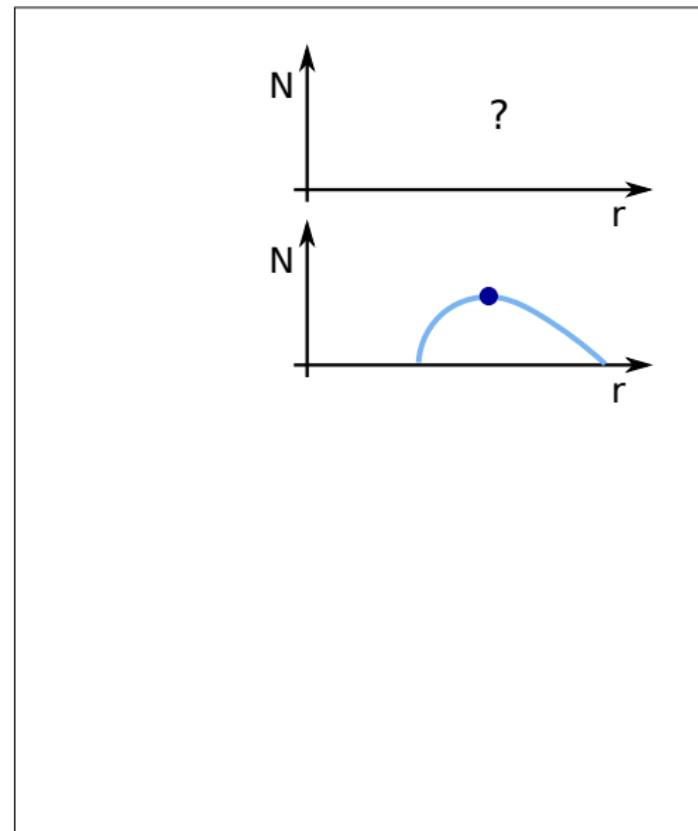
## Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

- ▶ opis zgrubny  
jedno-momentowy (bulk)



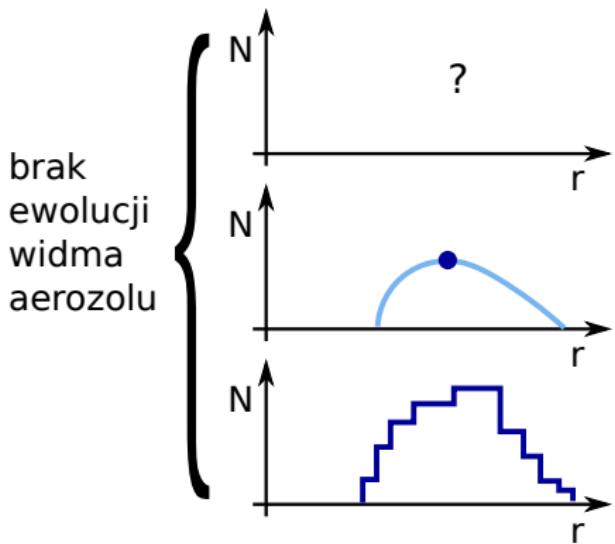
# Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

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



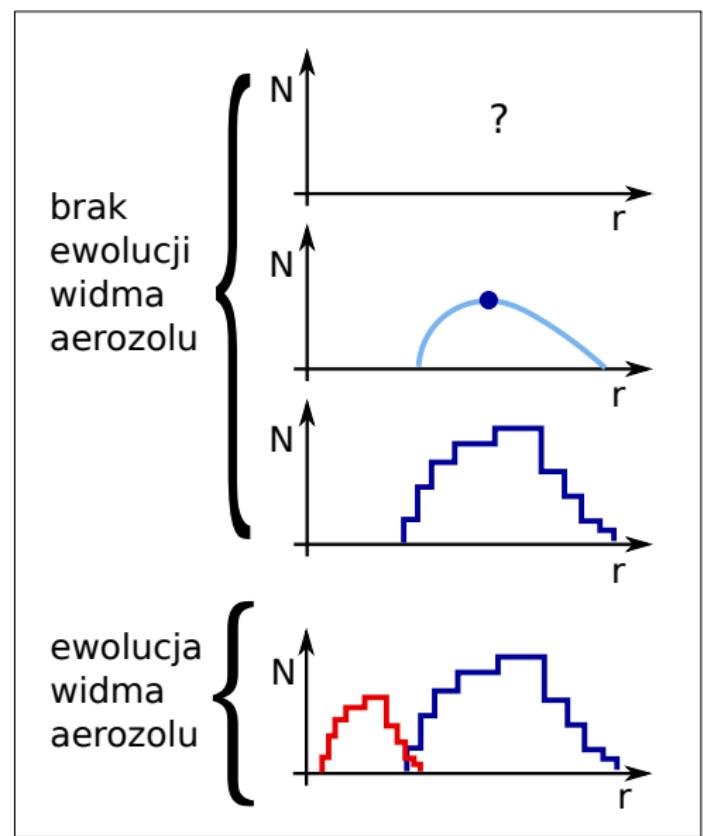
# Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

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



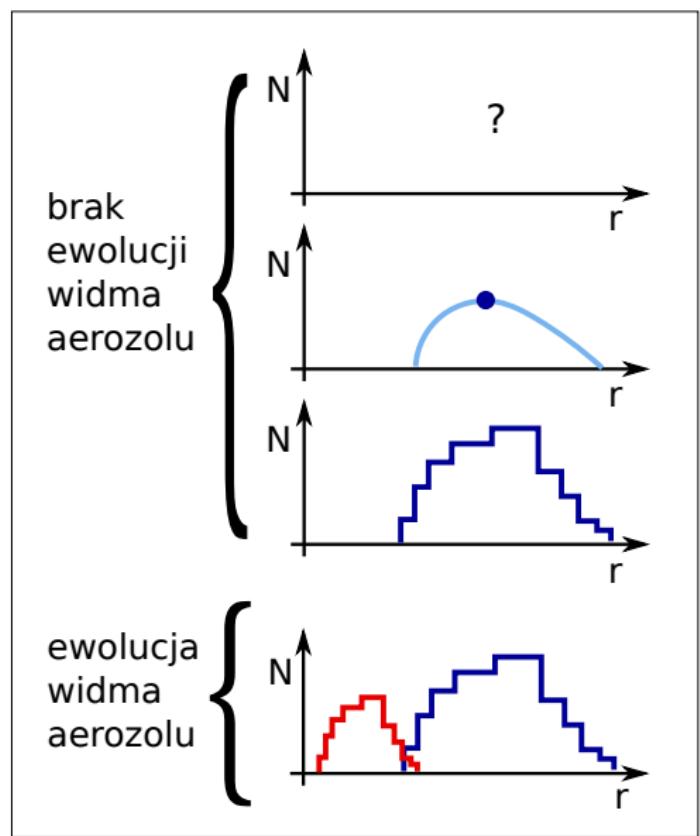
# Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

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



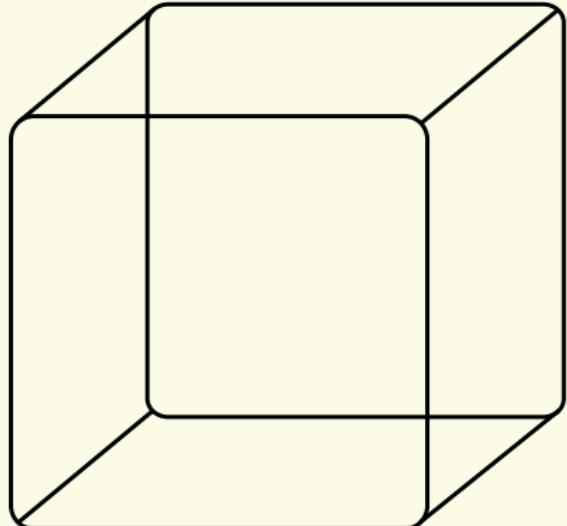
# Jak opisywana jest mikrofizyka w LES

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



# Lagranżowski opis mikrofizyki

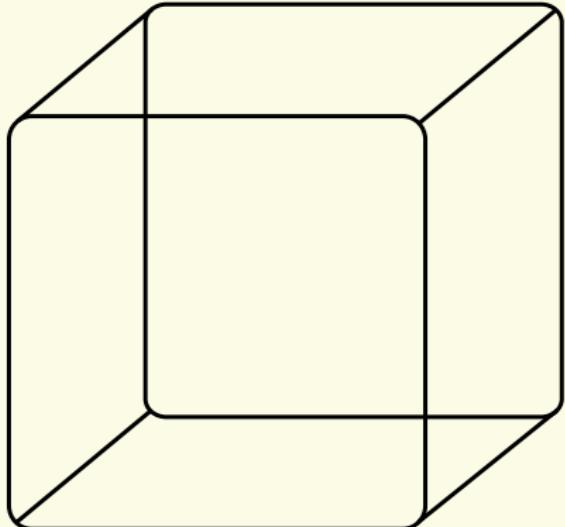
---



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

# Lagranżowski opis mikrofizyki

---



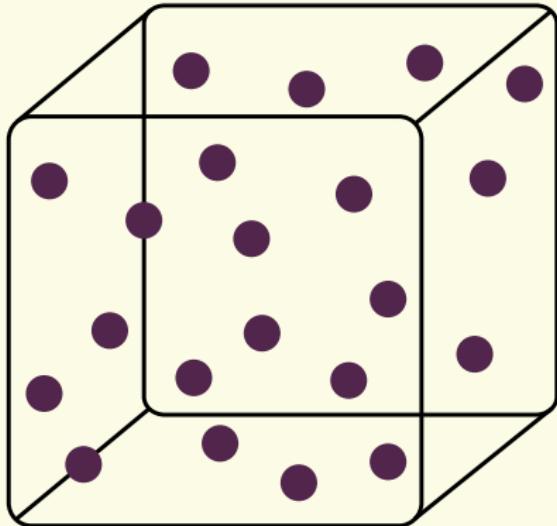
W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:



# Lagranżowski opis mikrofizyki

---



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

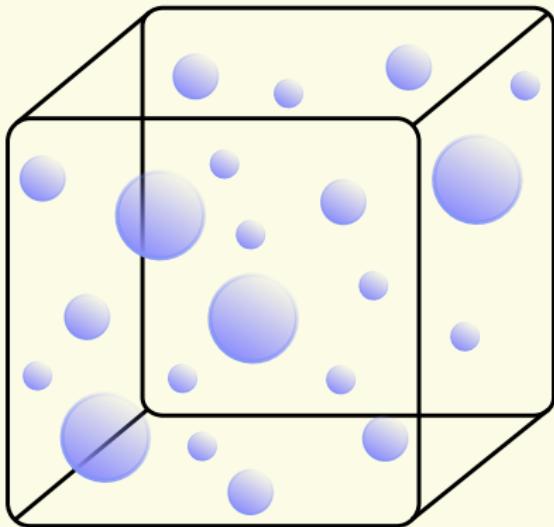
Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie



# Lagranżowski opis mikrofizyki

---



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

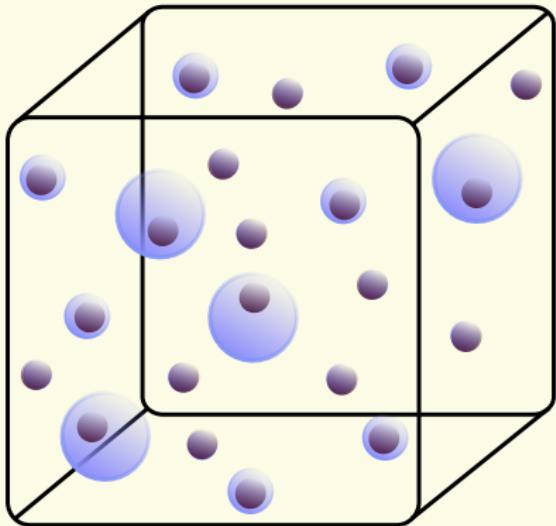
Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie
- ▶ promień mokry



# Lagranżowski opis mikrofizyki

---

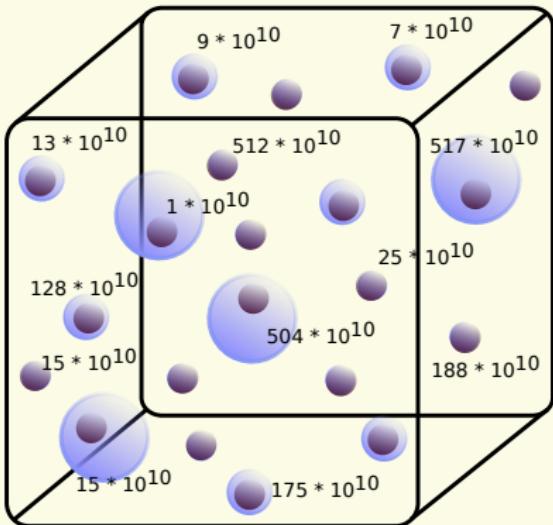


W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie
- ▶ promień mokry
- ▶ promień suchy

# Lagranżowski opis mikrofizyki



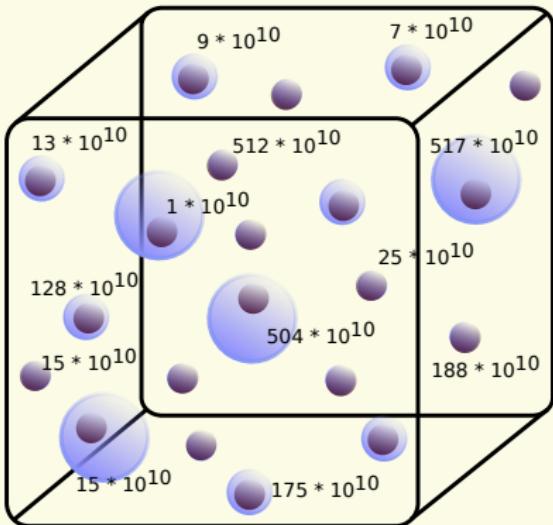
W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie
- ▶ promień mokry
- ▶ promień suchy
- ▶ krotkość



# Lagranżowski opis mikrofizyki



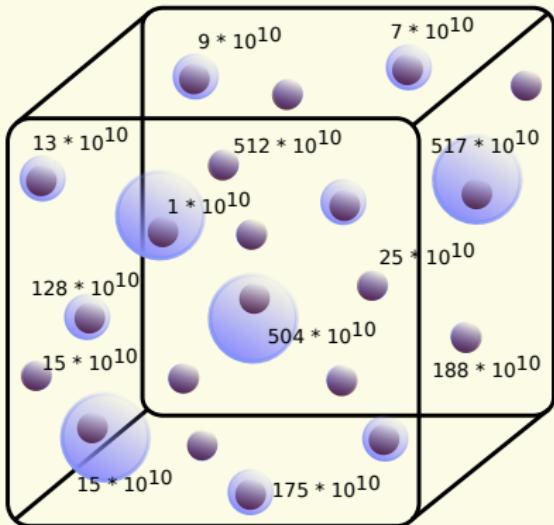
W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie
- ▶ promień mokry
- ▶ promień suchy
- ▶ krotkość
- ▶ ...



# Lagranżowski opis mikrofizyki



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

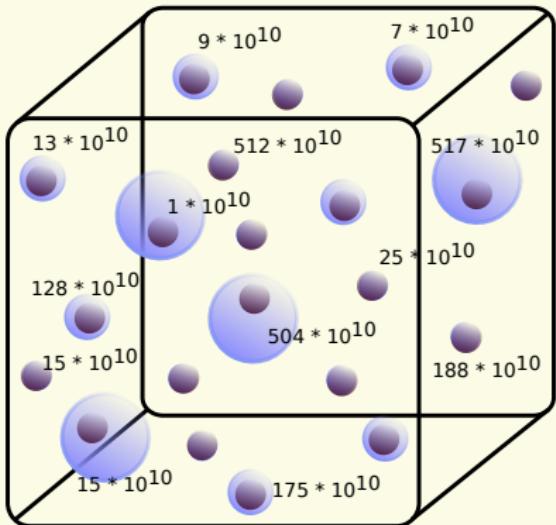
Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie
- ▶ promień mokry
- ▶ promień suchy
- ▶ krotkość
- ▶ ...

Łatwość dodawania kolejnych atrybutów



# Lagranżowski opis mikrofizyki



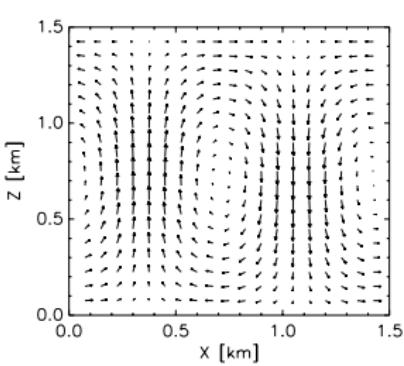
W domenie rozmieszczone są obiekty które są nośnikiem informacji dot. mikrofizyki

Można im przypisywać atrybuty:

- ▶ położenie
- ▶ promień mokry
- ▶ promień suchy
- ▶ krotkość
- ▶ ...

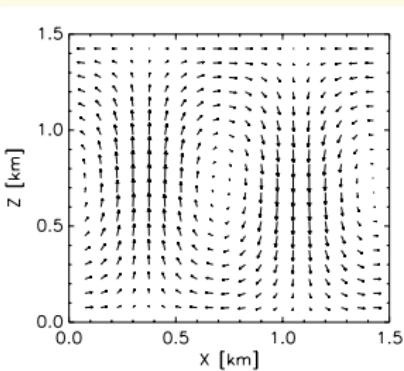
Łatwość dodawania kolejnych atrybutów (ważne przy opisie reakcji chemicznych zachodzących w kropelkach)





Constable 1824

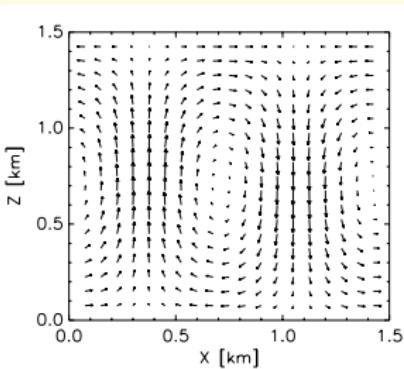
icicle:



Constable 1824

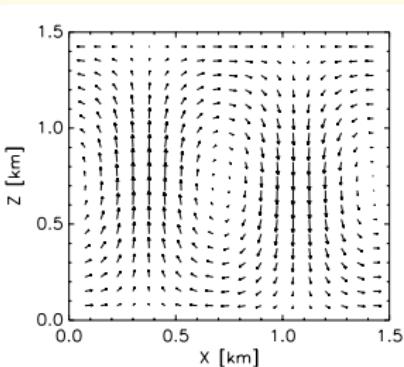
icicle:

- dwuwymiarowy model chmury



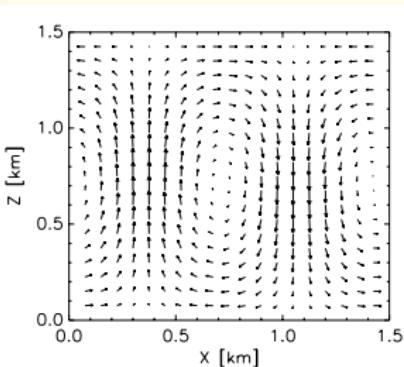
icicle:

- ▶ dwuwymiarowy model chmury
- ▶ zadany przepływ (brak oddziaływań pomiędzy mikrofizyką a dynamiką)



icicle:

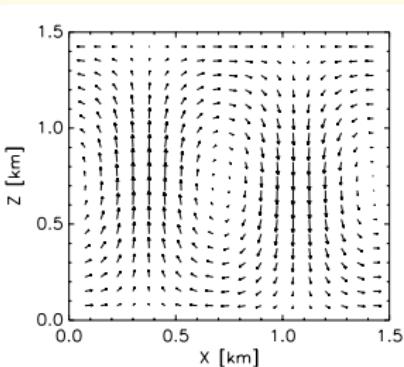
- ▶ dwuwymiarowy model chmury
- ▶ zadany przepływ (brak oddziaływań pomiędzy mikrofizyką a dynamiką)
- ▶ Lagranżowski opis mikrofizyki  
(z uwzględnieniem zderzeń cząstek)



icicle:

- ▶ dwuwymiarowy model chmury
- ▶ zadany przepływ (brak oddziaływań pomiędzy mikrofizyką a dynamiką)
- ▶ Lagranżowski opis mikrofizyki  
(z uwzględnieniem zderzeń cząstek)
- ▶ program budowany w ramach grantu  
NCN PRELUDIUM



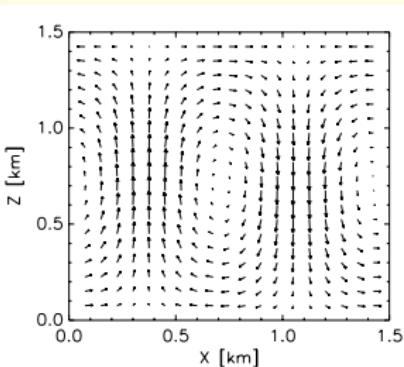


Constable 1824

icicle:

- ▶ dwuwymiarowy model chmury
- ▶ zadany przepływ (brak oddziaływań pomiędzy mikrofizyką a dynamiką)
- ▶ Lagranżowski opis mikrofizyki (z uwzględnieniem zderzeń cząstek)
- ▶ program budowany w ramach grantu NCN PRELUDIUM

Przykładowa symulacja:



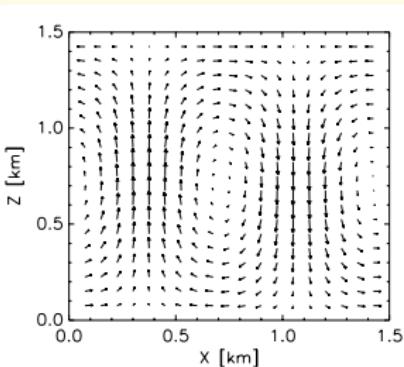
Constable 1824

icicle:

- ▶ dwuwymiarowy model chmury
- ▶ zadany przepływ (brak oddziaływań pomiędzy mikrofizyką a dynamiką)
- ▶ Lagranżowski opis mikrofizyki (z uwzględnieniem zderzeń cząstek)
- ▶ program budowany w ramach grantu NCN PRELUDIUM

Przykładowa symulacja:

- ▶ pojedynczy wir



icicle:

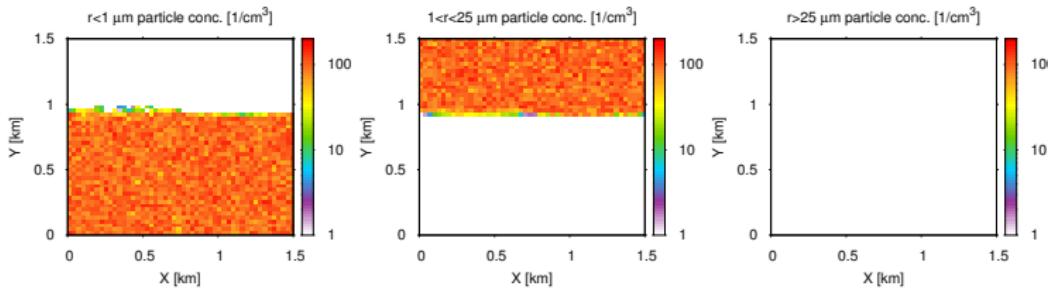
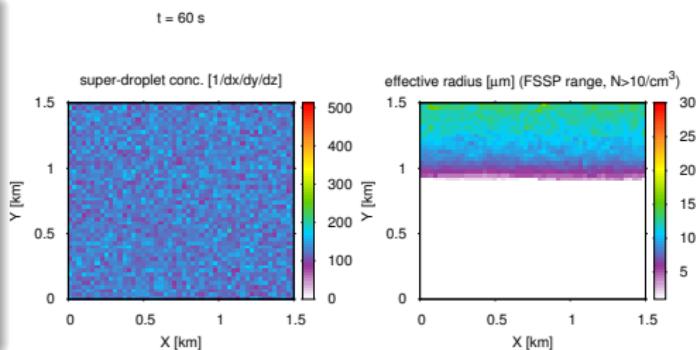
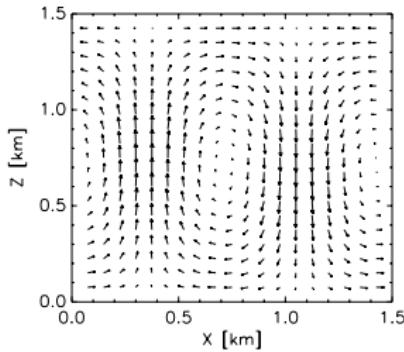
- ▶ dwuwymiarowy model chmury
- ▶ zadany przepływ (brak oddziaływań pomiędzy mikrofizyką a dynamiką)
- ▶ Lagranżowski opis mikrofizyki (z uwzględnieniem zderzeń cząstek)
- ▶ program budowany w ramach grantu NCN PRELUDIUM

Przykładowa symulacja:

- ▶ pojedynczy wir
- ▶ chmura Sc w górnej części domeny

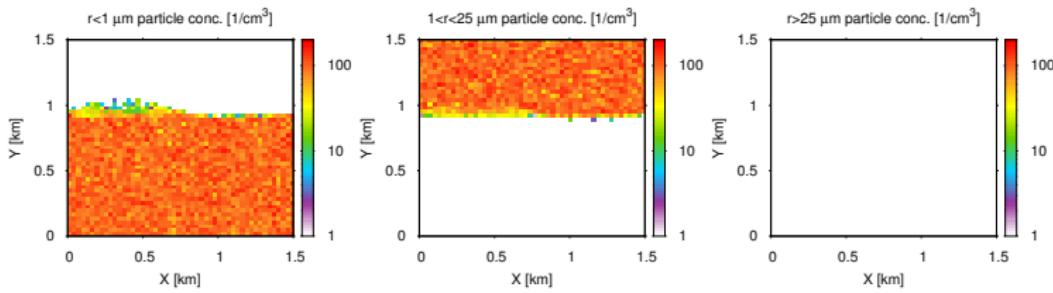
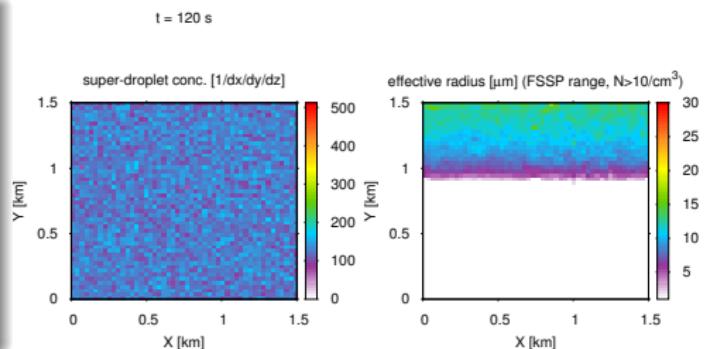
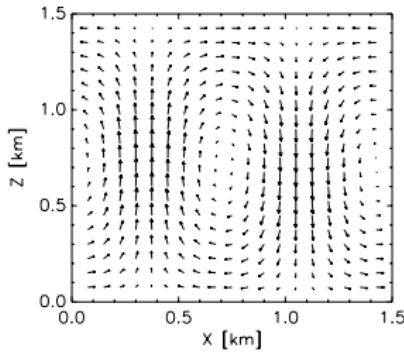


# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)

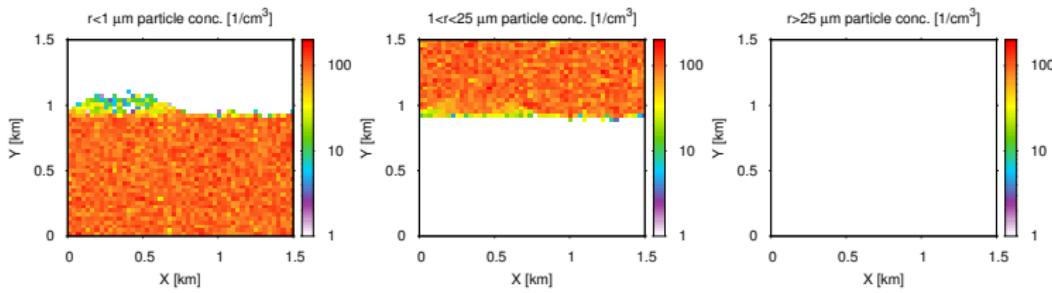
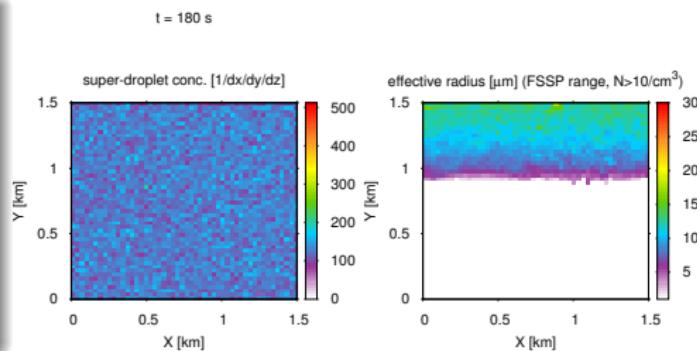
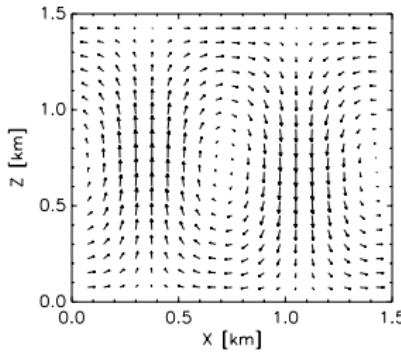


Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)

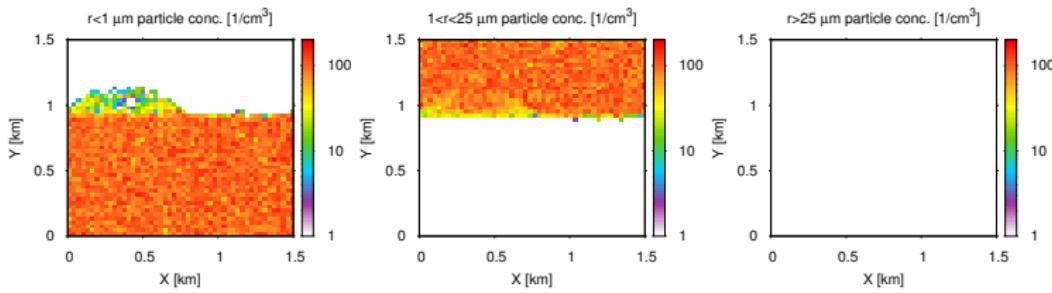
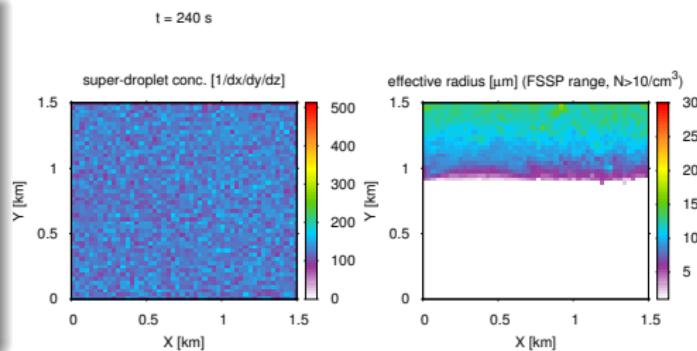
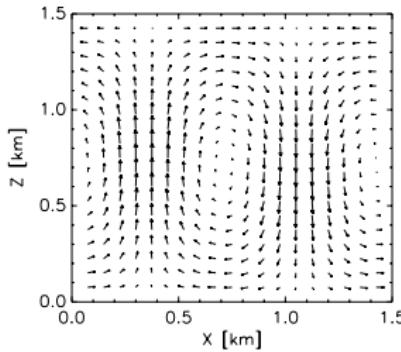


# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



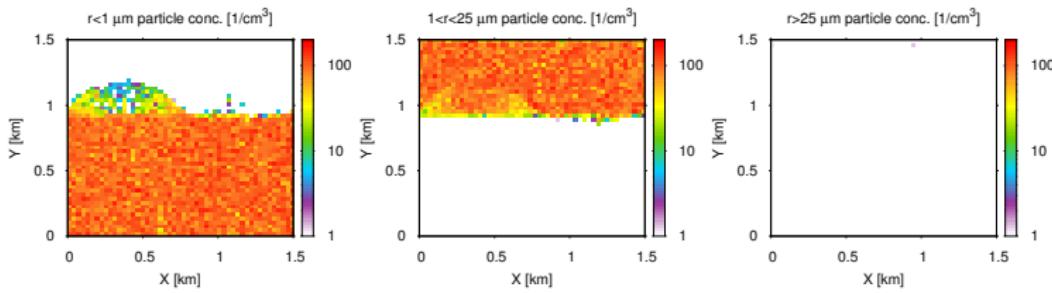
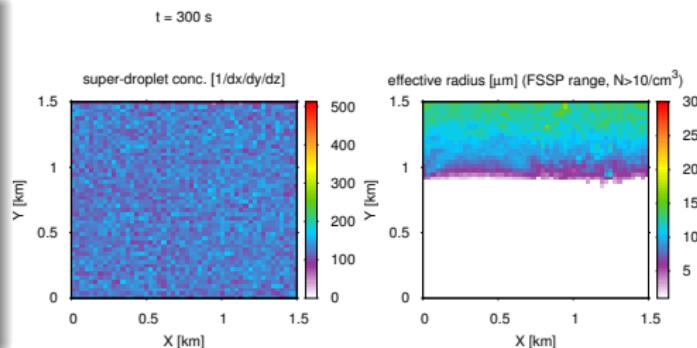
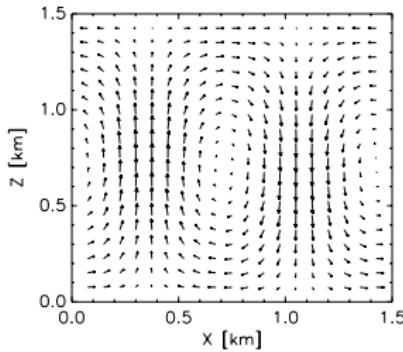
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



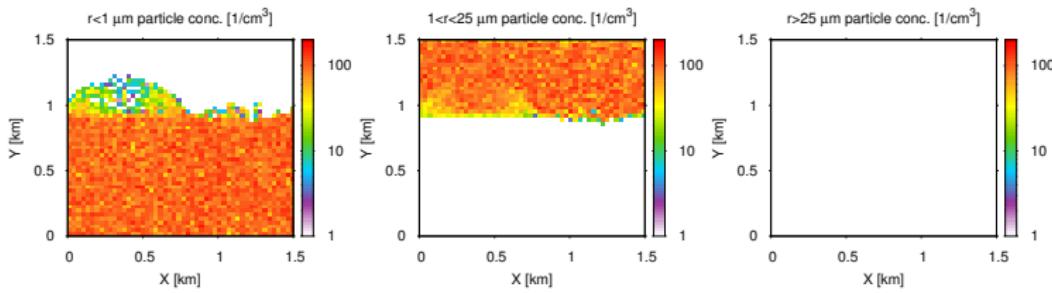
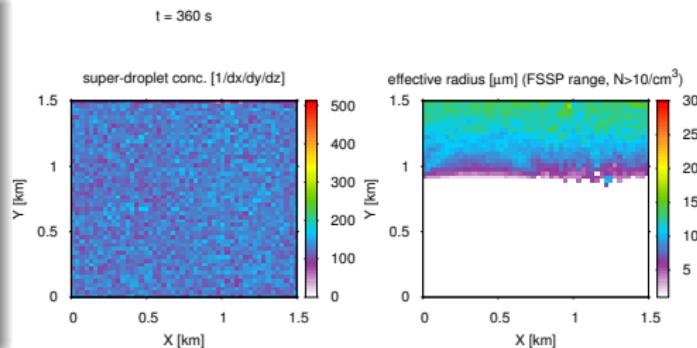
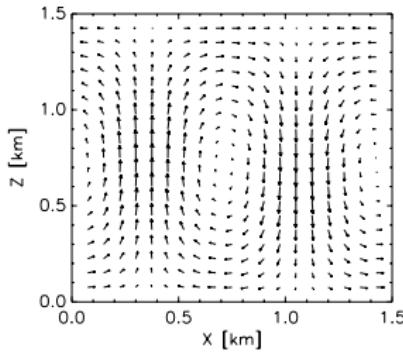
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



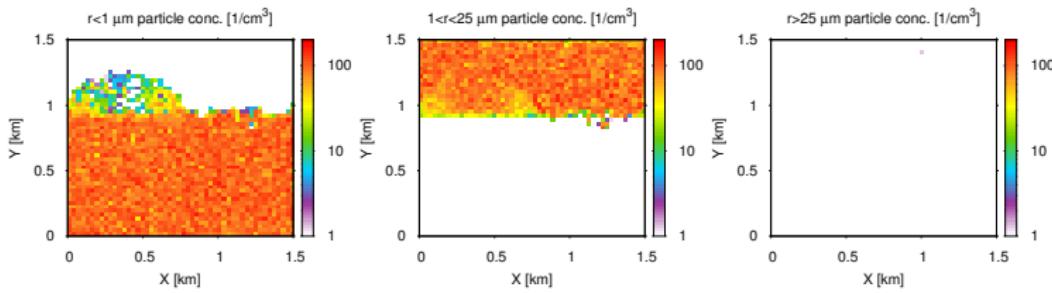
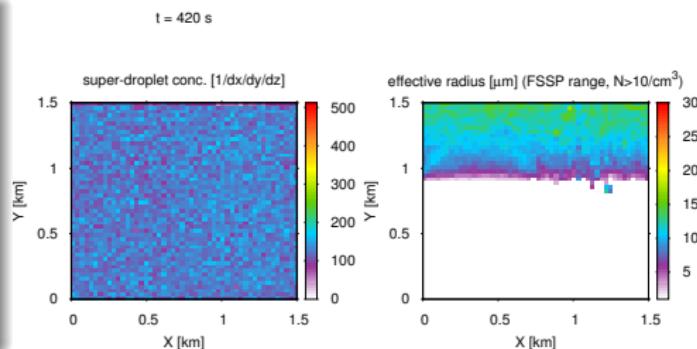
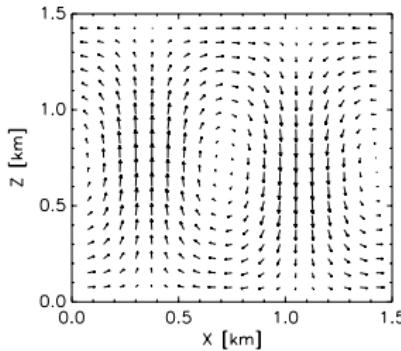
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)

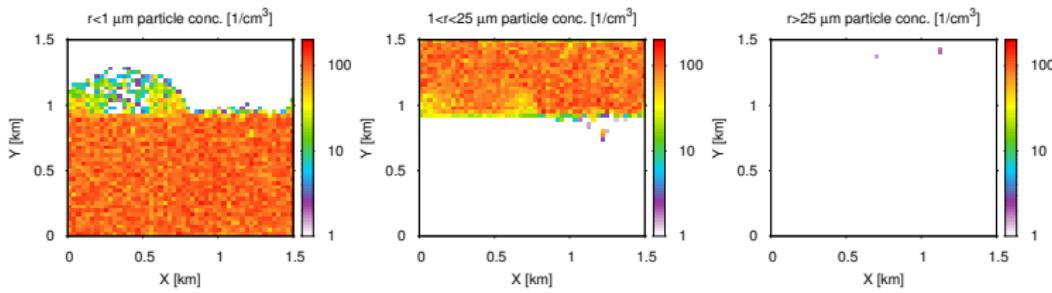
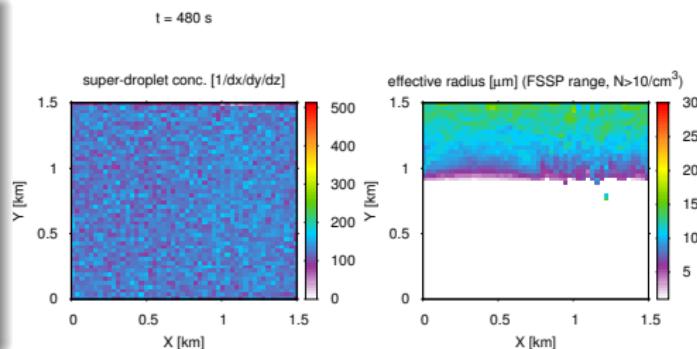
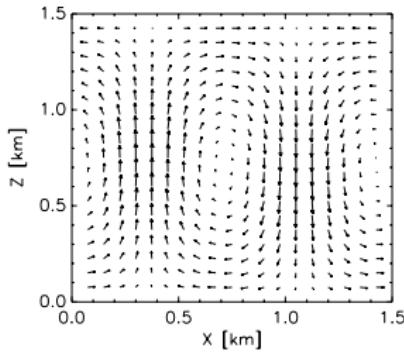


Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)

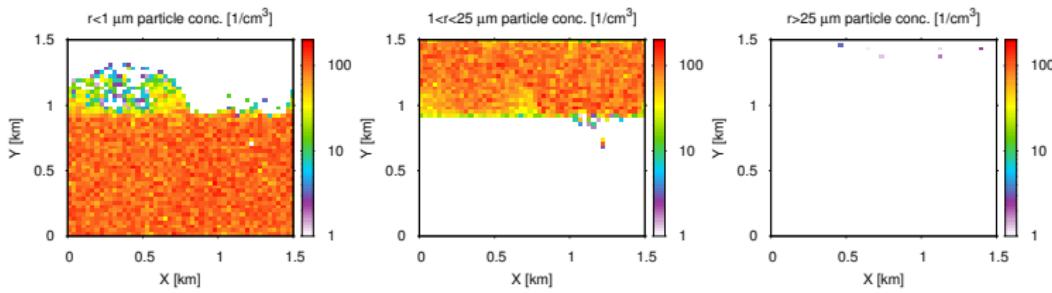
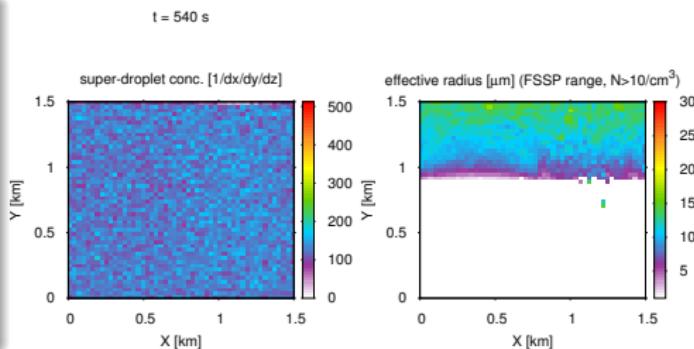
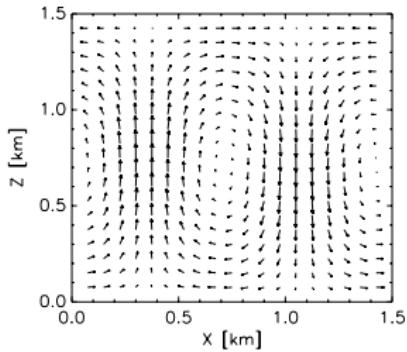


# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



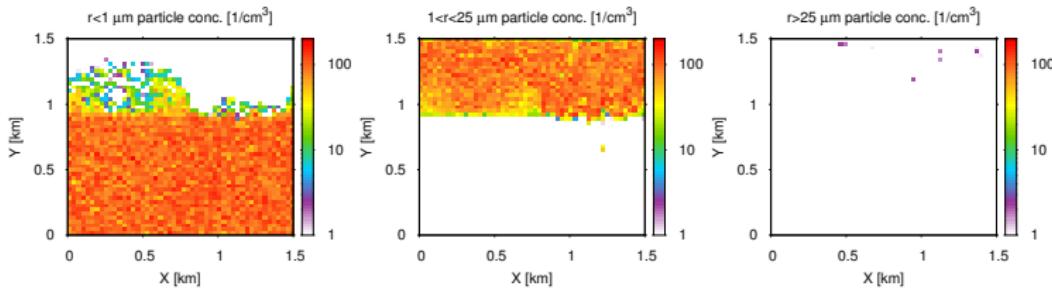
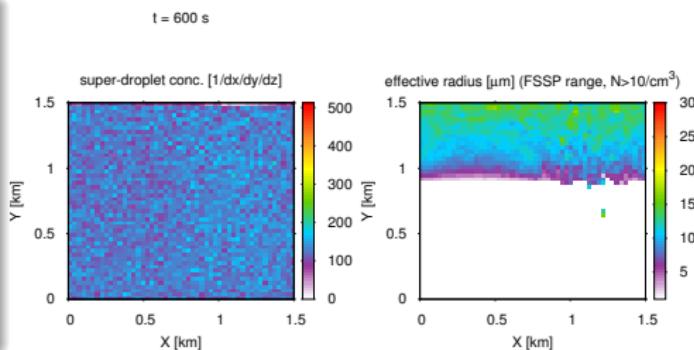
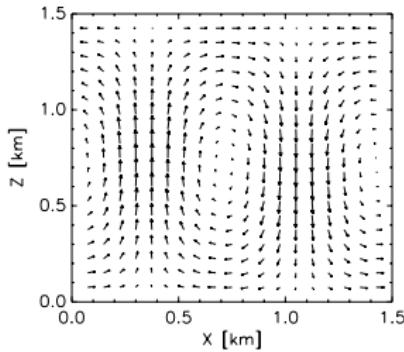
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)

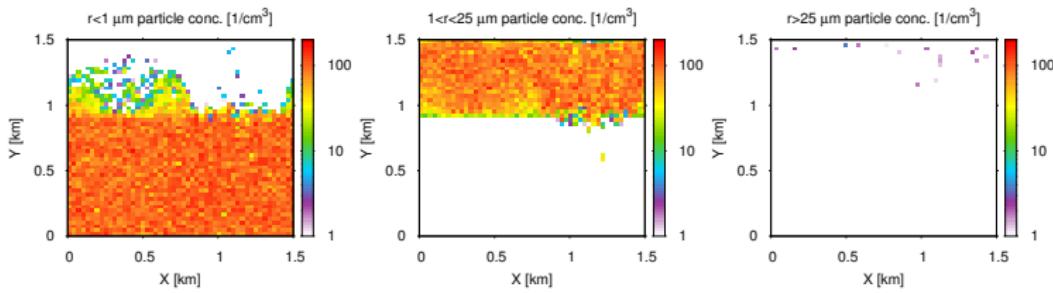
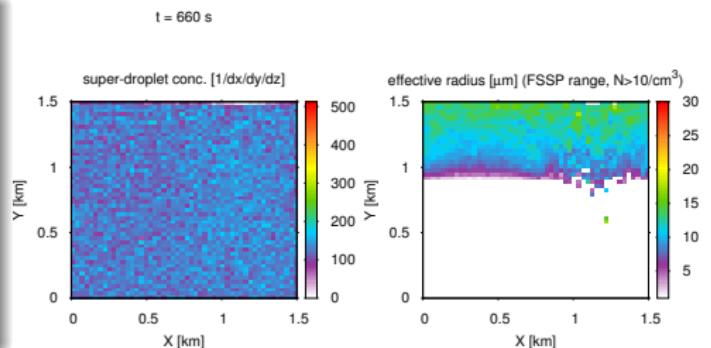
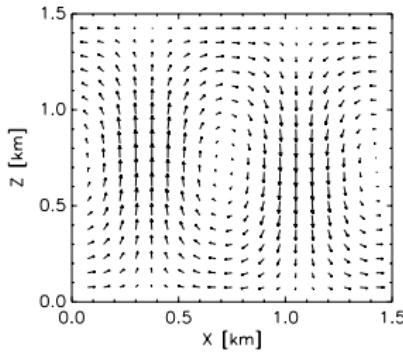


Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)

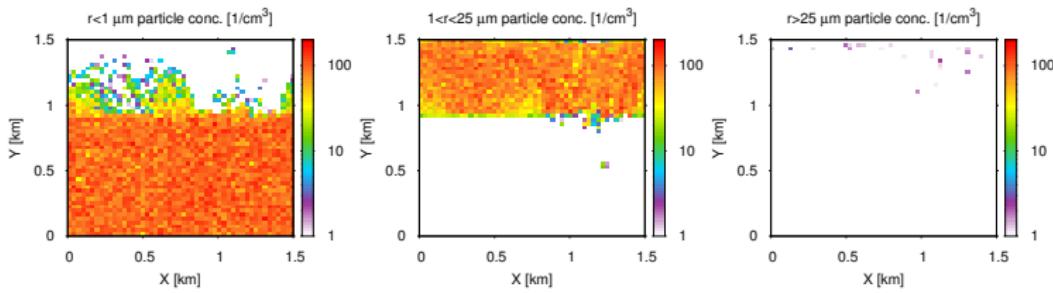
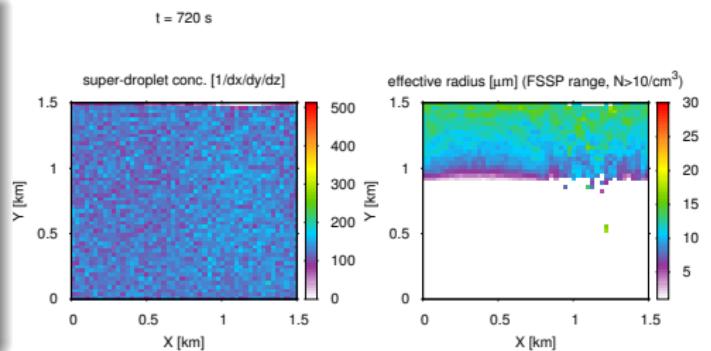
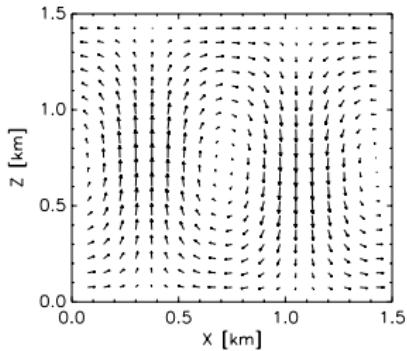


# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



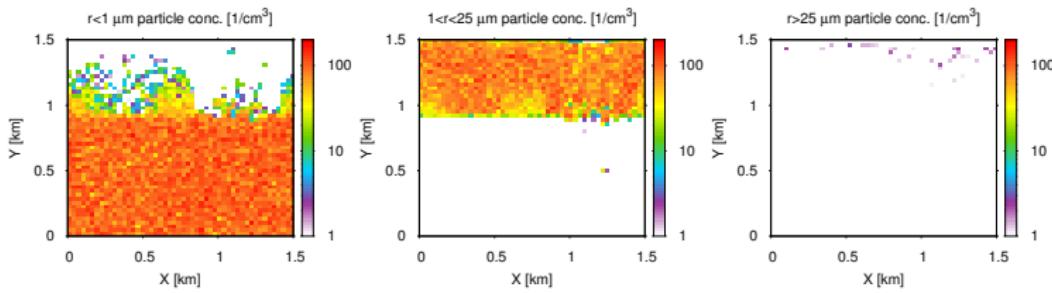
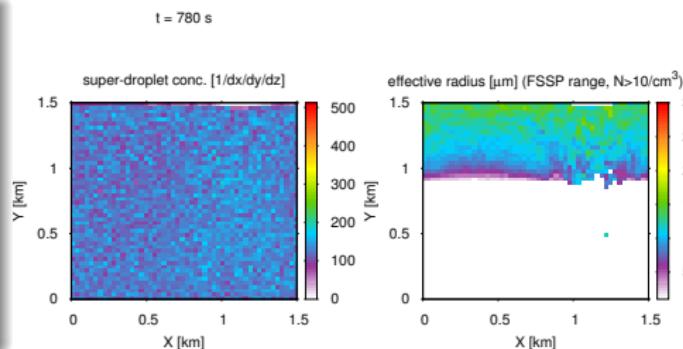
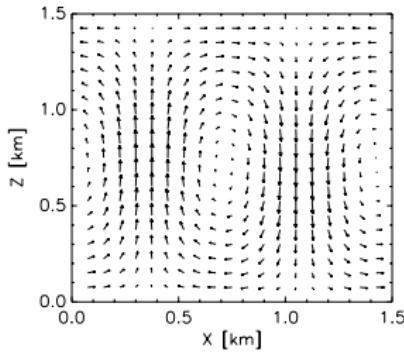
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



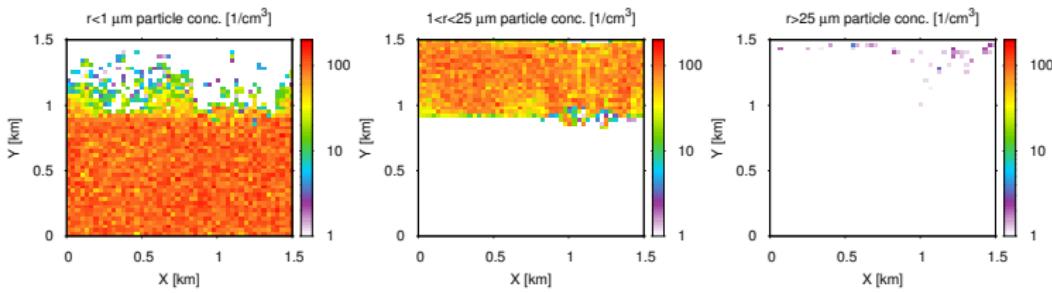
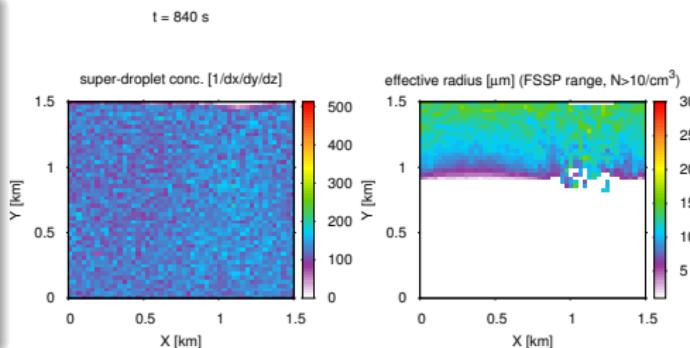
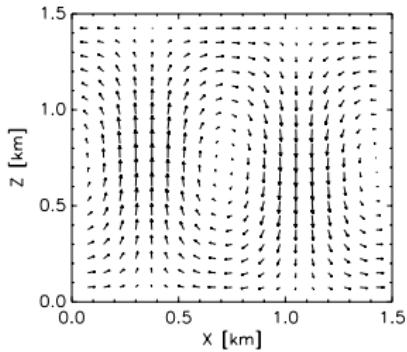
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



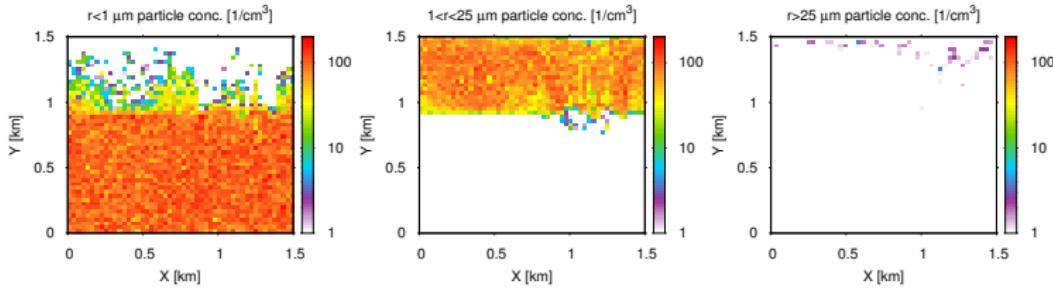
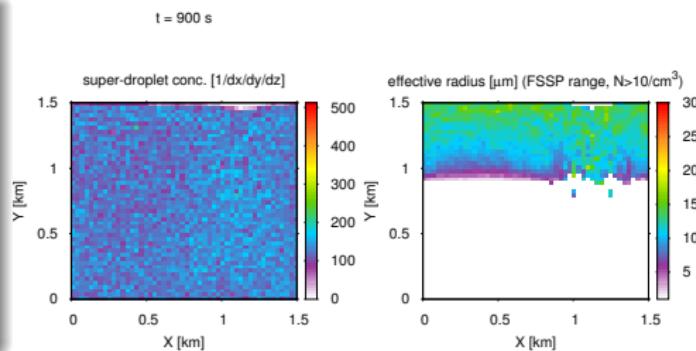
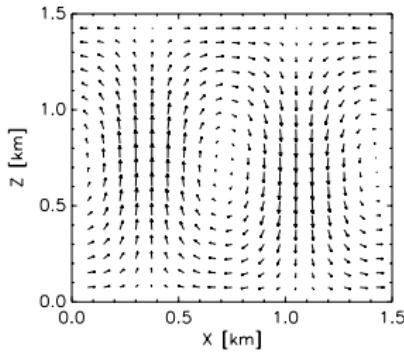
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



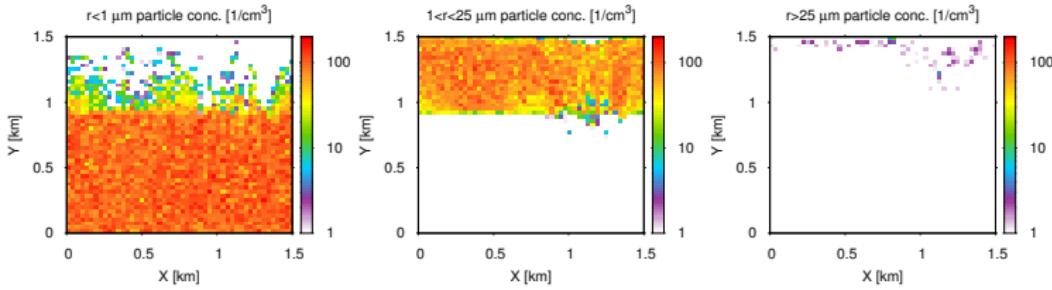
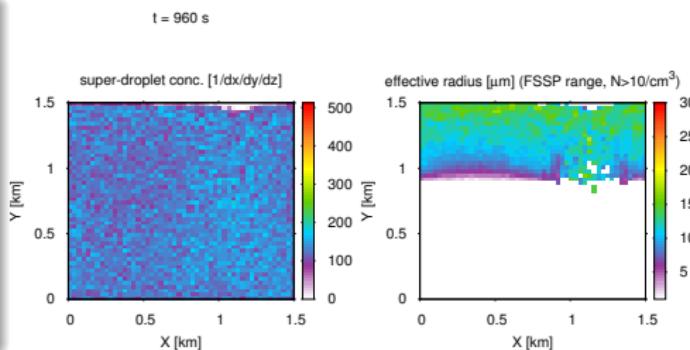
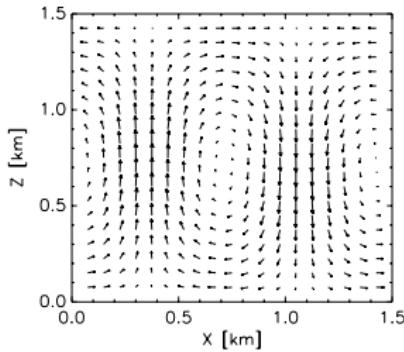
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)

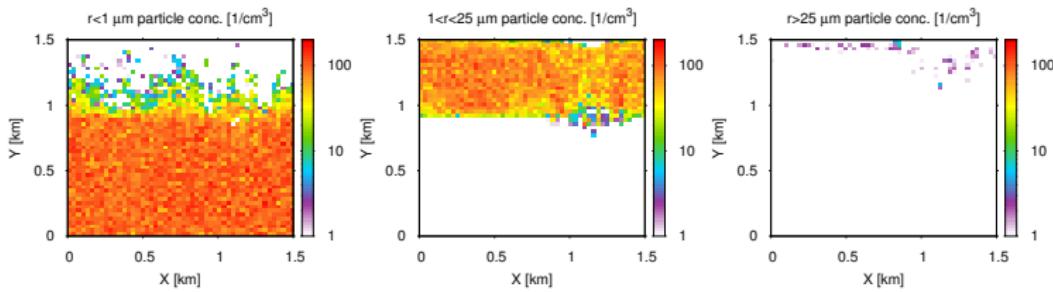
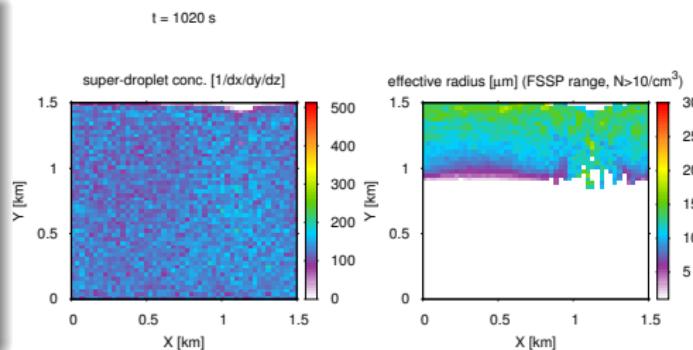
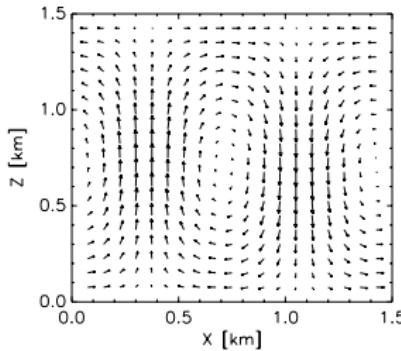


Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)

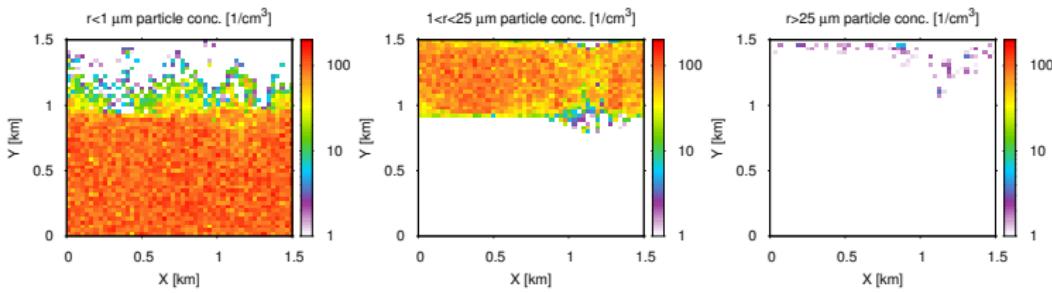
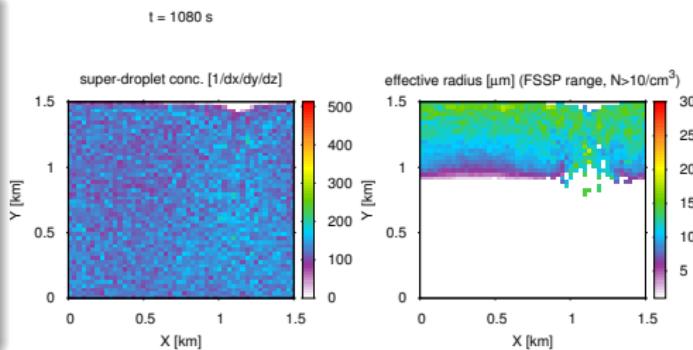
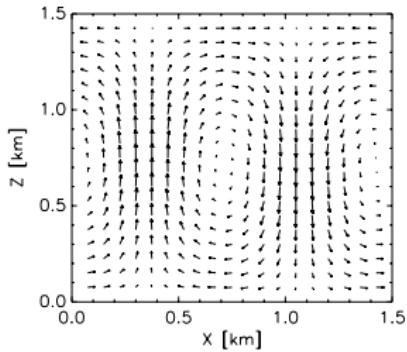


# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



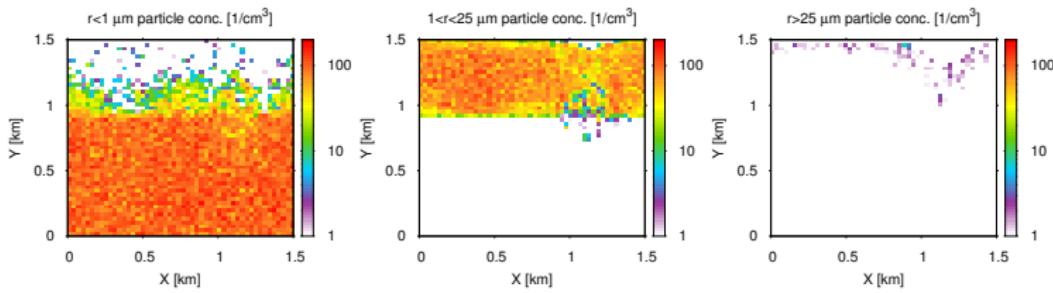
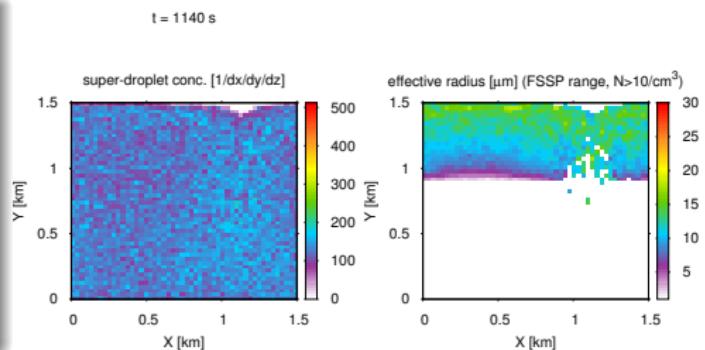
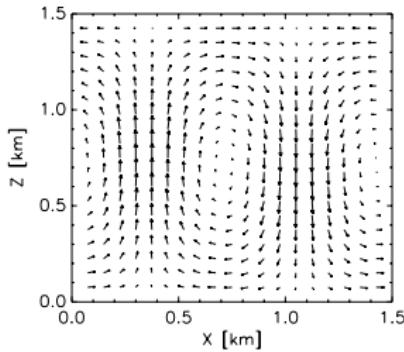
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



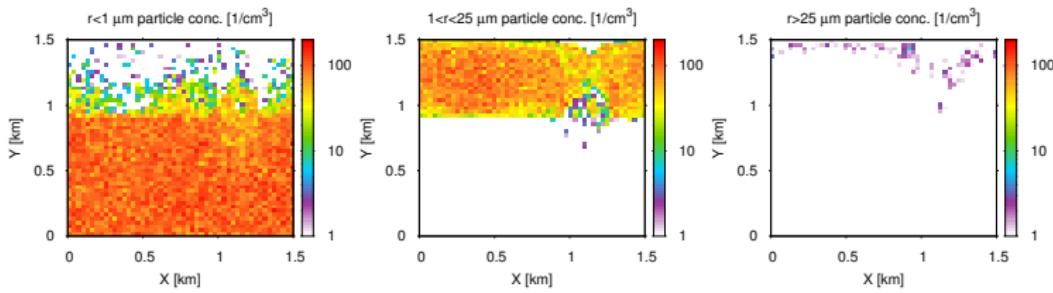
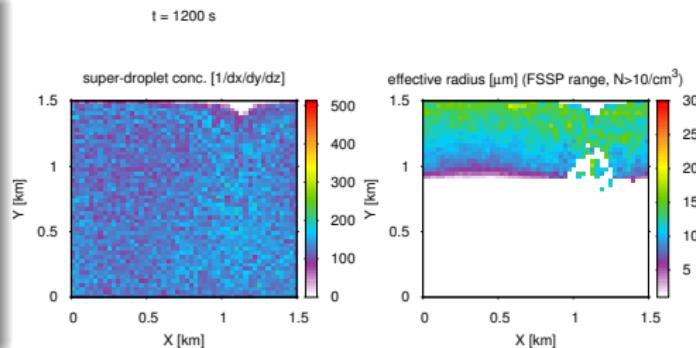
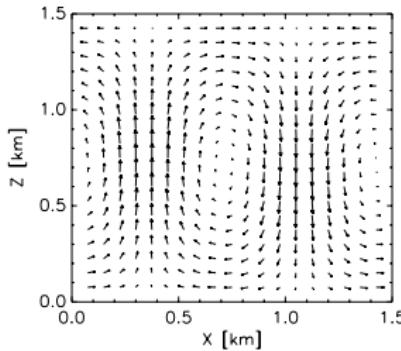
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



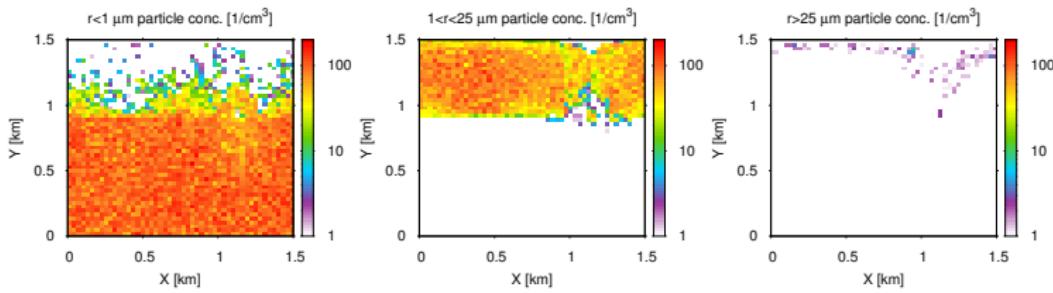
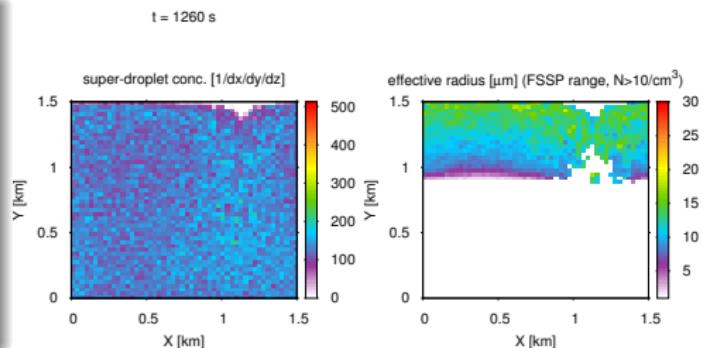
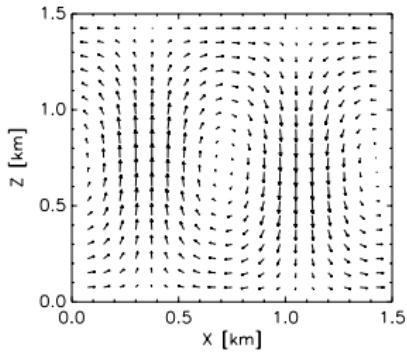
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



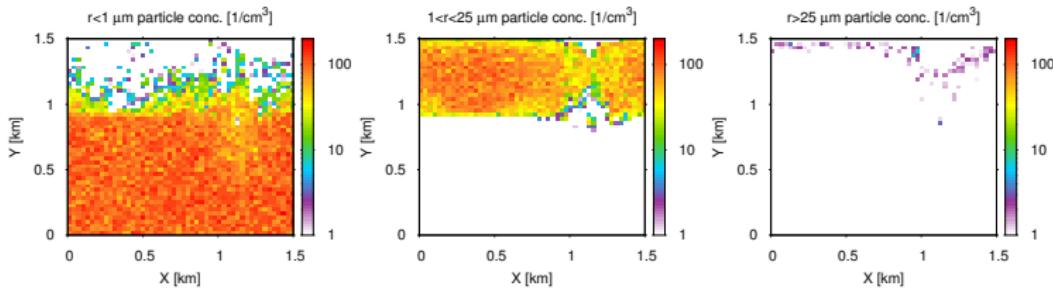
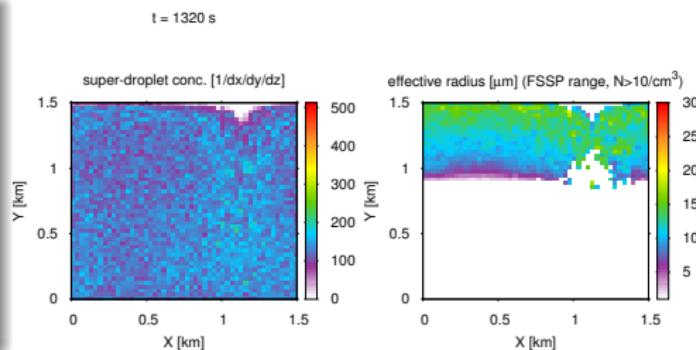
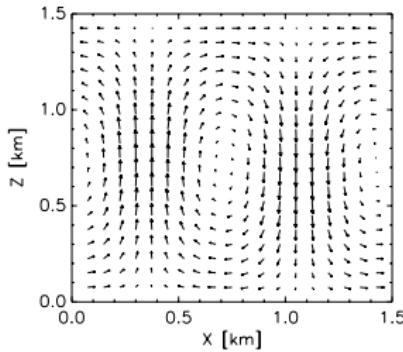
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



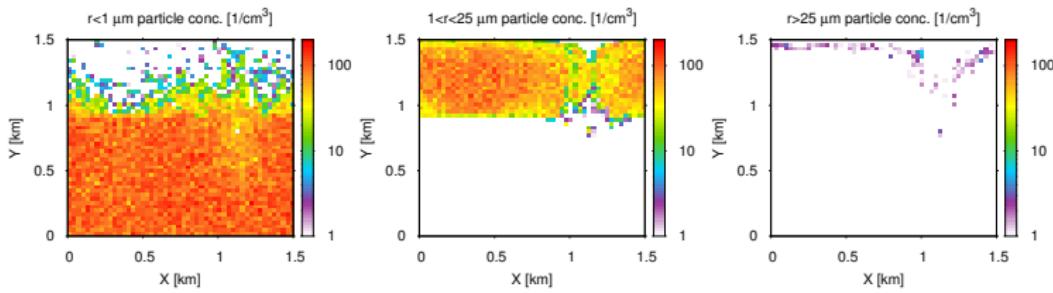
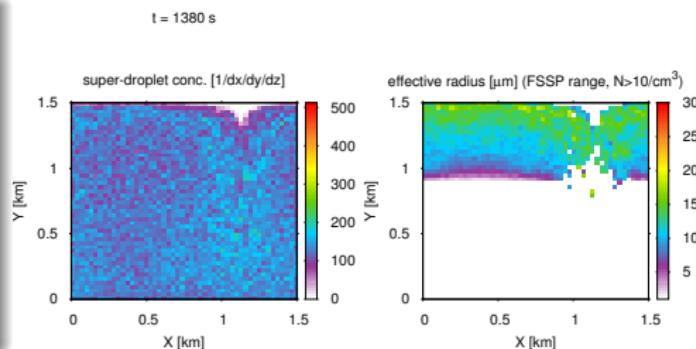
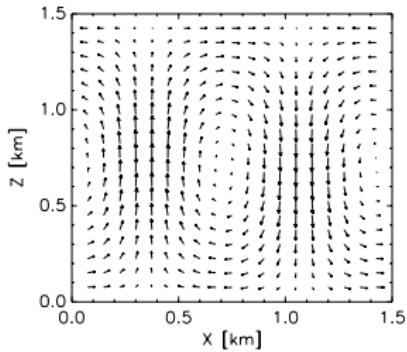
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



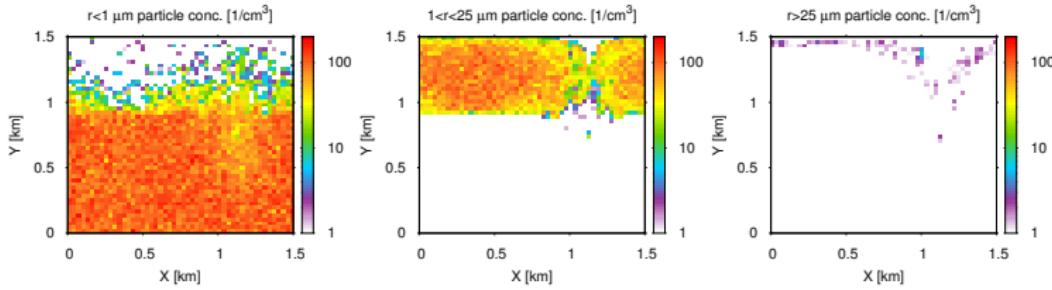
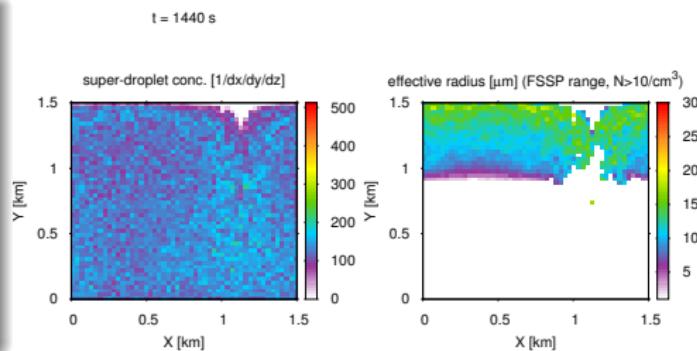
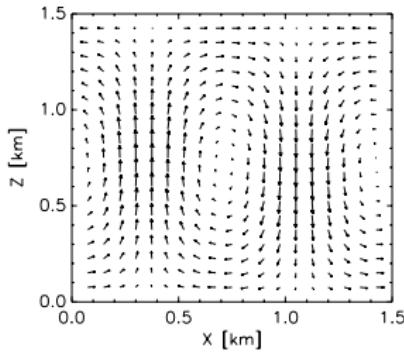
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



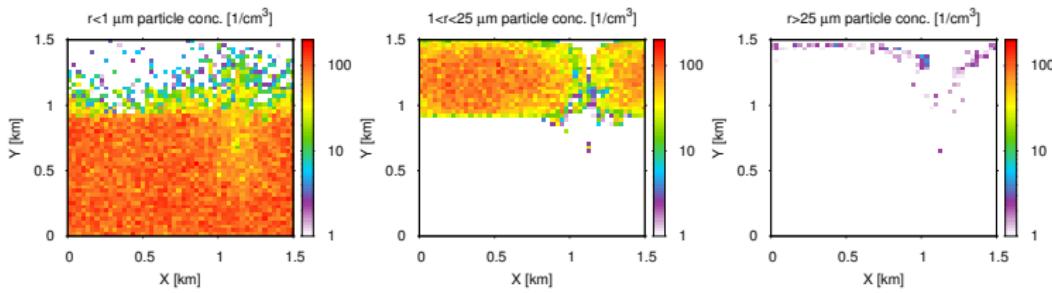
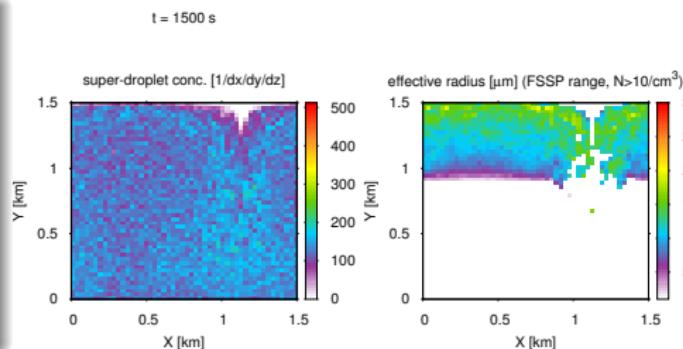
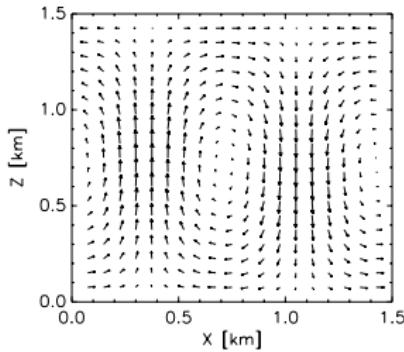
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



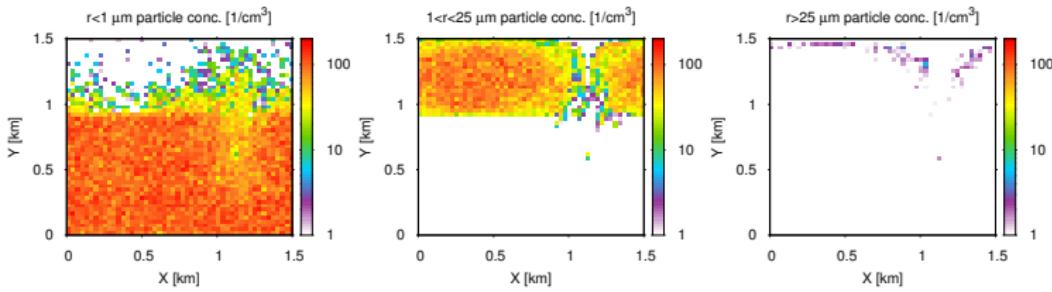
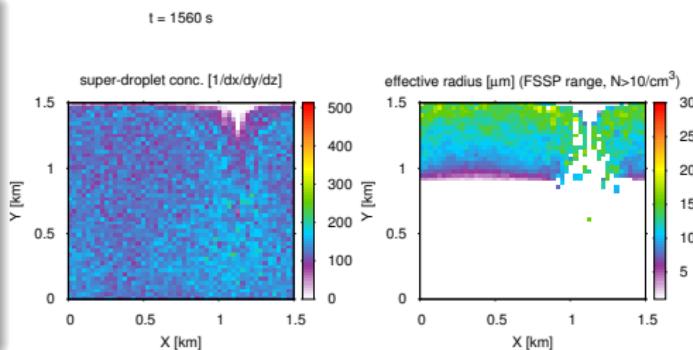
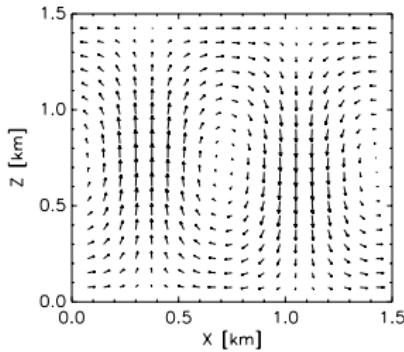
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



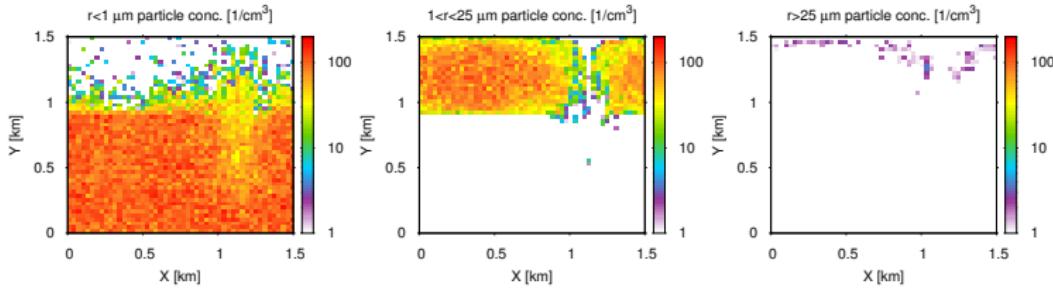
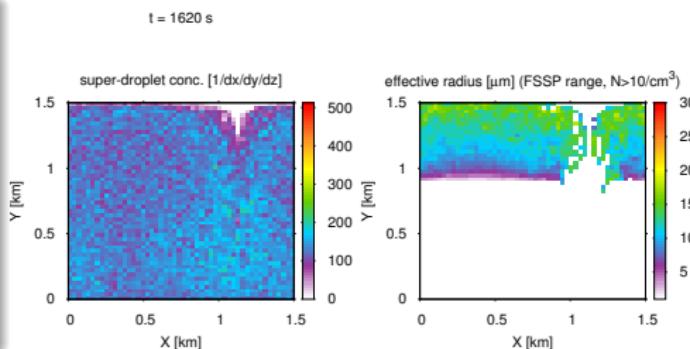
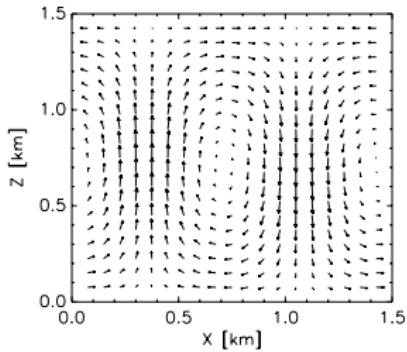
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



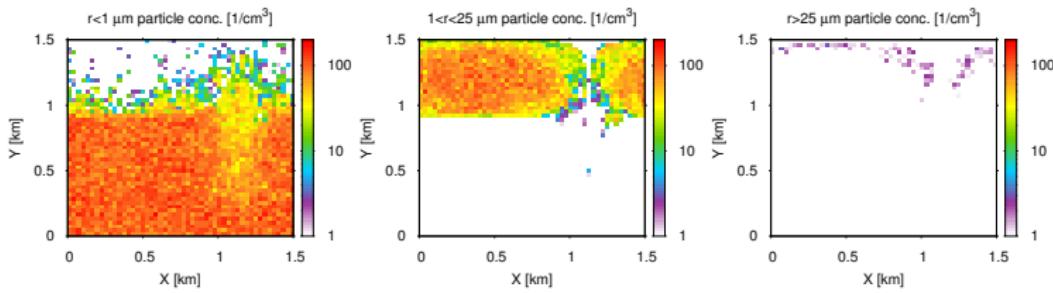
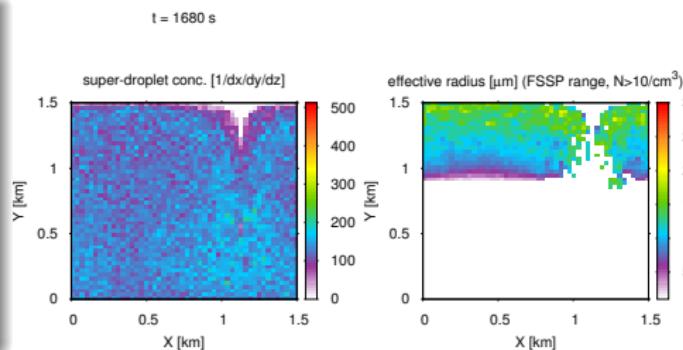
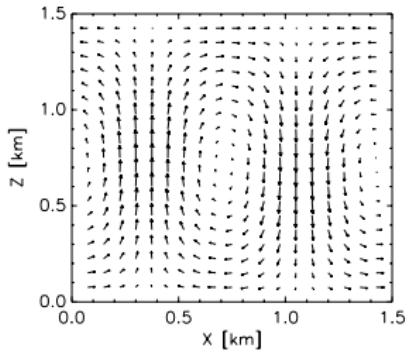
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



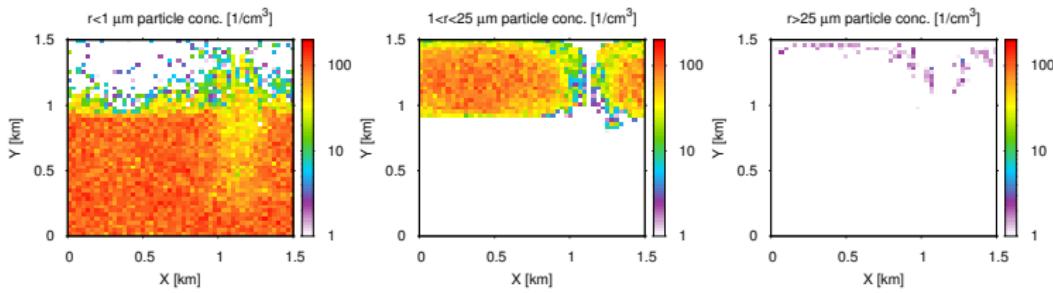
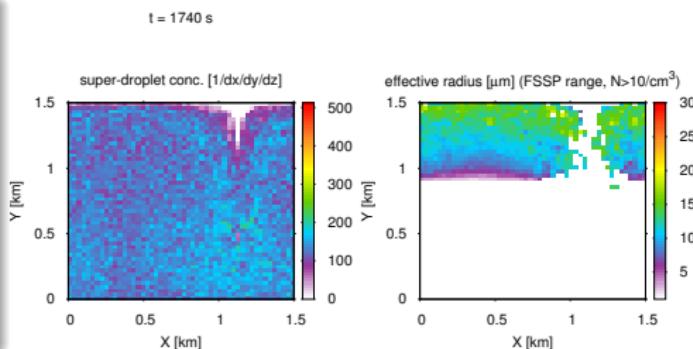
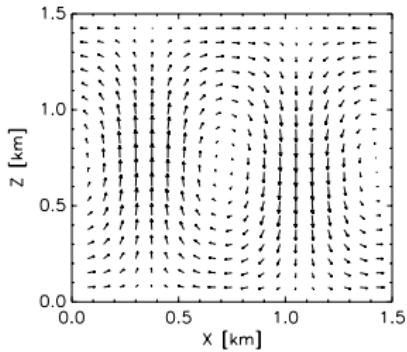
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



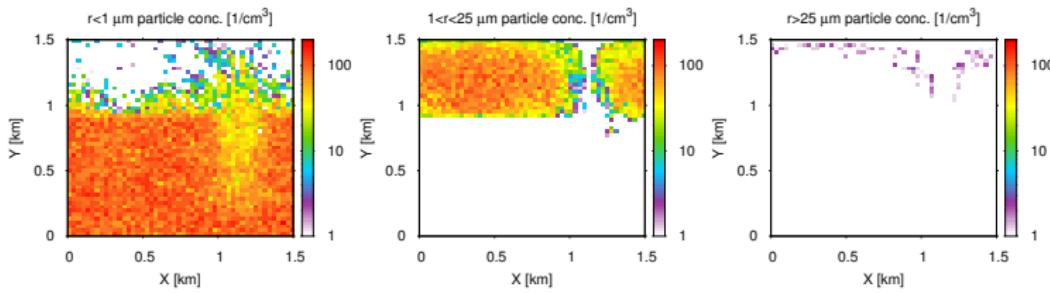
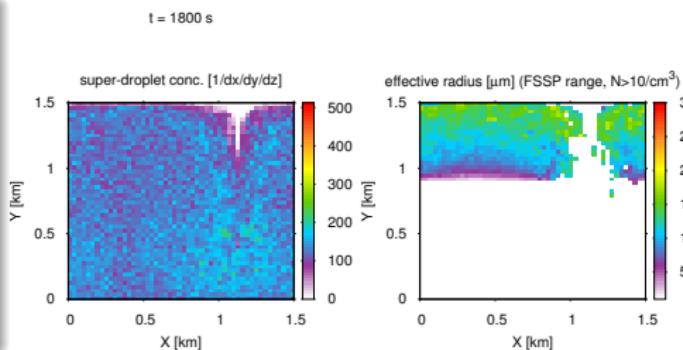
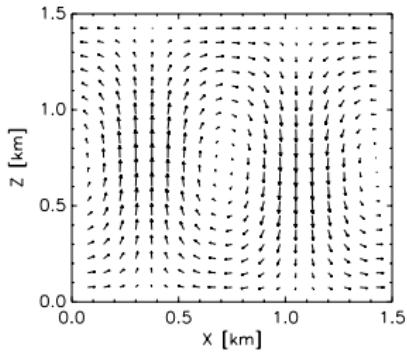
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



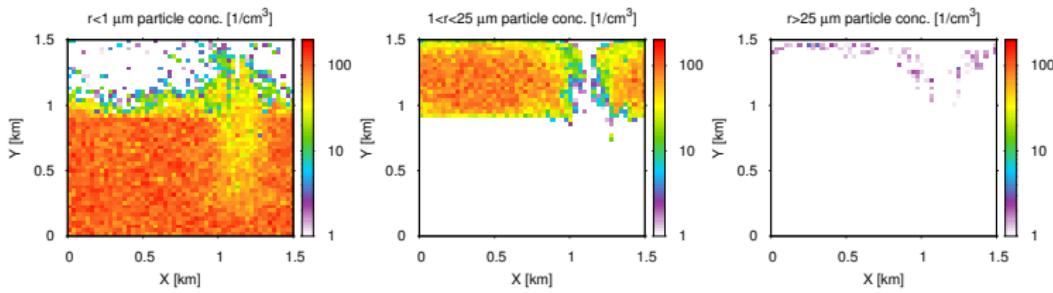
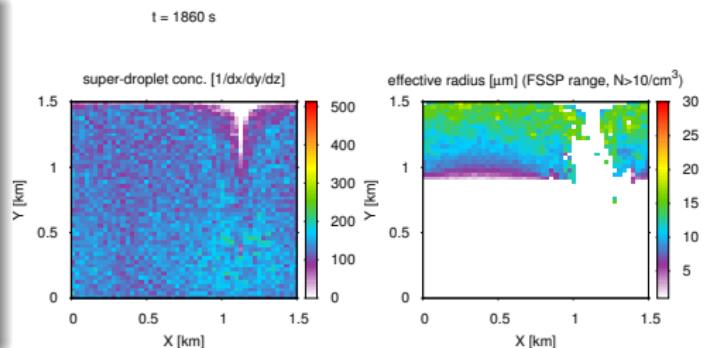
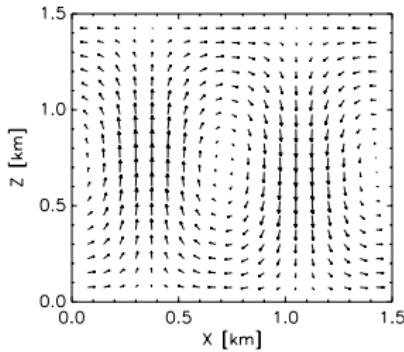
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)

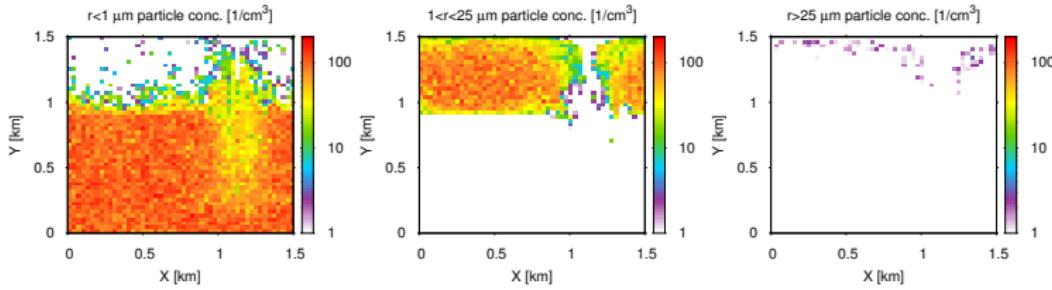
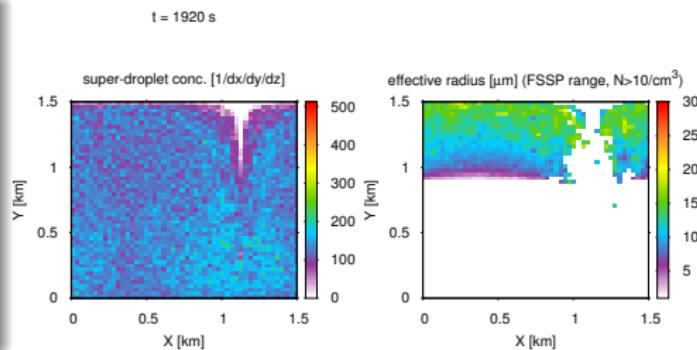
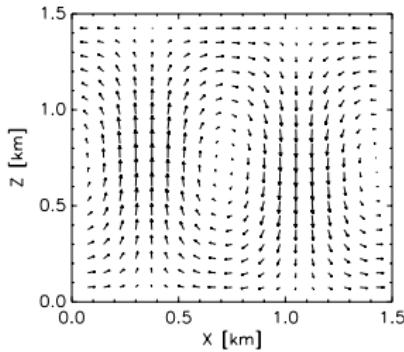


Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)

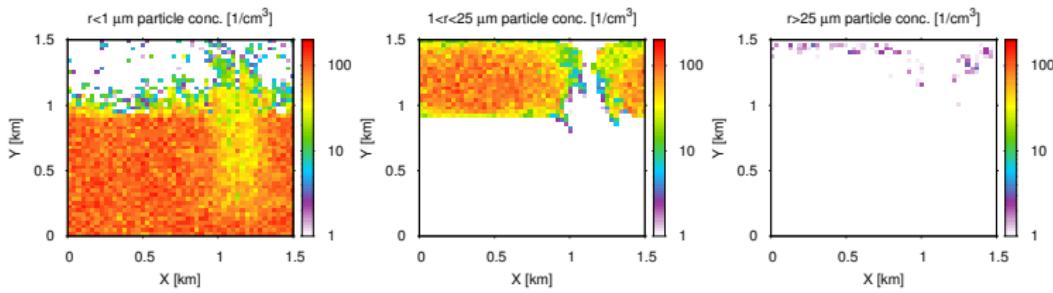
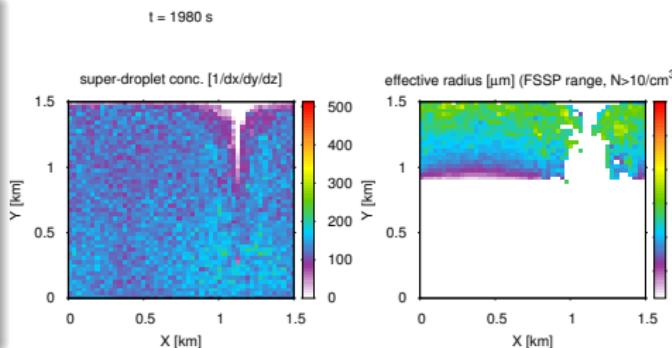
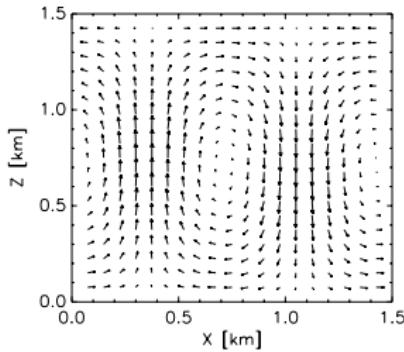


# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



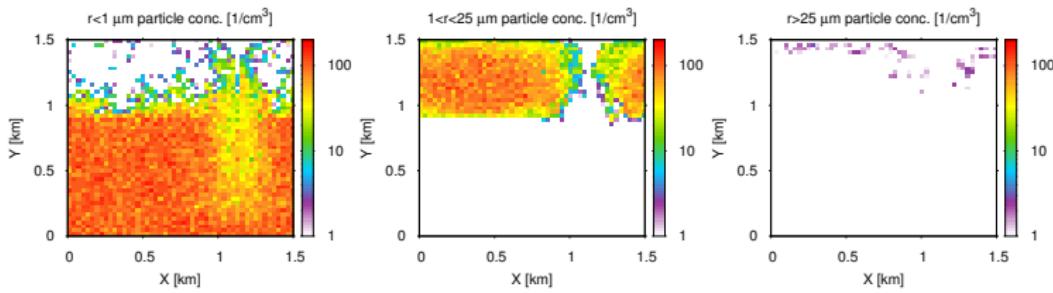
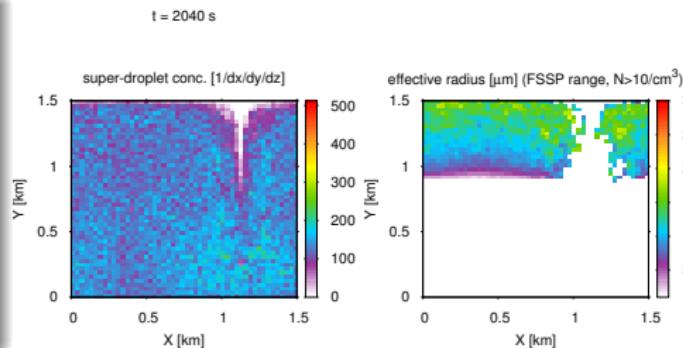
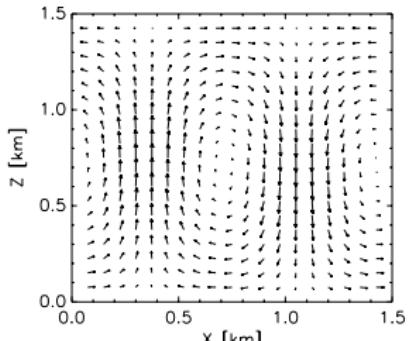
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)

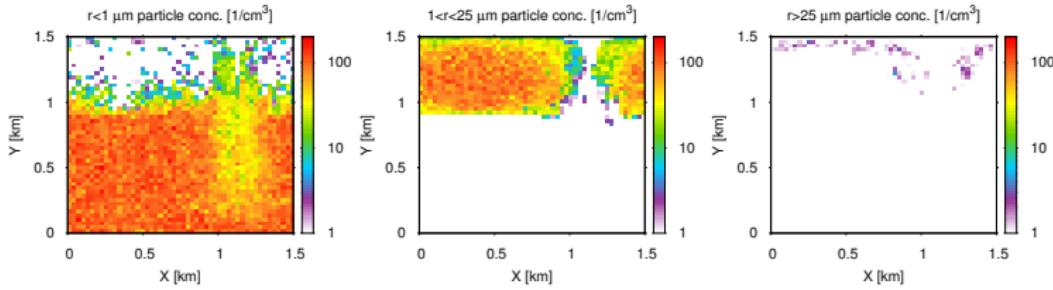
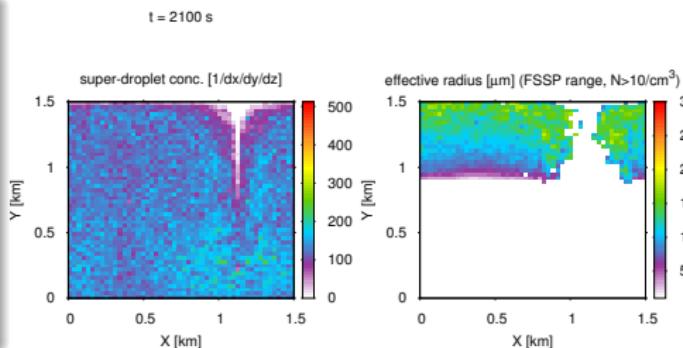
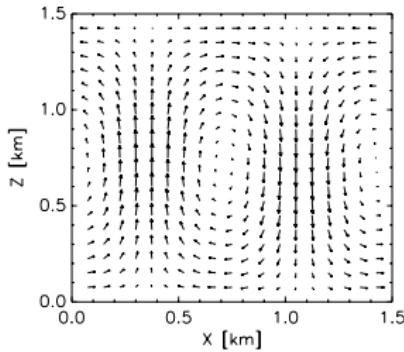


Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)

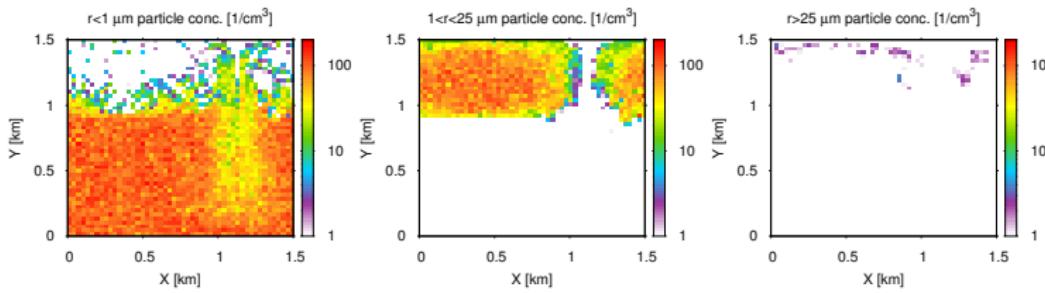
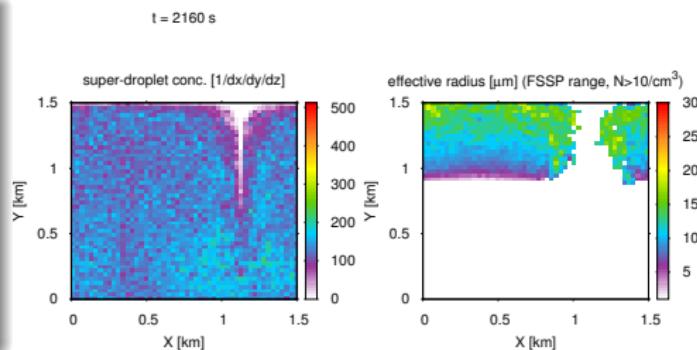
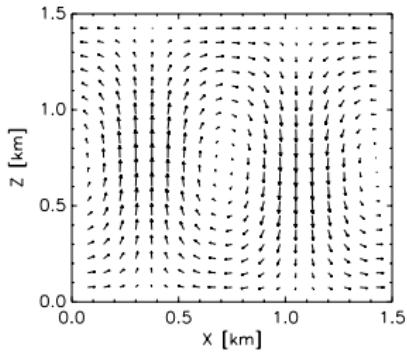


# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



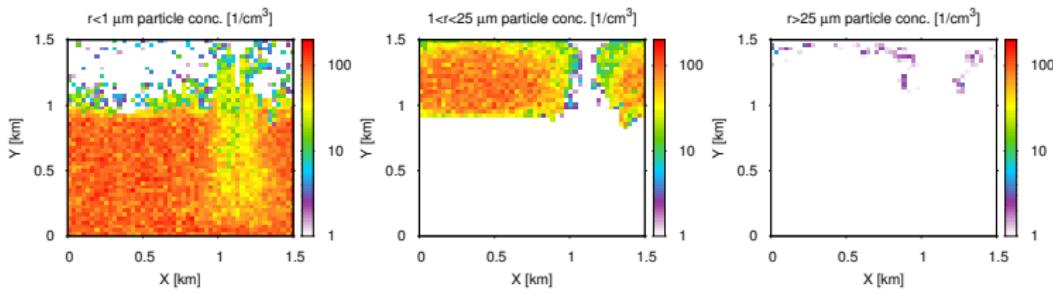
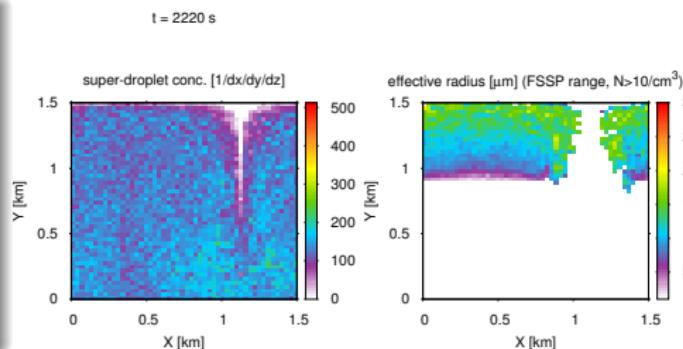
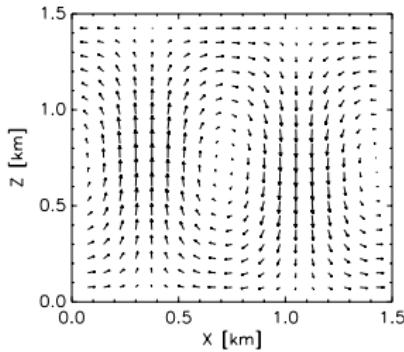
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



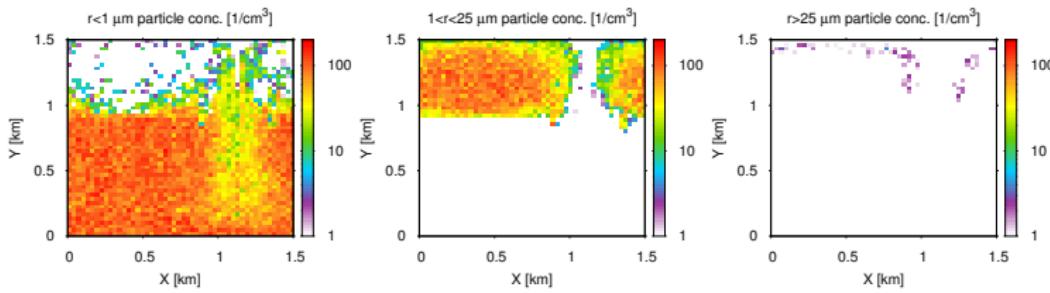
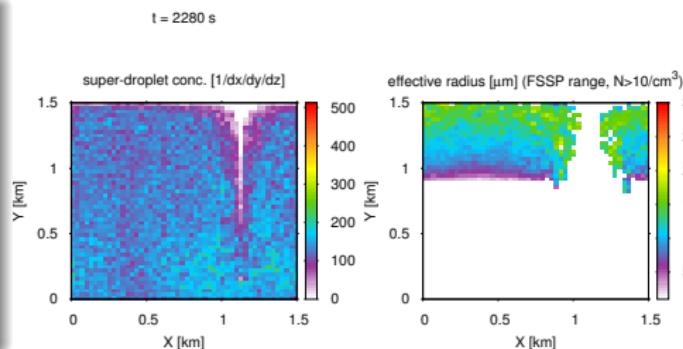
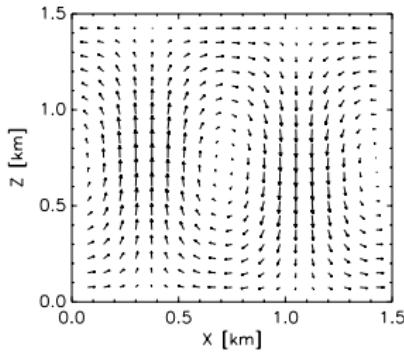
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



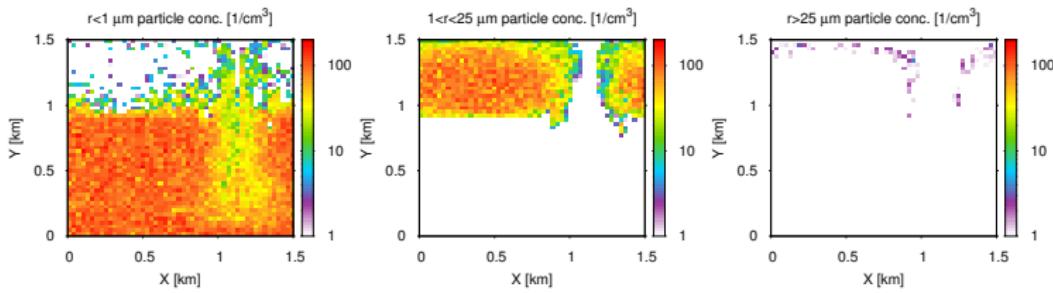
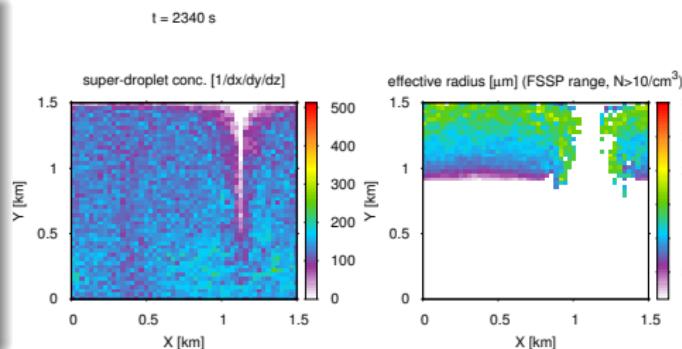
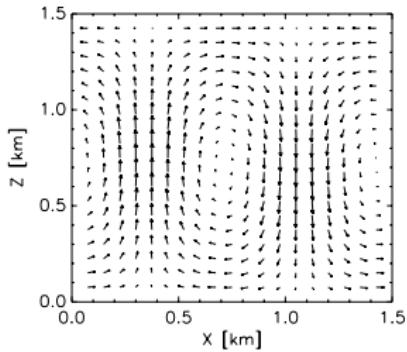
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



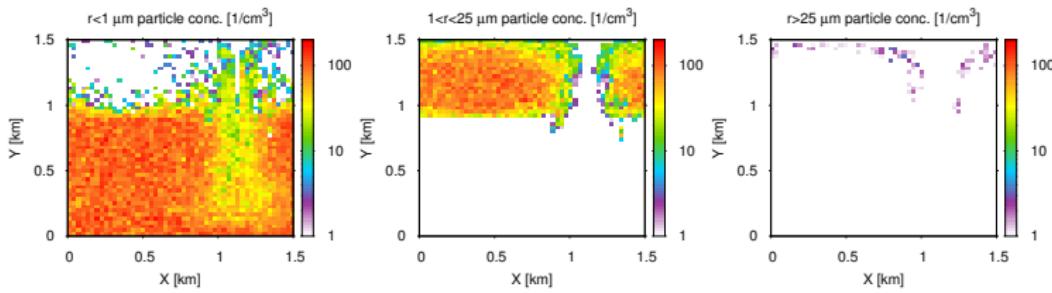
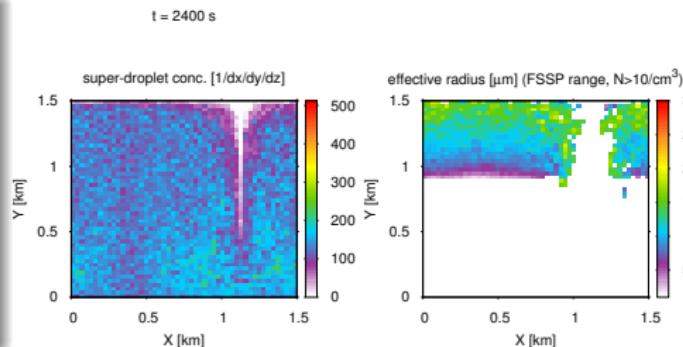
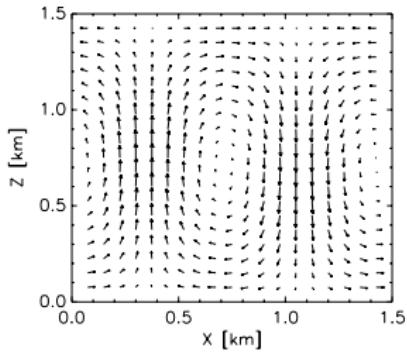
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)

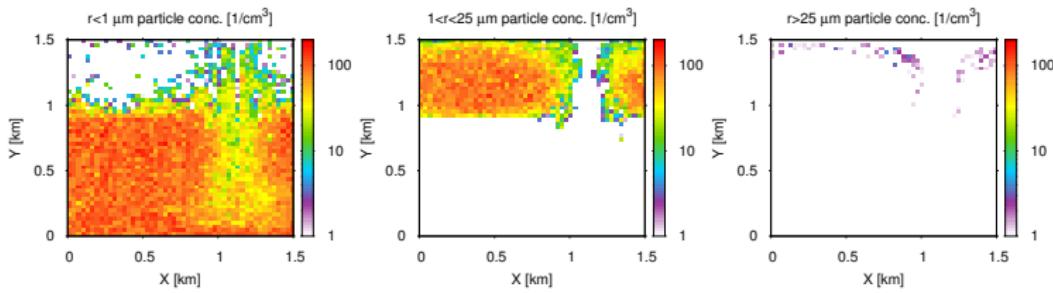
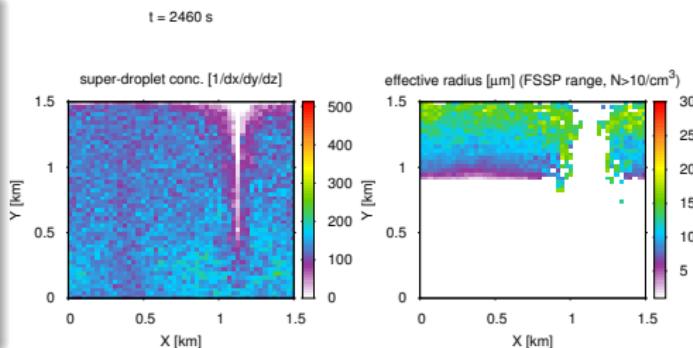
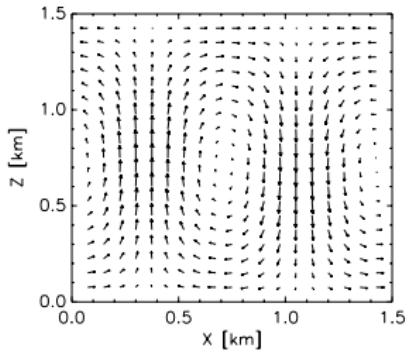


Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)

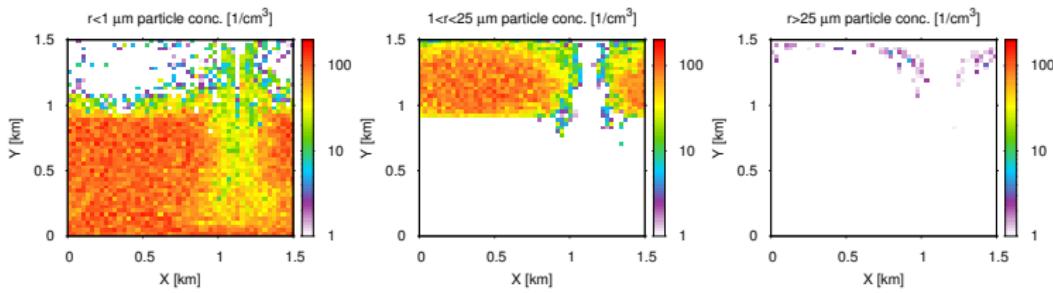
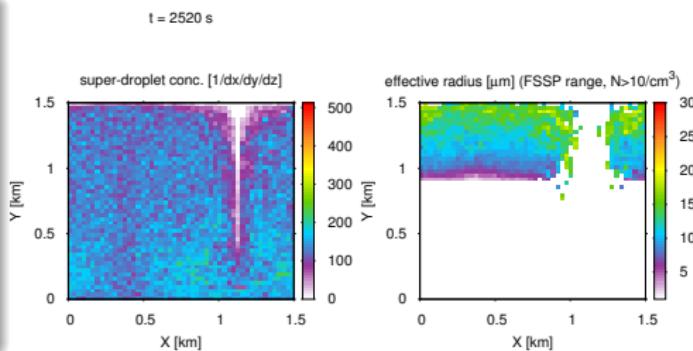
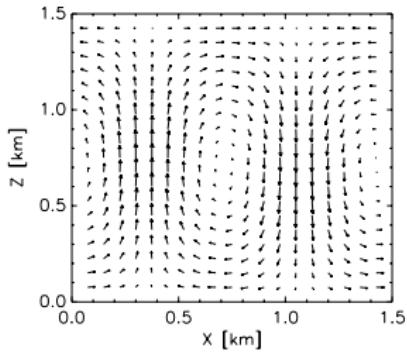


# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



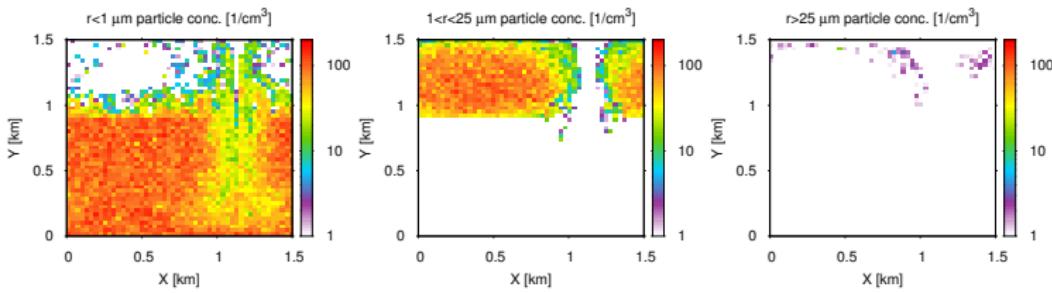
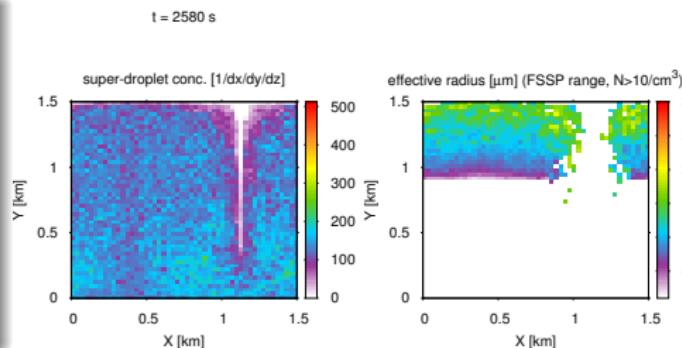
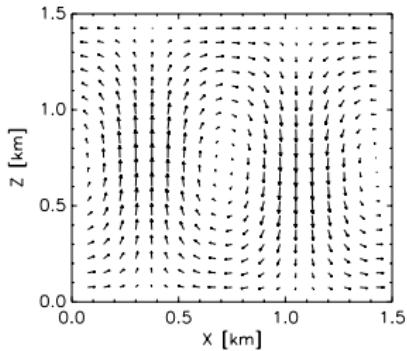
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



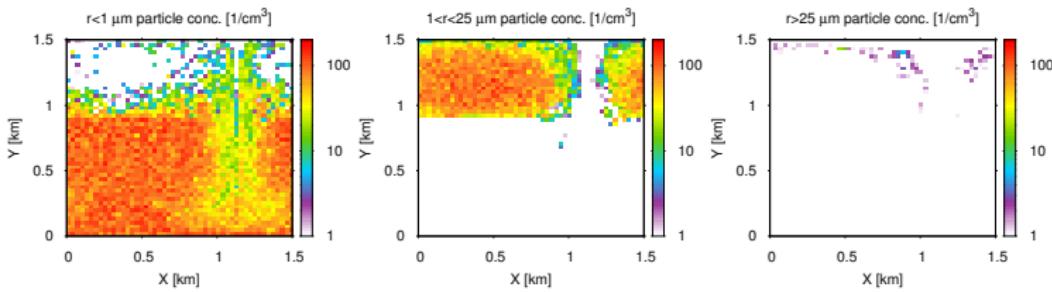
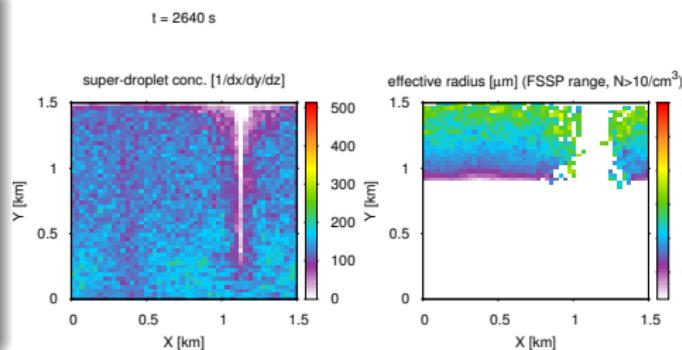
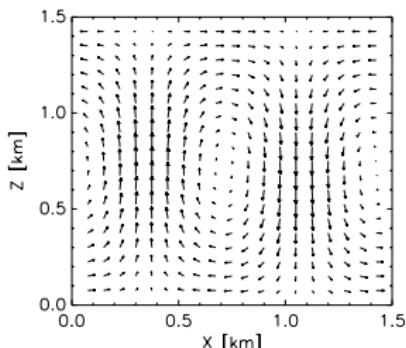
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



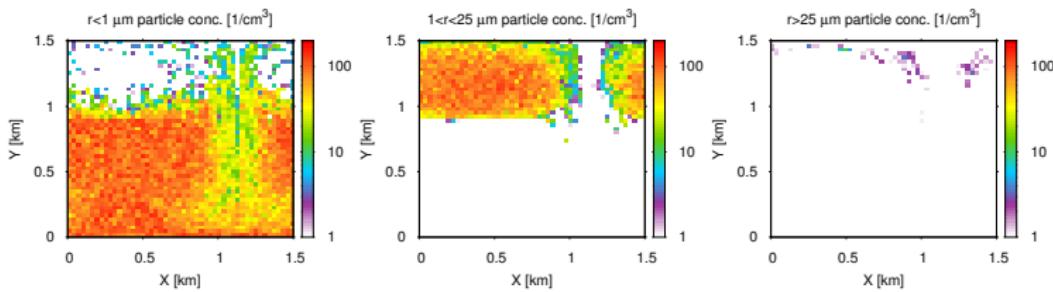
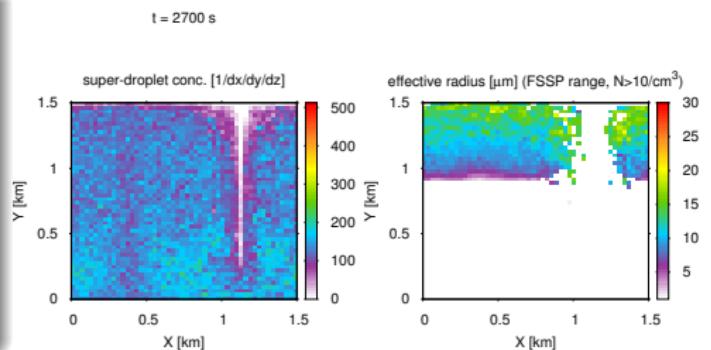
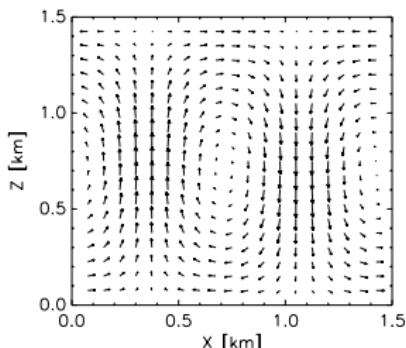
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



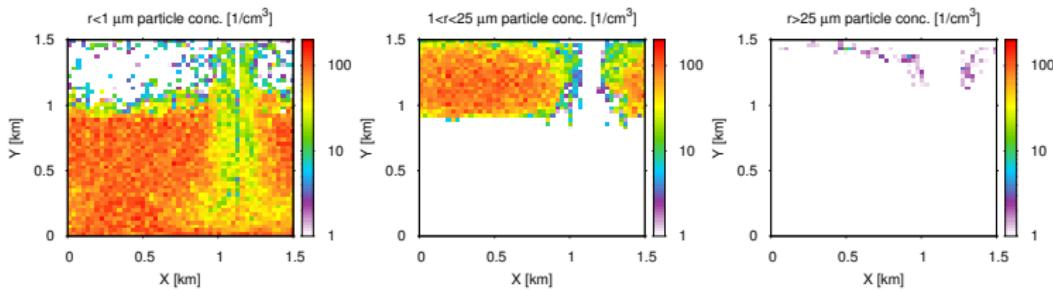
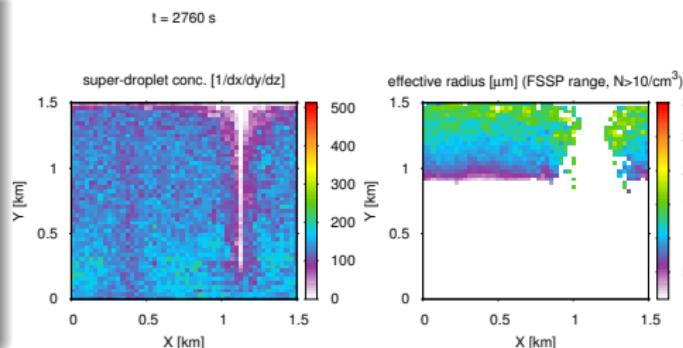
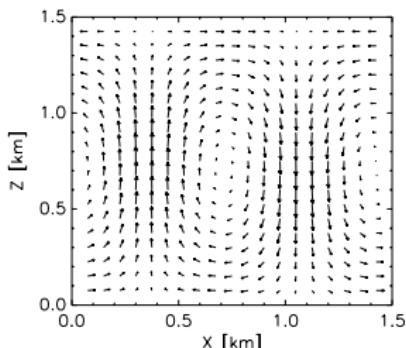
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



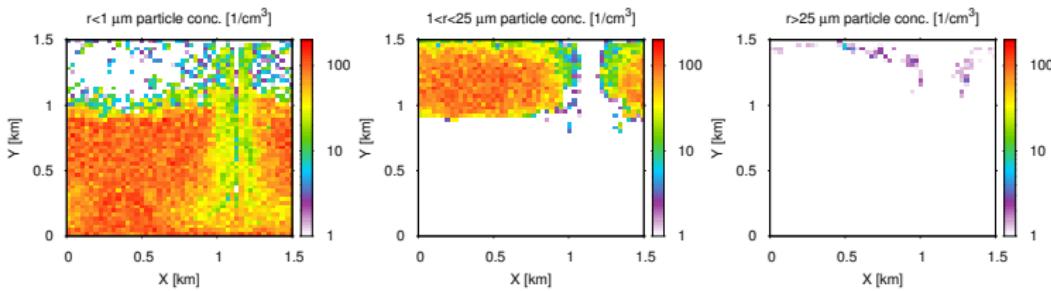
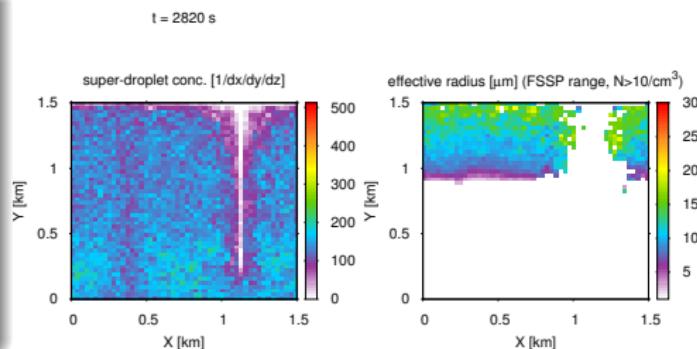
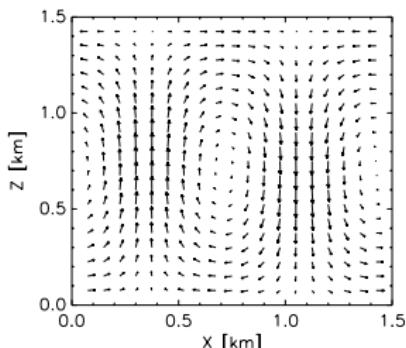
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



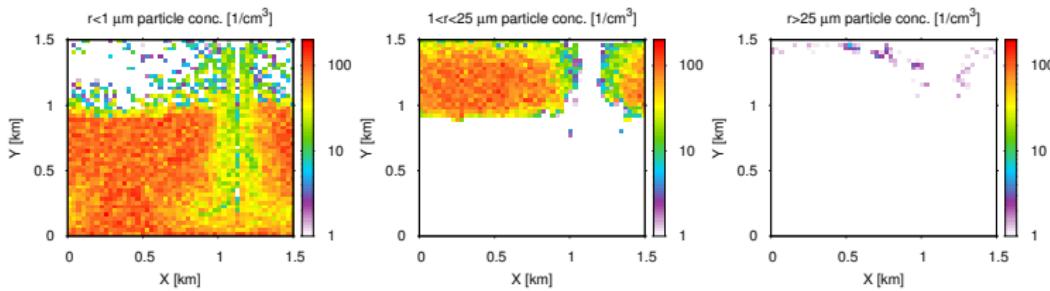
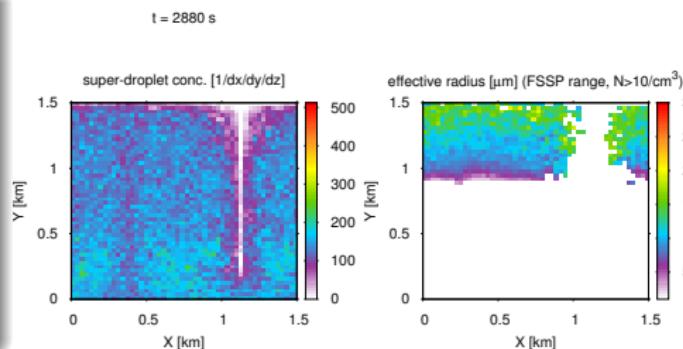
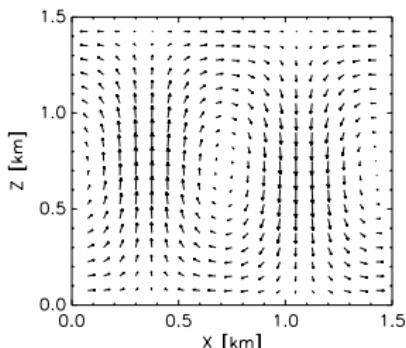
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



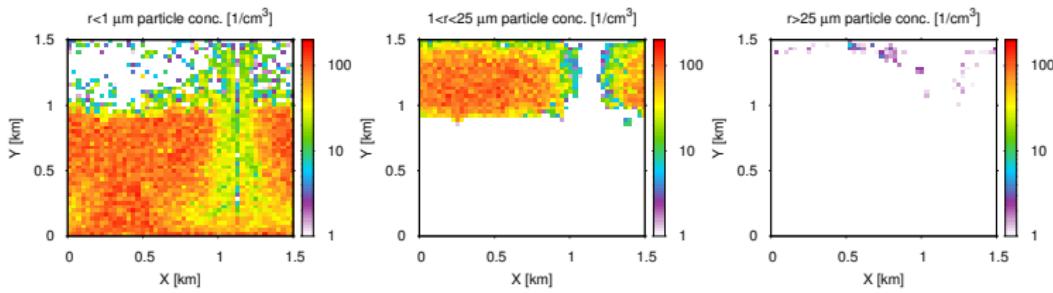
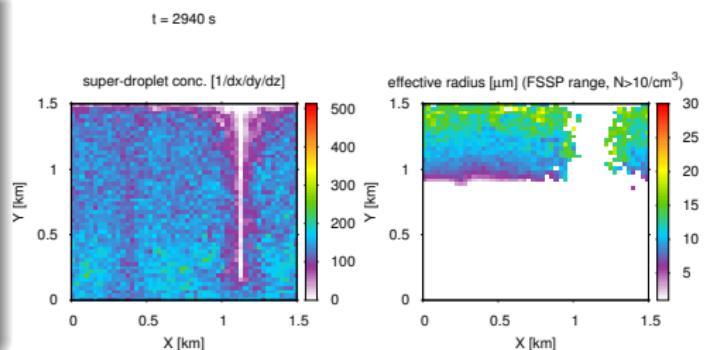
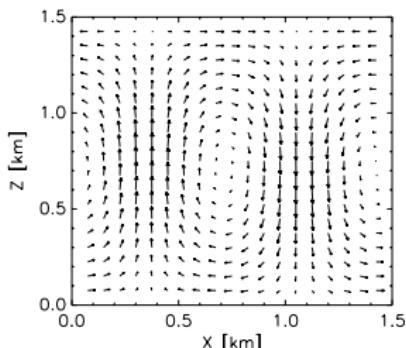
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



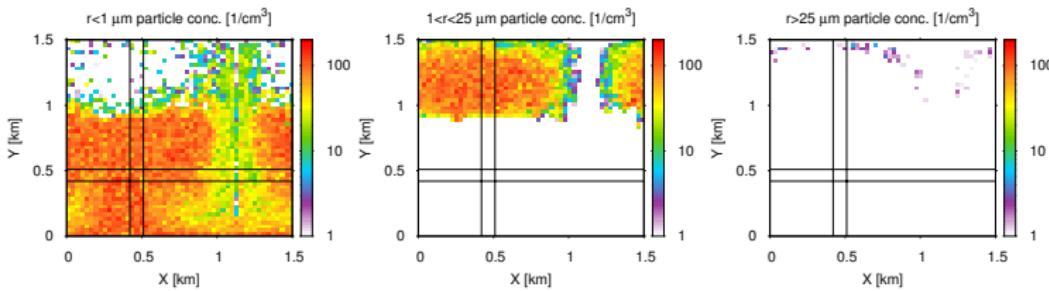
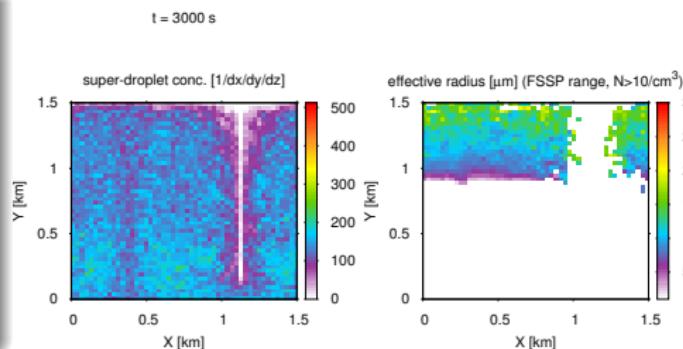
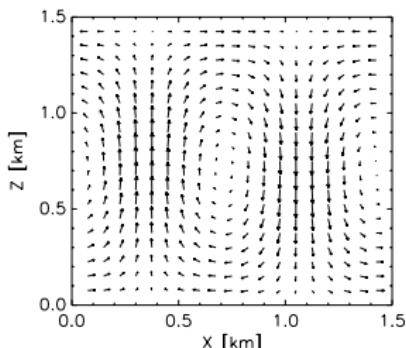
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)

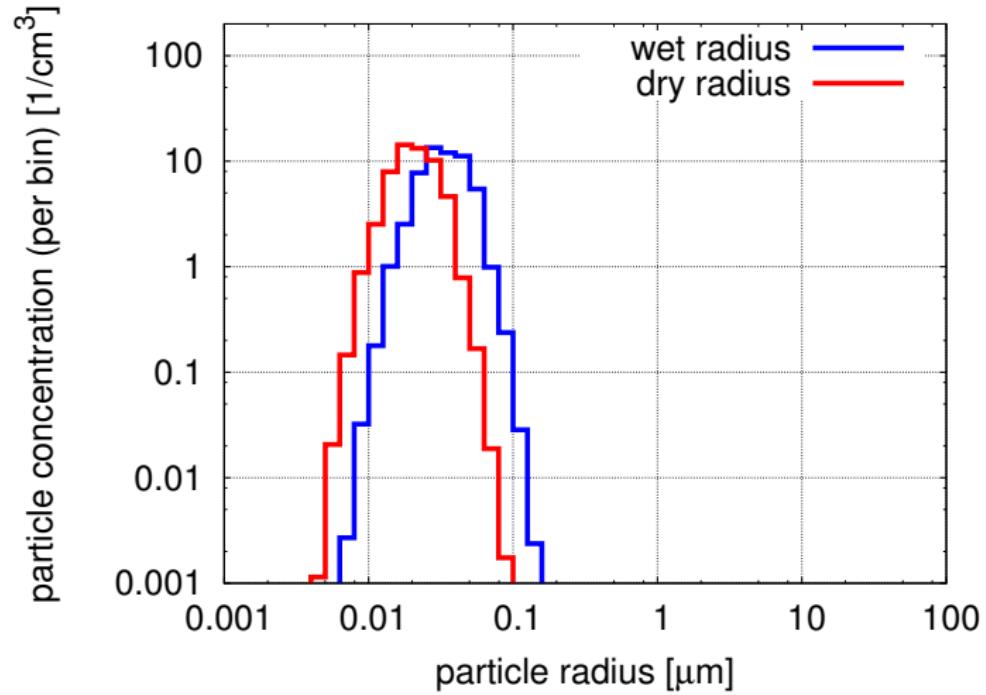


Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu

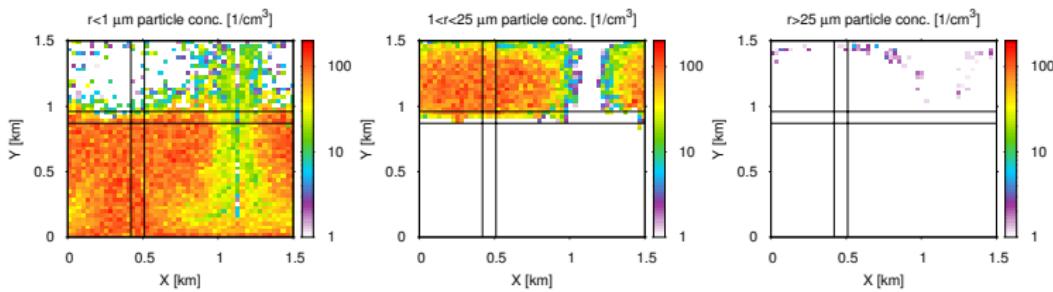
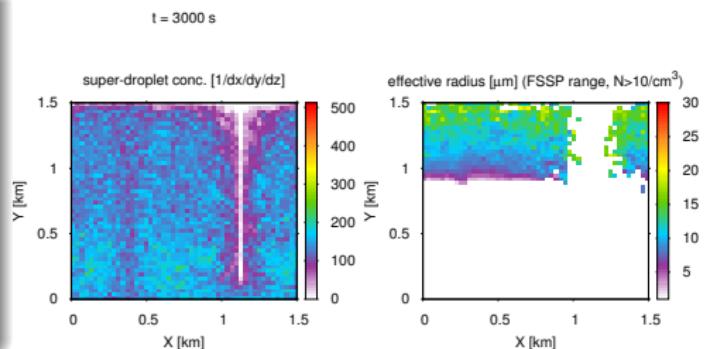
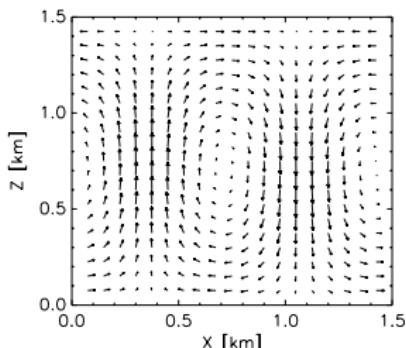
# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



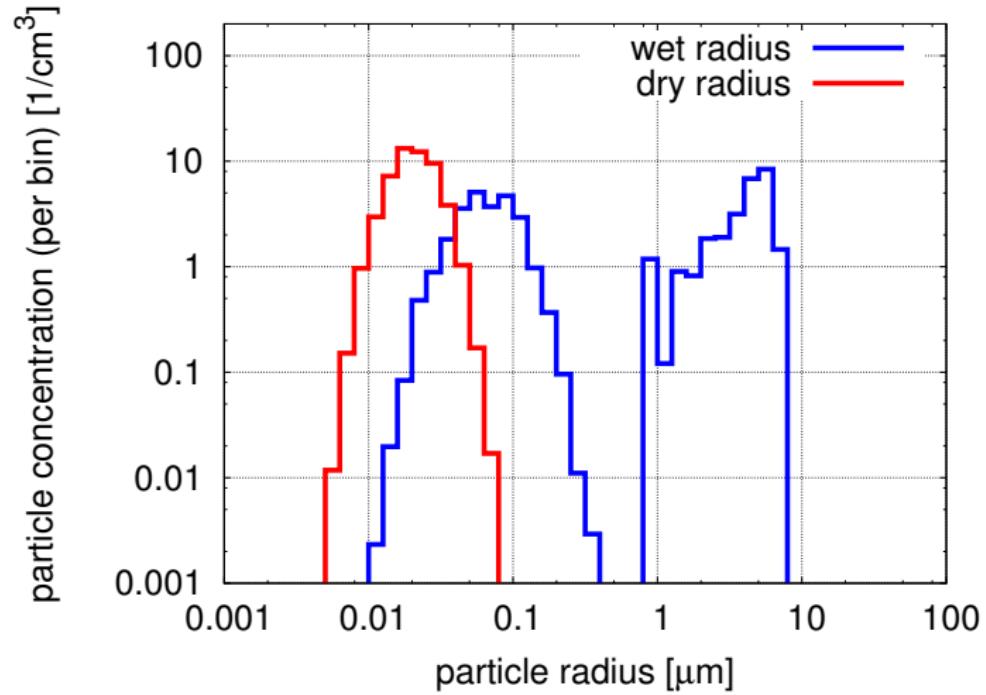
Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu



# Dotychczasowe przygotowania: icicle (NCN PRELUDIUM 2011-13)



Arabas, Jaruga, Pawlowska & Grabowski 2013 - artykuł w przygotowaniu



# Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: procesy



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

# Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: procesy



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

# Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: procesy



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



# Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: procesy



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



# Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: procesy



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



# Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: procesy



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



# Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: procesy



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



# Oddziaływanie aerozol – chmury – aerozol: procesy



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

# Cel projektu HARMONIA

---



Magritte

- ▶ chmury nie są dwu-wymiarowe
- ▶ oddziaływanie mikrofizyki z dynamiką  
(w tym podskalową) są istotne

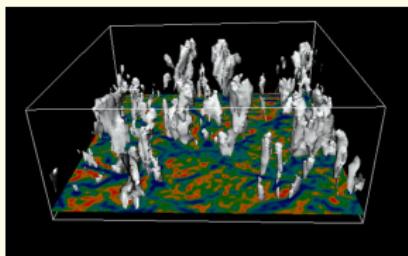
# Cel projektu HARMONIA

---



Magritte

- ▶ chmury nie są dwu-wymiarowe
- ▶ oddziaływanie mikrofizyki z dynamiką  
(w tym podskalową) są istotne



NCAR

cel projektu HARMONIA:  
**budowa trójwymiarowego modelu typu LES**  
z Lagranżowski opisem mikrofizyki  
umożliwiającego badanie oddziaływanie  
aerozolu z chmurami i opadem



# Plan prezentacji

---

- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Jak opisać w modelu oddziaływanie, aerozolu chmur i opadu?
- Jak napisać kod modelu łatwy w użyciu, zrozumieniu i rozbudowie?
- Zaproszenie do współpracy

# Plan prezentacji

---

- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Jak opisać w modelu oddziaływanie, aerozolu chmur i opadu?
- Jak napisać kod modelu łatwy w użyciu, zrozumieniu i rozbudowie?
- Zaproszenie do współpracy

Jak napisać kod modelu łatwy w użyciu, zrozumieniu i rozbudowie?  
czytelny i zwięzły kod





# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)

The screenshot shows a web browser displaying an arXiv preprint. The URL in the address bar is [arxiv.org/abs/1301.1334](http://arxiv.org/abs/1301.1334). The page header includes the Cornell University Library logo and the text "[1301.1334] Object-oriented impl...". The main content area has a red header bar with "arXiv.org > physics > arXiv:1301.1334". Below it, a grey header bar says "Physics > Computational Physics". The main title of the paper is "Object-oriented implementations of the MPDATA advection equation solver in C++, Python and Fortran". The authors listed are Sylwester Arabas, Dorota Jarecka, Anna Jaruga, Maciej Fijalkowski. A note at the bottom indicates the paper was submitted on 7 Jan 2013 (v1) and last revised on 19 Mar 2013 (this version, v2).



# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)

The screenshot shows a web browser displaying an arXiv preprint. The URL in the address bar is [arxiv.org/abs/1301.1334](http://arxiv.org/abs/1301.1334). The title of the paper is "Object-oriented implementations of the MPDATA advection equation solver in C++, Python and Fortran". It is categorized under Physics > Computational Physics. The authors listed are Sylwester Arabas, Dorota Jarecka, Anna Jaruga, and Maciej Fijalkowski. The paper was submitted on 7 Jan 2013 (v1) and last revised on 19 Mar 2013 (this version, v2). The Cornell University Library logo is visible on the left side of the page.

- ▶ obiektowa implementacja algorytmu MPDATA



# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)

The screenshot shows a web browser displaying an arXiv preprint. The URL in the address bar is [arxiv.org/abs/1301.1334](http://arxiv.org/abs/1301.1334). The page header includes the Cornell University Library logo and the title "[1301.1334] Object-oriented impl...". The main content area has a red header bar with "arXiv.org > physics > arXiv:1301.1334". Below it, a grey header bar says "Physics > Computational Physics". The main title of the paper is "Object-oriented implementations of the MPDATA advection equation solver in C++, Python and Fortran". The authors listed are Sylwester Arabas, Dorota Jarecka, Anna Jaruga, Maciej Fijałkowski. A note at the bottom indicates the paper was submitted on 7 Jan 2013 (v1) and last revised on 19 Mar 2013 (this version, v2).

- ▶ obiektowa implementacja algorytmu MPDATA
- ▶ porównanie czytelności/zwięzłości i wydajności: C++/Python/Fortran

# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)

The screenshot shows a web browser displaying an arXiv preprint. The URL in the address bar is [arxiv.org/abs/1301.1334](http://arxiv.org/abs/1301.1334). The page header includes the Cornell University Library logo and the text "[1301.1334] Object-oriented impl...". The main content area has a red header bar with "arXiv.org > physics > arXiv:1301.1334". Below it, a grey header bar says "Physics > Computational Physics". The main title of the paper is "Object-oriented implementations of the MPDATA advection equation solver in C++, Python and Fortran". The authors listed are Sylwester Arabas, Dorota Jarecka, Anna Jaruga, Maciej Fijałkowski. A note at the bottom indicates the paper was submitted on 7 Jan 2013 (v1) and last revised on 19 Mar 2013 (this version, v2).

- ▶ obiektowa implementacja algorytmu MPDATA
- ▶ porównanie czytelności/zwięzłości i wydajności: C++/Python/Fortran
- ▶ w recenzji w Comp. Phys. Comm.



# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)

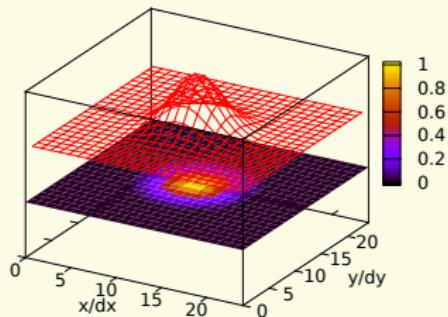
The screenshot shows a web browser displaying an arXiv preprint. The URL in the address bar is [arxiv.org/abs/1301.1334](http://arxiv.org/abs/1301.1334). The page header includes the Cornell University Library logo and the text "[1301.1334] Object-oriented impl...". The main content area has a red header bar with "arXiv.org > physics > arXiv:1301.1334". Below it, a grey header bar says "Physics > Computational Physics". The main title of the paper is "Object-oriented implementations of the MPDATA advection equation solver in C++, Python and Fortran". The authors listed are Sylwester Arabas, Dorota Jarecka, Anna Jaruga, Maciej Fijałkowski. A note at the bottom indicates the paper was submitted on 7 Jan 2013 (v1) and last revised on 19 Mar 2013 (this version, v2).

- ▶ obiektowa implementacja algorytmu MPDATA
- ▶ porównanie czytelności/zwięzłości i wydajności: C++/Python/Fortran
- ▶ w recenzji w Comp. Phys. Comm.
- ▶ kod (GPL): <http://github.com/slayoo/mpdata/>

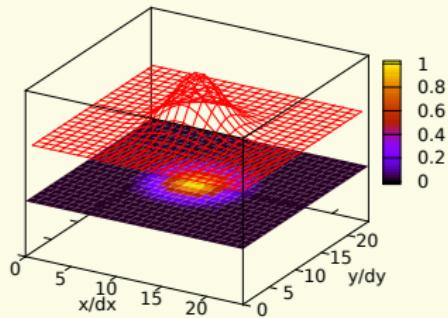


# Dotyczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)

donorcell t/dt=0

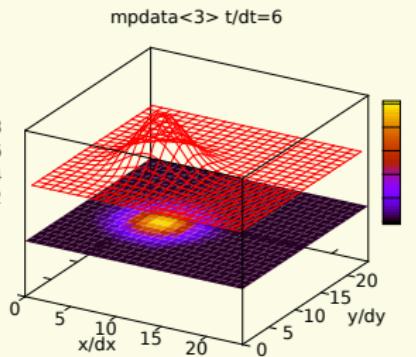
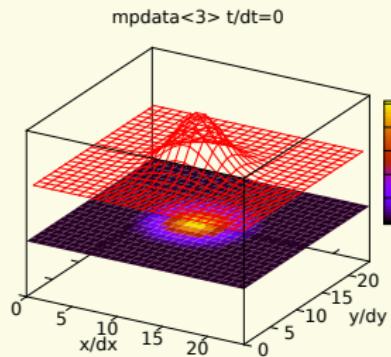
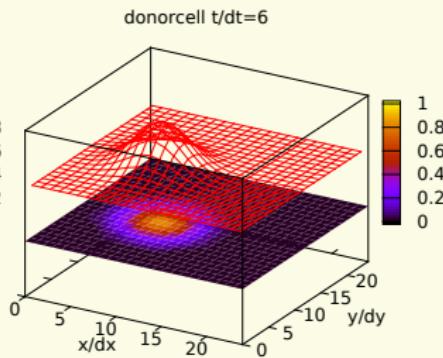
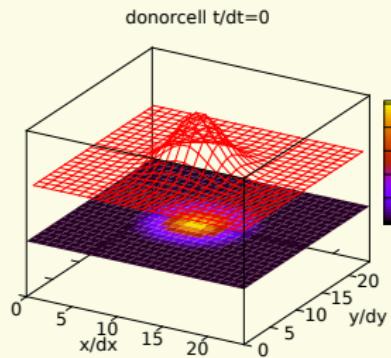


mpdata<3> t/dt=0



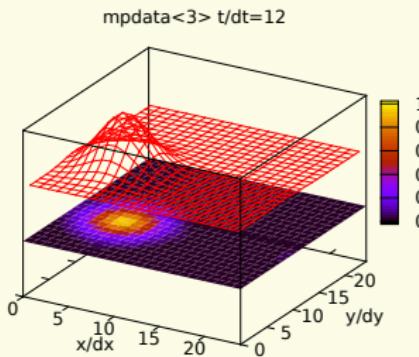
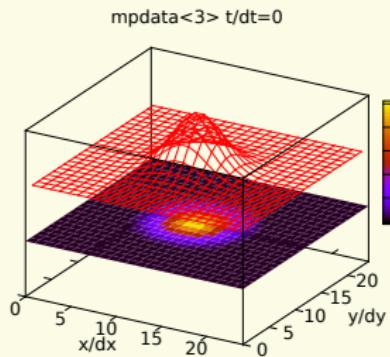
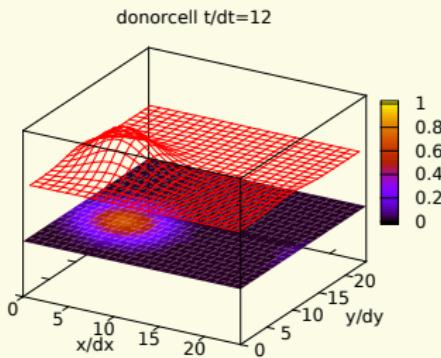
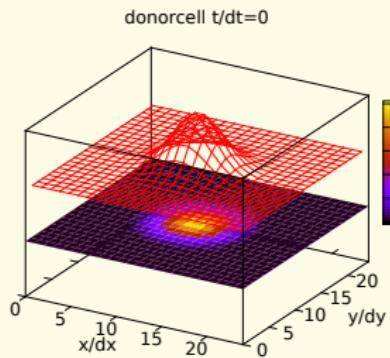
<https://github.com/slayoo/mpdata/blob/master/paper/cpp/plot.cpp>

# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)



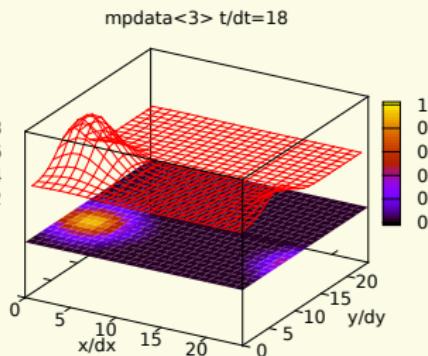
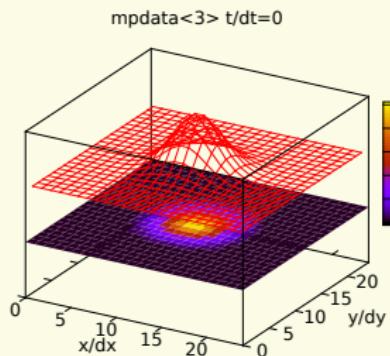
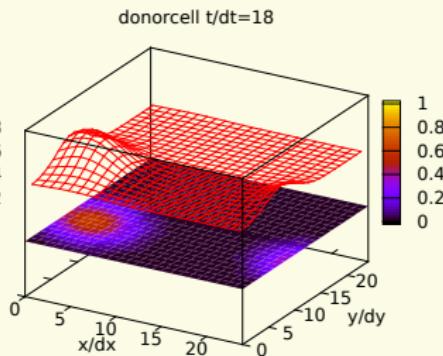
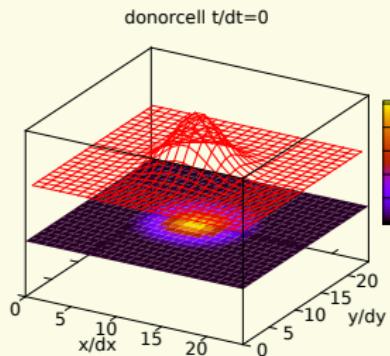
<https://github.com/slayoo/mpdata/blob/master/paper/cpp/plot.cpp>

# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)



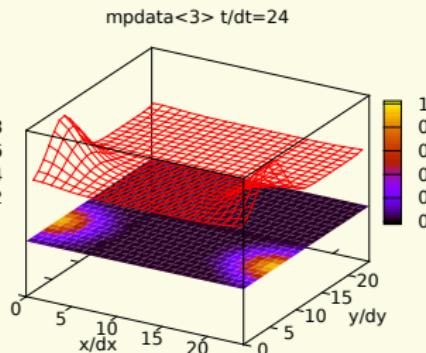
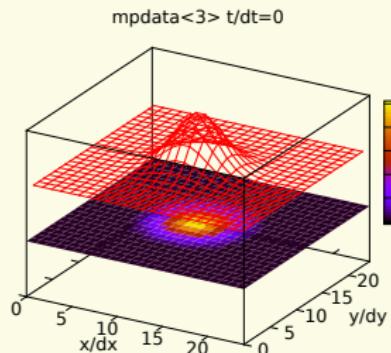
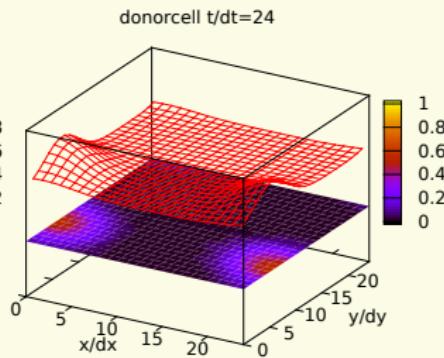
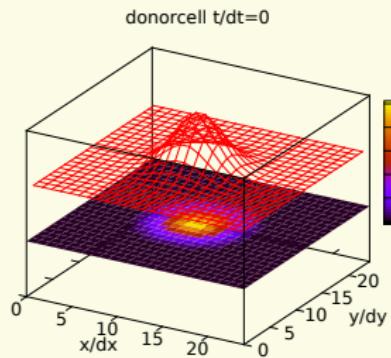
<https://github.com/slayoo/mpdata/blob/master/paper/cpp/plot.cpp>

# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)



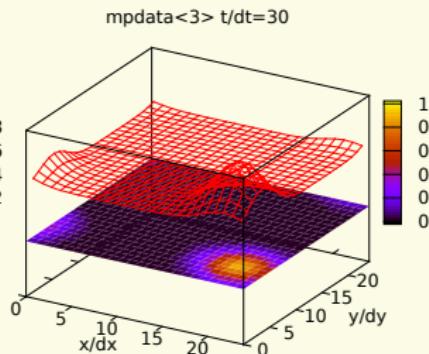
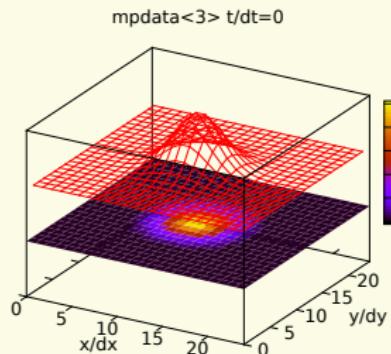
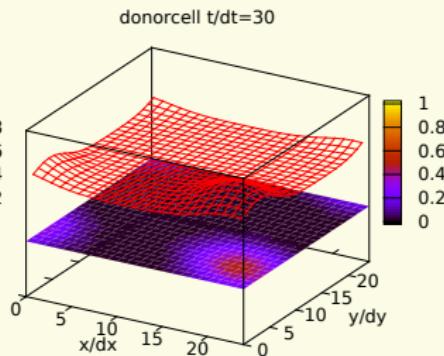
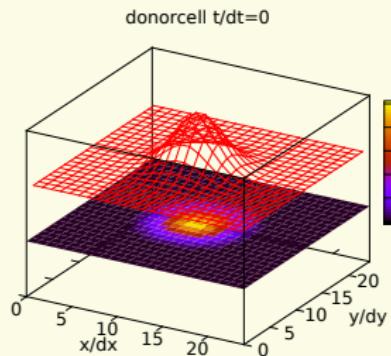
<https://github.com/slayoo/mpdata/blob/master/paper/cpp/plot.cpp>

# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)



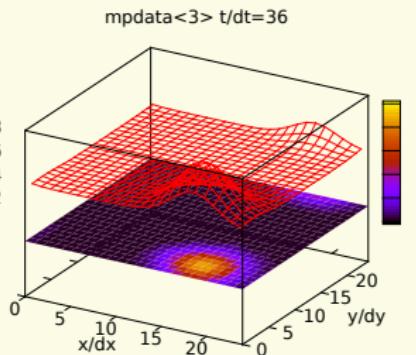
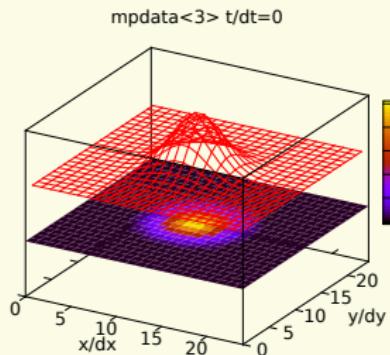
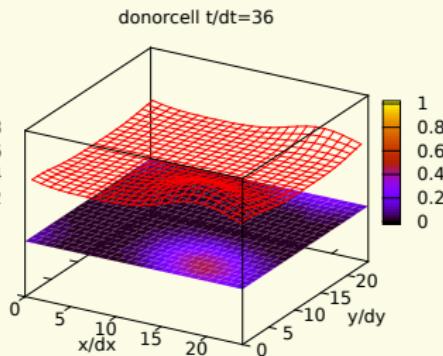
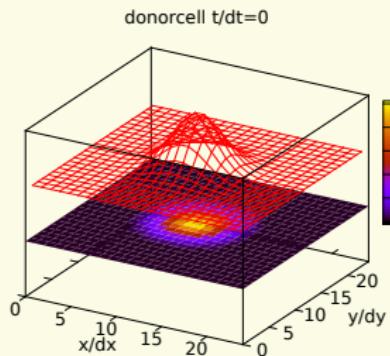
<https://github.com/slayoo/mpdata/blob/master/paper/cpp/plot.cpp>

# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)



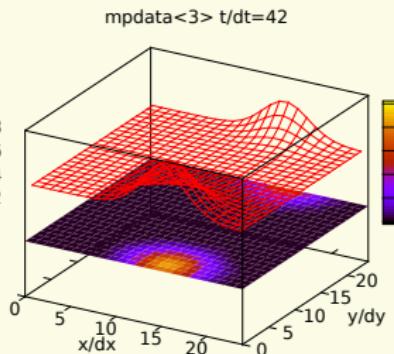
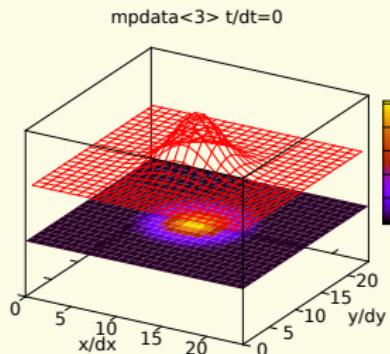
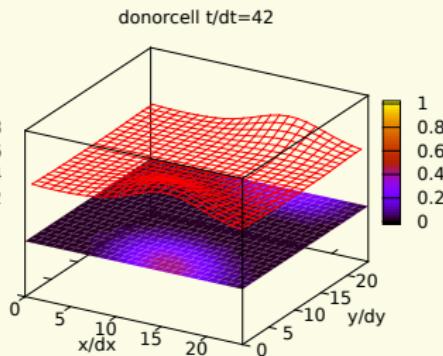
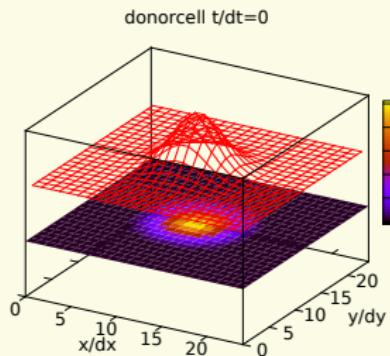
<https://github.com/slayoo/mpdata/blob/master/paper/cpp/plot.cpp>

# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)



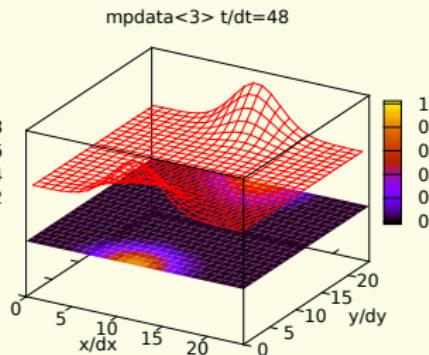
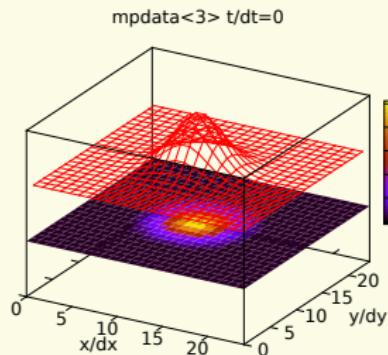
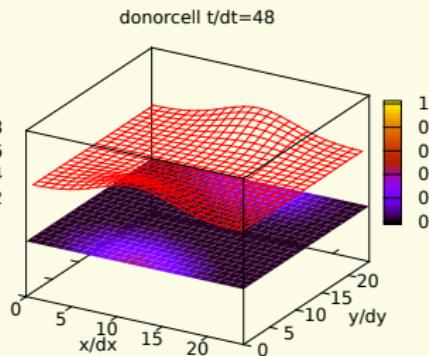
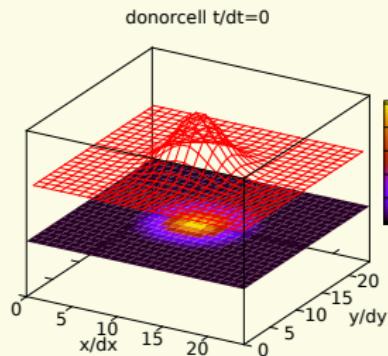
<https://github.com/slayoo/mpdata/blob/master/paper/cpp/plot.cpp>

# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)



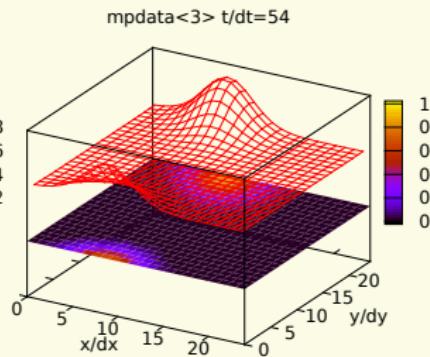
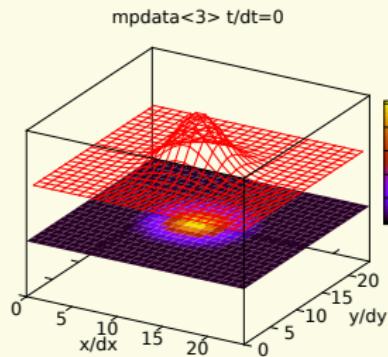
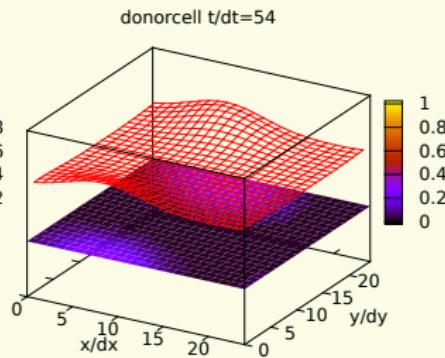
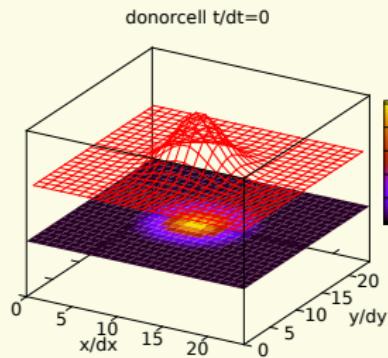
<https://github.com/slayoo/mpdata/blob/master/paper/cpp/plot.cpp>

# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)



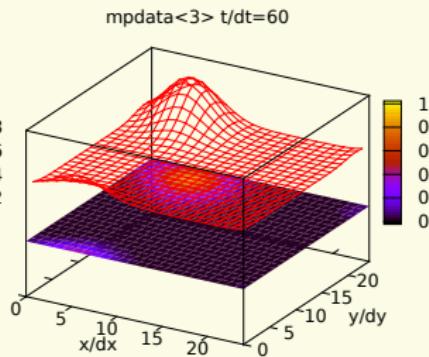
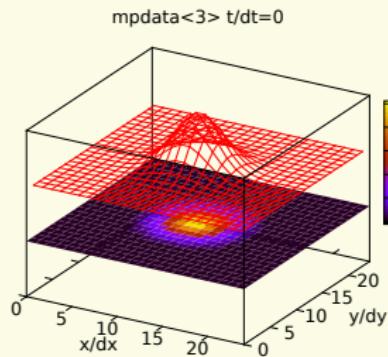
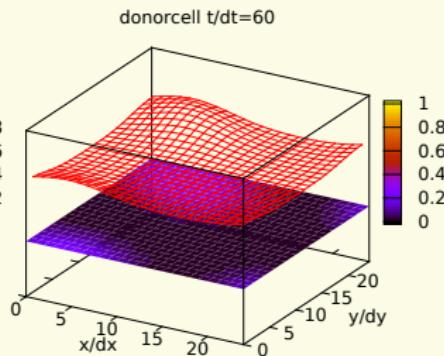
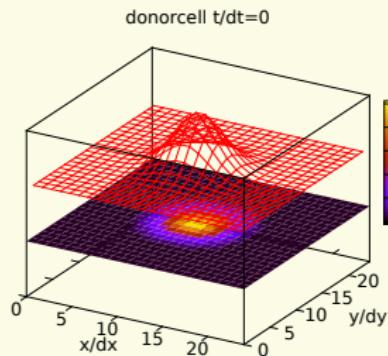
<https://github.com/slayoo/mpdata/blob/master/paper/cpp/plot.cpp>

# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)



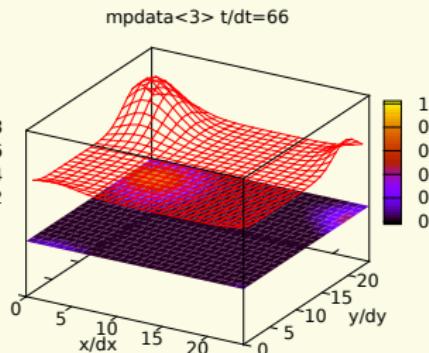
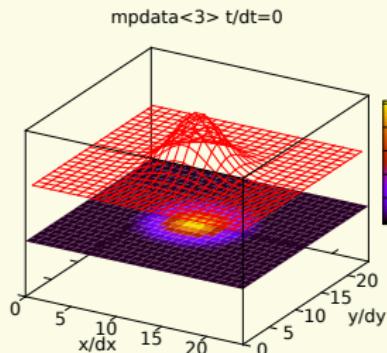
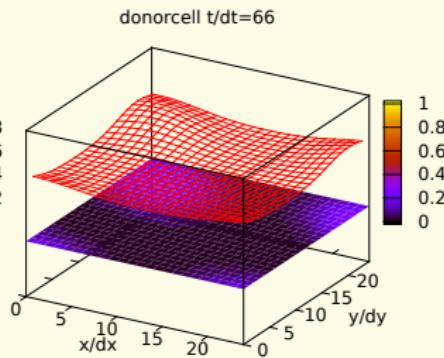
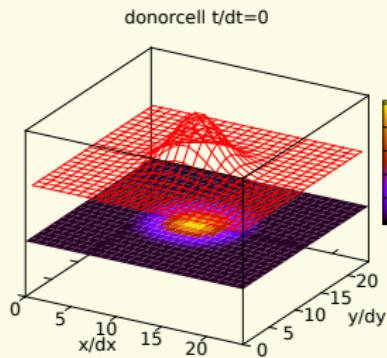
<https://github.com/slayoo/mpdata/blob/master/paper/cpp/plot.cpp>

# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)



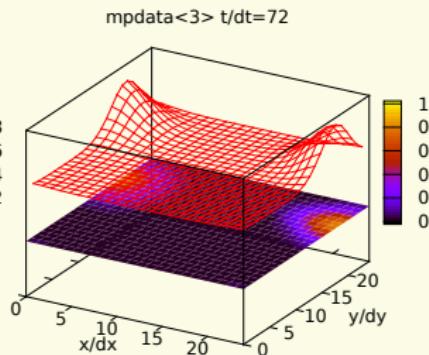
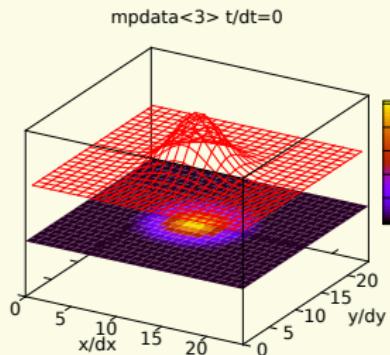
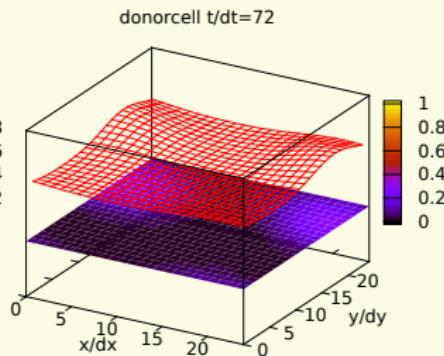
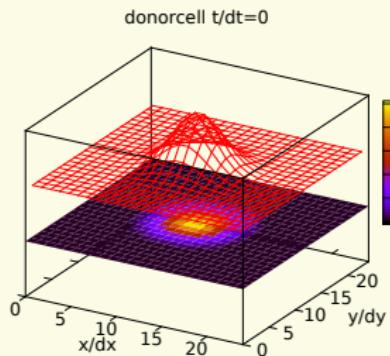
<https://github.com/slayoo/mpdata/blob/master/paper/cpp/plot.cpp>

# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)



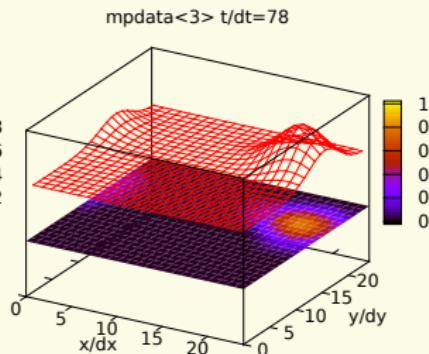
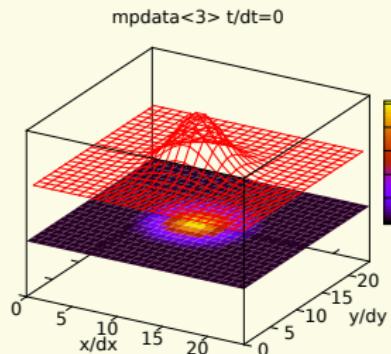
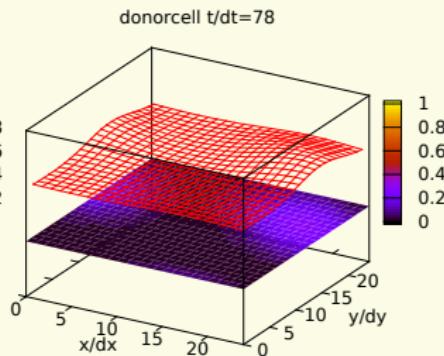
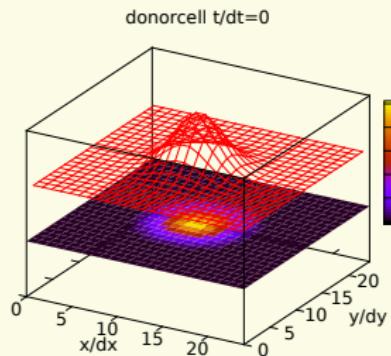
<https://github.com/slayoo/mpdata/blob/master/paper/cpp/plot.cpp>

# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)



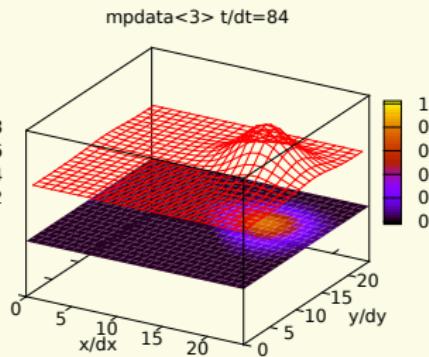
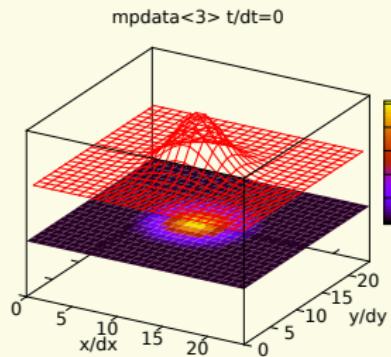
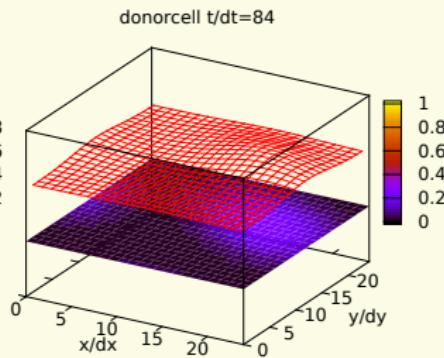
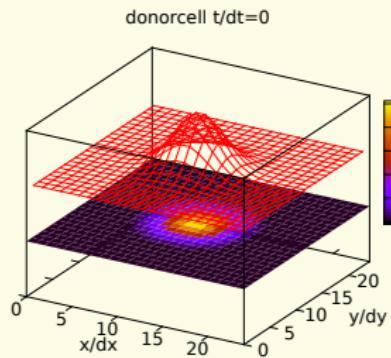
<https://github.com/slayoo/mpdata/blob/master/paper/cpp/plot.cpp>

# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)



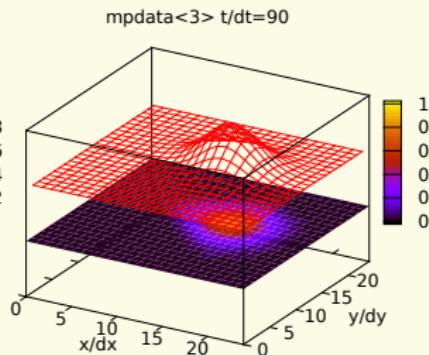
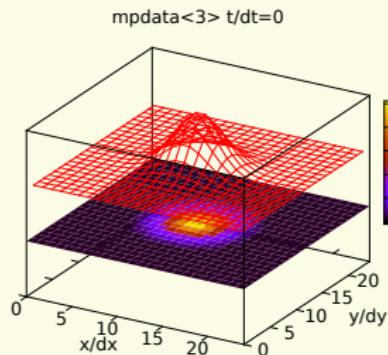
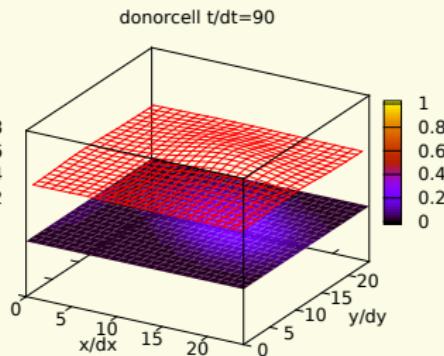
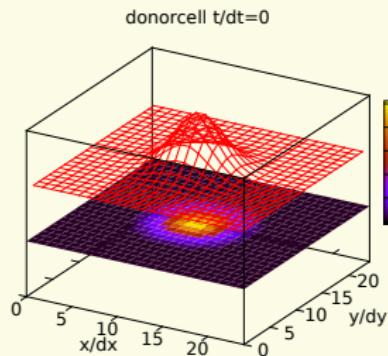
<https://github.com/slayoo/mpdata/blob/master/paper/cpp/plot.cpp>

# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)



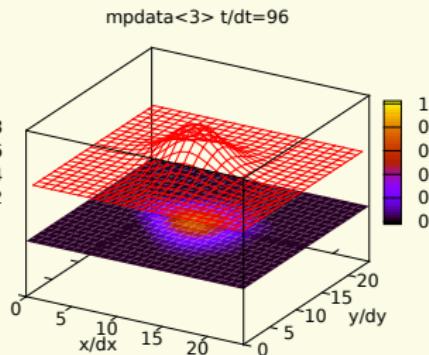
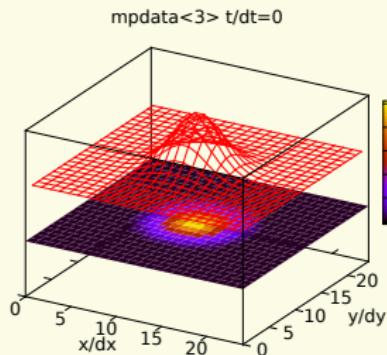
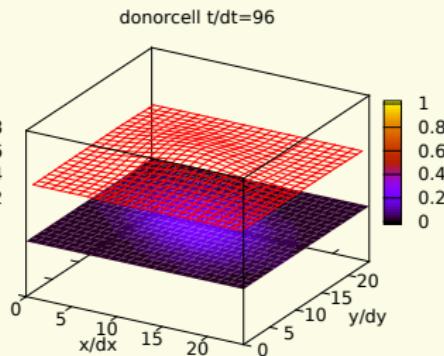
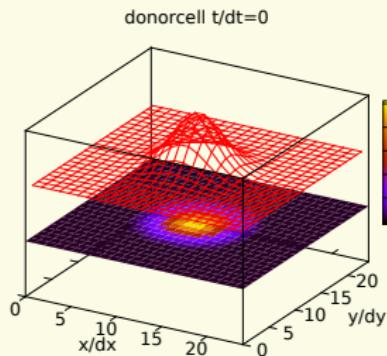
<https://github.com/slayoo/mpdata/blob/master/paper/cpp/plot.cpp>

# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)



<https://github.com/slayoo/mpdata/blob/master/paper/cpp/plot.cpp>

# Dotychczasowe przygotowania: **mpdata-oop** (arXiv:1301.1334)



<https://github.com/slayoo/mpdata/blob/master/paper/cpp/plot.cpp>

# Odwzorowanie notacji matematycznej w kodzie: Blitz++

$$\psi_{i,j}^{[n+1]} = \psi_{i,j}^{[n]} - \sum_{d=0}^{N-1} \left( F \left[ \psi_{\pi_{i,j}^d}^{[n]}, \psi_{\pi_{i+1,j}^d}^{[n]}, C_{\pi_{i+1/2,j}^d}^{[d]} \right] \right.$$

$$\left. - F \left[ \psi_{\pi_{i-1,j}^d}^{[n]}, \psi_{\pi_{i,j}^d}^{[n]}, C_{\pi_{i-1/2,j}^d}^{[d]} \right] \right)$$

```
template<int d> (C++)  
inline auto donorcell(  
    const arr_t &psi, const arr_t &c,  
    const rng_t &i, const rng_t &j  
) return_macro(  
    F(  
        psi(pi<d>(i, j)),  
        psi(pi<d>(i+1, j)),  
        C(pi<d>(i+h, j))  
    ) -  
    F(  
        psi(pi<d>(i-1, j)),  
        psi(pi<d>(i, j)),  
        C(pi<d>(i-h, j))  
    )  
)
```

```
void donorcell_op(  
    const arrvec_t &psi, const int n,  
    const arrvec_t &c,  
    const rng_t &i, const rng_t &j  
) {  
    psi[n+1](i, j) = psi[n](i, j)  
        - donorcell<0>(psi[n], c[0], i, j)  
        - donorcell<1>(psi[n], c[1], j, i);  
}
```

# Odwzorowanie notacji matematycznej w kodzie: Blitz++

$$\psi_{i,j}^{[n+1]} = \psi_{i,j}^{[n]} - \sum_{d=0}^{N-1} \left( F \left[ \psi_{\pi_{i,j}^d}^{[n]}, \psi_{\pi_{i+1,j}^d}^{[n]}, C_{\pi_{i+1/2,j}^d}^{[d]} \right] \right.$$

$$\left. - F \left[ \psi_{\pi_{i-1,j}^d}^{[n]}, \psi_{\pi_{i,j}^d}^{[n]}, C_{\pi_{i-1/2,j}^d}^{[d]} \right] \right)$$

```
template<int d> (C++)  
inline auto donorcell(  
    const arr_t &psi, const arr_t &c,  
    const rng_t &i, const rng_t &j  
) return_macro(  
    F(  
        psi(pi<d>(i, j)),  
        psi(pi<d>(i+1, j)),  
        C(pi<d>(i+h, j))  
    ) -  
    F(  
        psi(pi<d>(i-1, j)),  
        psi(pi<d>(i, j)),  
        C(pi<d>(i-h, j))  
    )  
)
```

► brak pętli

```
void donorcell_op(  
    const arrvec_t &psi, const int n,  
    const arrvec_t &c,  
    const rng_t &i, const rng_t &j  
) {  
    psi[n+1](i, j) = psi[n](i, j)  
        - donorcell<0>(psi[n], c[0], i, j)  
        - donorcell<1>(psi[n], c[1], j, i);  
}
```

# Odwzorowanie notacji matematycznej w kodzie: Blitz++

$$\psi_{i,j}^{[n+1]} = \psi_{i,j}^{[n]} - \sum_{d=0}^{N-1} \left( F \left[ \psi_{\pi_{i,j}^d}^{[n]}, \psi_{\pi_{i+1,j}^d}^{[n]}, C_{\pi_{i+1/2,j}^d}^{[d]} \right] \right.$$

$$\left. - F \left[ \psi_{\pi_{i-1,j}^d}^{[n]}, \psi_{\pi_{i,j}^d}^{[n]}, C_{\pi_{i-1/2,j}^d}^{[d]} \right] \right)$$

```
template<int d> (C++)  
inline auto donorcell(  
    const arr_t &psi, const arr_t &c,  
    const rng_t &i, const rng_t &j  
) return_macro(  
    F(  
        psi(pi<d>(i, j)),  
        psi(pi<d>(i+1, j)),  
        C(pi<d>(i+h, j))  
    ) -  
    F(  
        psi(pi<d>(i-1, j)),  
        psi(pi<d>(i, j)),  
        C(pi<d>(i-h, j))  
    )  
)
```

```
void donorcell_op(  
    const arrvec_t &psi, const int n,  
    const arrvec_t &c,  
    const rng_t &i, const rng_t &j  
) {  
    psi[n+1](i, j) = psi[n](i, j)  
        - donorcell<0>(psi[n], c[0], i, j)  
        - donorcell<1>(psi[n], c[1], j, i);  
}
```

- ▶ brak pętli
- ▶ rozdzielenie numeryki od współbieżności

# Odwzorowanie notacji matematycznej w kodzie: Blitz++

$$\psi_{i,j}^{[n+1]} = \psi_{i,j}^{[n]} - \sum_{d=0}^{N-1} \left( F \left[ \psi_{\pi_{i,j}^d}^{[n]}, \psi_{\pi_{i+1,j}^d}^{[n]}, C_{\pi_{i+1/2,j}^d}^{[d]} \right] \right.$$

$$\left. - F \left[ \psi_{\pi_{i-1,j}^d}^{[n]}, \psi_{\pi_{i,j}^d}^{[n]}, C_{\pi_{i-1/2,j}^d}^{[d]} \right] \right)$$

```
template<int d> (C++)  
inline auto donorcell(  
    const arr_t &psi, const arr_t &c,  
    const rng_t &i, const rng_t &j  
) return_macro(  
    F(  
        psi(pi<d>(i, j)),  
        psi(pi<d>(i+1, j)),  
        C(pi<d>(i+h, j))  
    ) -  
    F(  
        psi(pi<d>(i-1, j)),  
        psi(pi<d>(i, j)),  
        C(pi<d>(i-h, j))  
    )  
)
```

```
void donorcell_op(  
    const arrvec_t &psi, const int n,  
    const arrvec_t &c,  
    const rng_t &i, const rng_t &j  
) {  
    psi[n+1](i, j) = psi[n](i, j)  
        - donorcell<0>(psi[n], c[0], i, j)  
        - donorcell<1>(psi[n], c[1], j, i);  
}
```

- ▶ brak pętli
- ▶ rozdzielenie numeryki od współbieżności
- ▶ wzorce klas/funkcji ( $\text{pi} < d >()$ )  
~~ ewaluacja w czasie kompilacji

# Odwzorowanie notacji matematycznej w kodzie: Blitz++

$$\psi_{i,j}^{[n+1]} = \psi_{i,j}^{[n]} - \sum_{d=0}^{N-1} \left( F \left[ \psi_{\pi_{i,j}^d}^{[n]}, \psi_{\pi_{i+1,j}^d}^{[n]}, C_{\pi_{i+1/2,j}^d}^{[d]} \right] \right.$$

$$\left. - F \left[ \psi_{\pi_{i-1,j}^d}^{[n]}, \psi_{\pi_{i,j}^d}^{[n]}, C_{\pi_{i-1/2,j}^d}^{[d]} \right] \right)$$

```
template<int d> (C++)  
inline auto donorcell(  
    const arr_t &psi, const arr_t &c,  
    const rng_t &i, const rng_t &j  
) return_macro(  
    F(  
        psi(pi<d>(i, j)),  
        psi(pi<d>(i+1, j)),  
        C(pi<d>(i+h, j))  
    ) -  
    F(  
        psi(pi<d>(i-1, j)),  
        psi(pi<d>(i, j)),  
        C(pi<d>(i-h, j))  
    )  
)
```

```
void donorcell_op() (C++)  
{  
    const arrvec_t &psi, const int n,  
    const arrvec_t &c,  
    const rng_t &i, const rng_t &j  
}  
{  
    psi[n+1](i, j) = psi[n](i, j)  
    - donorcell<0>(psi[n], c[0], i, j)  
    - donorcell<1>(psi[n], c[1], j, i);  
}
```

- ▶ brak pętli
- ▶ rozdzielenie numeryki od współbieżności
- ▶ wzorce klas/funkcji ( $\text{pi} < d >()$ )  
~ ewaluacja w czasie kompilacji
- ▶ implementacja połowicznych indeksów poprzez przeciążenie operatorów

Jak napisać kod modelu łatwy w użyciu, zrozumieniu i rozbudowie?  
podział kodu, użycie bibliotek



## Dotychczasowe przygotowania: libmpdata++ i libcloudph++

### icicle

kinematyczny model chmury (2D)

**zależności:** libmpdata++, libcloudph++

**repozytorium:** [github.com/slayoo/icicle](https://github.com/slayoo/icicle)

# Dotyczasowe przygotowania: libmpdata++ i libcloudph++

## icicle

kinematyczny model chmury (2D)

**zależności:** libmpdata++, libcloudph++

**repozytorium:** [github.com/slayoo/icicle](https://github.com/slayoo/icicle)

## libmpdata++

solvary równań transportu

**zależności:** Blitz++, Boost.Thread, netCDF

**repo:** [github.com/slayoo/libmpdataxx](https://github.com/slayoo/libmpdataxx)

## libcloudph++

reprezentacja mikrofizyki (w tym lagranż.)

**zależności:** Boost.units, Boost.odeint, Thrust

**repo:** [github.com/slayoo/libcloudphxx](https://github.com/slayoo/libcloudphxx)

# Dotyczasowe przygotowania: libmpdata++ i libcloudph++

## icicle

kinematyczny model chmury (2D)

**zależności:** libmpdata++, libcloudph++

**repozytorium:** [github.com/slayoo/icicle](https://github.com/slayoo/icicle)

## icicles

model typu LES (3D)

**zależności:** libmpdata++, libcloudph++, ...

## libmpdata++

solvery równań transportu

**zależności:** Blitz++, Boost.Thread, netCDF

**repo:** [github.com/slayoo/libmpdataxx](https://github.com/slayoo/libmpdataxx)

## libcloudph++

reprezentacja mikrofizyki (w tym lagranż.)

**zależności:** Boost.units, Boost.odeint, Thrust

**repo:** [github.com/slayoo/libcloudphxx](https://github.com/slayoo/libcloudphxx)

# Dotyczasowe przygotowania: libmpdata++ i libcloudph++

## icicle

kinematyczny model chmury (2D)

**zależności:** libmpdata++, libcloudph++

**repozytorium:** [github.com/slayoo/icicle](https://github.com/slayoo/icicle)

## icicles

model typu LES (3D)

**zależności:** libmpdata++, libcloudph++, ...

## libmpdata++

solvery równań transportu

**zależności:** Blitz++, Boost.Thread, netCDF

**repo:** [github.com/slayoo/libmpdataxx](https://github.com/slayoo/libmpdataxx)

## libcloudph++

reprezentacja mikrofizyki (w tym lagranż.)

**zależności:** Boost.units, Boost.odeint, Thrust

**repo:** [github.com/slayoo/libcloudphxx](https://github.com/slayoo/libcloudphxx)

**pełna separacja: numeryki, fizyki, i/o, współbieżności**

dokumentacja

Jak napisać kod modelu łatwy w użyciu, zrozumieniu i rozbudowie?



# Budowa (i utrzymanie) dokumentacji: Doxygen

The screenshot shows a web browser window titled "libmpdata++: Main Page - Iceweasel". The address bar displays the URL: file:///mnt/macosx/Users/slayoo/Private-devel/libmpdataxx/doc/html/index.html. The main content area is titled "libmpdata++" and "libmpdata++ Documentation". A navigation menu at the top includes "Main Page", "Related Pages", "Classes", and "Files". A search bar is also present. The "INTRODUCTION" section contains text about the library being C++ implementations of MPDATA solvers for generalized transport equations, followed by a mathematical equation and a description of variables. It also mentions the theory behind MPDATA was developed by Piotr Smolarkiewicz et al. and provides a reference to his 2006 paper. The text notes that development is carried out by Sylwester Arabas, Anna Jaruga, and co-workers at the Institute of Geophysics, Faculty of Physics, University of Warsaw. The library is based on the Blitz++ library for array handling. At the bottom, there is a "KEY CONCEPTS" section.

libmpdata++ is C++ library of parallel, object-oriented implementations of the MPDATA family solvers of generalised transport equations of the form:

$$\partial_t \psi + \nabla \cdot (\vec{v}\psi) = R$$

where

$\psi = [\psi_1, \psi_2, \dots]$  is a set of conservative dependent variables,  $R = [R_1, R_2, \dots]$  are the forcing terms, and  $\vec{v} = [u, v, w]$  is the velocity field.

The theory behind MPDATA solvers was developed by Piotr Smolarkiewicz et al. (see e.g. [Smolarkiewicz 2006](#) , for a review and list of references). Development of libmpdata++ is carried out by Sylwester Arabas, Anna Jaruga and co-workers at the [Institute of Geophysics, Faculty of Physics, University of Warsaw](#) (the copyright holder) with funding from the Polish National Science Centre.

libmpdata++ is based on the Blitz++ library for high-performance array handling. libmpdata++ (and Blitz++) is a header-only library.

**KEY CONCEPTS**



# Jak napisać kod modelu łatwy w użyciu, zrozumieniu i rozbudowie?

testy (automatyczna weryfikacja\*)  
testy (przykłady użycia)

- \* po wprowadzeniu zmian w kodzie,  
po zmianie wersji bibliotek,  
przed użyciem na nowym sprzęcie

# Automatyzacja testów i komplikacji: CMake

```
slayoo@skua:~/devel/libmpdataxx$ make test
Running tests...
Test project /home/pracownicy/slayoo/devel/libmpdataxx
    Start 1: test_kahan_sum
1/10 Test #1: test_kahan_sum ..... Passed    0.01 sec
    Start 2: test_gnuplot_iostream_1d
2/10 Test #2: test_gnuplot_iostream_1d ..... Passed    1.06 sec
    Start 3: test_gnuplot_iostream_2d
3/10 Test #3: test_gnuplot_iostream_2d ..... Passed   33.08 sec
    Start 4: test_var_sign_2d
4/10 Test #4: test_var_sign_2d ..... Passed   66.27 sec
    Start 5: test_harmosc
5/10 Test #5: test_harmosc ..... Passed   73.44 sec
    Start 6: test_todo_3d
6/10 Test #6: test_todo_3d ..... ***Exception: Other  0.02 sec
    Start 7: test_bombel
7/10 Test #7: test_bombel ..... Passed   17.89 sec
    Start 8: test_concurrent_1d
8/10 Test #8: test_concurrent_1d ..... Passed   25.10 sec
    Start 9: test_shallow_water
9/10 Test #9: test_shallow_water ..... Passed   31.59 sec
    Start 10: test_rotating_cone
10/10 Test #10: test_rotating_cone ..... Passed   19.24 sec

90% tests passed, 1 tests failed out of 10

Total Test time (real) = 268.06 sec

The following tests FAILED:
    6 - test_todo_3d (OTHER_FAULT)
Errors while running CTest
make: *** [test] Error 8
slayoo@skua:~/devel/libmpdataxx$
```



# **kod modelu łatwy w użyciu, zrozumieniu i rozbudowie**



**kod modelu łatwy w użyciu, zrozumieniu i rozbudowie**



wolne oprogramowanie (GNU GPL v3)



**kod modelu łatwy w użyciu, zrozumieniu i rozbudowie**



wolne oprogramowanie (GNU GPL v3)



rozproszony system kontroli wersji  
wspomagający pracę w zespole, współpracę z innymi grupami,  
automatyzujący proces aktualizacji programu,  
dający natychmiastowy dostęp do dowolnej wersji



**kod modelu łatwy w użyciu, zrozumieniu i rozbudowie**



wolne oprogramowanie (GNU GPL v3)



rozproszony system kontroli wersji  
wspomagający pracę w zespole, współpracę z innymi grupami,  
automatyzujący proces aktualizacji programu,  
dający natychmiastowy dostęp do dowolnej wersji



sprawdzalność wyników  
możliwość recenzji kodu  
przydatność do badań i dydaktyki



# Plan prezentacji

---

- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Jak opisać w modelu oddziaływanie, aerozolu chmur i opadu?
- Jak napisać kod modelu łatwy w użyciu, zrozumieniu i rozbudowie?
- Zaproszenie do współpracy

# Plan prezentacji

---

- Oddziaływanie aerozol - chmury - opad
- Jak opisać w modelu oddziaływanie, aerozolu chmur i opadu?
- Jak napisać kod modelu łatwy w użyciu, zrozumieniu i rozbudowie?
- Zaproszenie do współpracy

## Wybrane zadania w projekcie / elementy modelu

---

# Wybrane zadania w projekcie / elementy modelu

---

- ▶ anelastyczny rdzeń dynamiczny  
rozwiązań z EULAGa zaimplementowane na nowo w C++

# Wybrane zadania w projekcie / elementy modelu

---

- ▶ anelastyczny rdzeń dynamiczny  
rozwiązań z EULAGa zaimplementowane na nowo w C++
- ▶ mechanizm obliczeń równoległych (wątki + MPI)  
OpenMP/Boost.Thread + Boost.MPI

# Wybrane zadania w projekcie / elementy modelu

---

- ▶ anelastyczny rdzeń dynamiczny  
rozwiązań z EULAGa zaimplementowane na nowo w C++
- ▶ mechanizm obliczeń równoległych (wątki + MPI)  
OpenMP/Boost.Thread + Boost.MPI
- ▶ reprezentacja dynamiki podskalowej  
klasyczne rozwiązania LES + iLES

# Wybrane zadania w projekcie / elementy modelu

---

- ▶ anelastyczny rdzeń dynamiczny  
rozwiązań z EULAGa zaimplementowane na nowo w C++
- ▶ mechanizm obliczeń równoległych (wątki + MPI)  
OpenMP/Boost.Thread + Boost.MPI
- ▶ reprezentacja dynamiki podskalowej  
klasyczne rozwiązania LES + iLES
- ▶ reprezentacja Lagranżowska mikrofizyki chmur  
z możliwością wyboru CPU/GPU (na bazie Thrust)

## Wybrane zadania w projekcie / elementy modelu

---

- ▶ anelastyczny rdzeń dynamiczny  
rozwiązań z EULAGa zaimplementowane na nowo w C++
- ▶ mechanizm obliczeń równoległych (wątki + MPI)  
OpenMP/Boost.Thread + Boost.MPI
- ▶ reprezentacja dynamiki podskalowej  
klasyczne rozwiązania LES + iLES
- ▶ reprezentacja Lagranżowska mikrofizyki chmur  
z możliwością wyboru CPU/GPU (na bazie Thrust)
- ▶ testy modelu dla standardowych ustawień LES  
RICO, POST, BOMEX, DYCOMS, ...



## Wybrane zadania w projekcie / elementy modelu

---

- ▶ anelastyczny rdzeń dynamiczny  
rozwiązań z EULAGa zaimplementowane na nowo w C++
- ▶ mechanizm obliczeń równoległych (wątki + MPI)  
OpenMP/Boost.Thread + Boost.MPI
- ▶ reprezentacja dynamiki podskalowej  
klasyczne rozwiązania LES + iLES
- ▶ reprezentacja Lagranżowska mikrofizyki chmur  
z możliwością wyboru CPU/GPU (na bazie Thrust)
- ▶ testy modelu dla standardowych ustawień LES  
RICO, POST, BOMEX, DYCOMS, ...
- ▶ ...



# Nasz zespół

---

- ▶ prof. Hanna Pawłowska
- ▶ prof. Piotr Smolarkiewicz (ECMWF, Anglia)
- ▶ prof. Wojciech Grabowski (NCAR, Kolorado)
- ▶ mgr Anna Jaruga
- ▶ mgr Sylwester Arabas

- 
- ▶ ? – student/wolny strzelec
  - ▶ ? – doktorant/student
  - ▶ ? – postdoc

# Nasz zespół

---

- ▶ prof. Hanna Pawłowska  
mikrofizyka, koordynacja prac
- ▶ prof. Piotr Smolarkiewicz (ECMWF, Anglia)
- ▶ prof. Wojciech Grabowski (NCAR, Kolorado)
- ▶ mgr Anna Jaruga
- ▶ mgr Sylwester Arabas

- 
- ▶ ? – student/wolny strzelec
  - ▶ ? – doktorant/student
  - ▶ ? – postdoc

# Nasz zespół

---

- ▶ prof. Hanna Pawłowska  
mikrofizyka, koordynacja prac
- ▶ prof. Piotr Smolarkiewicz (ECMWF, Anglia)  
dynamika, turbulencja, numeryka
- ▶ prof. Wojciech Grabowski (NCAR, Kolorado)
- ▶ mgr Anna Jaruga
- ▶ mgr Sylwester Arabas

- 
- ▶ ? – student/wolny strzelec
  - ▶ ? – doktorant/student
  - ▶ ? – postdoc

# Nasz zespół

---

- ▶ prof. Hanna Pawłowska  
mikrofizyka, koordynacja prac
- ▶ prof. Piotr Smolarkiewicz (ECMWF, Anglia)  
dynamika, turbulencja, numeryka
- ▶ prof. Wojciech Grabowski (NCAR, Kolorado)  
mikrofizyka
- ▶ mgr Anna Jaruga
- ▶ mgr Sylwester Arabas

- 
- ▶ ? – student/wolny strzelec
  - ▶ ? – doktorant/student
  - ▶ ? – postdoc

# Nasz zespół

---

- ▶ prof. Hanna Pawłowska  
mikrofizyka, koordynacja prac
- ▶ prof. Piotr Smolarkiewicz (ECMWF, Anglia)  
dynamika, turbulencja, numeryka
- ▶ prof. Wojciech Grabowski (NCAR, Kolorado)  
mikrofizyka
- ▶ mgr Anna Jaruga  
mikrofizyka, chemia, dynamika, programowanie
- ▶ mgr Sylwester Arabas

- 
- ▶ ? – student/wolny strzelec
  - ▶ ? – doktorant/student
  - ▶ ? – postdoc

# Nasz zespół

---

- ▶ prof. Hanna Pawłowska  
mikrofizyka, koordynacja prac
  - ▶ prof. Piotr Smolarkiewicz (ECMWF, Anglia)  
dynamika, turbulencja, numeryka
  - ▶ prof. Wojciech Grabowski (NCAR, Kolorado)  
mikrofizyka
  - ▶ mgr Anna Jaruga  
mikrofizyka, chemia, dynamika, programowanie
  - ▶ mgr Sylwester Arabas  
mikrofizyka, programowanie, architektura kodu
- 

- ▶ ? – student/wolny strzelec
- ▶ ? – doktorant/student
- ▶ ? – postdoc

# Nasz zespół

---

- ▶ prof. Hanna Pawłowska  
mikrofizyka, koordynacja prac
  - ▶ prof. Piotr Smolarkiewicz (ECMWF, Anglia)  
dynamika, turbulencja, numeryka
  - ▶ prof. Wojciech Grabowski (NCAR, Kolorado)  
mikrofizyka
  - ▶ mgr Anna Jaruga  
mikrofizyka, chemia, dynamika, programowanie
  - ▶ mgr Sylwester Arabas  
mikrofizyka, programowanie, architektura kodu
- 

- ▶ ? – student/wolny strzelec  
numeryka, programowanie (w tym równolegle)
- ▶ ? – doktorant/student
- ▶ ? – postdoc

# Nasz zespół

---

- ▶ prof. Hanna Pawłowska  
mikrofizyka, koordynacja prac
  - ▶ prof. Piotr Smolarkiewicz (ECMWF, Anglia)  
dynamika, turbulencja, numeryka
  - ▶ prof. Wojciech Grabowski (NCAR, Kolorado)  
mikrofizyka
  - ▶ mgr Anna Jaruga  
mikrofizyka, chemia, dynamika, programowanie
  - ▶ mgr Sylwester Arabas  
mikrofizyka, programowanie, architektura kodu
- 

- ▶ ? – student/wolny strzelec  
numeryka, programowanie (w tym równolegle)
- ▶ ? – doktorant/student  
fizyka, programowanie
- ▶ ? – postdoc



# Nasz zespół

---

- ▶ prof. Hanna Pawłowska  
mikrofizyka, koordynacja prac
  - ▶ prof. Piotr Smolarkiewicz (ECMWF, Anglia)  
dynamika, turbulencja, numeryka
  - ▶ prof. Wojciech Grabowski (NCAR, Kolorado)  
mikrofizyka
  - ▶ mgr Anna Jaruga  
mikrofizyka, chemia, dynamika, programowanie
  - ▶ mgr Sylwester Arabas  
mikrofizyka, programowanie, architektura kodu
- 

- ▶ ? – student/wolny strzelec  
numeryka, programowanie (w tym równolegle)
- ▶ ? – doktorant/student  
fizyka, programowanie
- ▶ ? – postdoc  
oddziaływanie aerozol-chmury-opad



# Dziękujemy za uwagę!

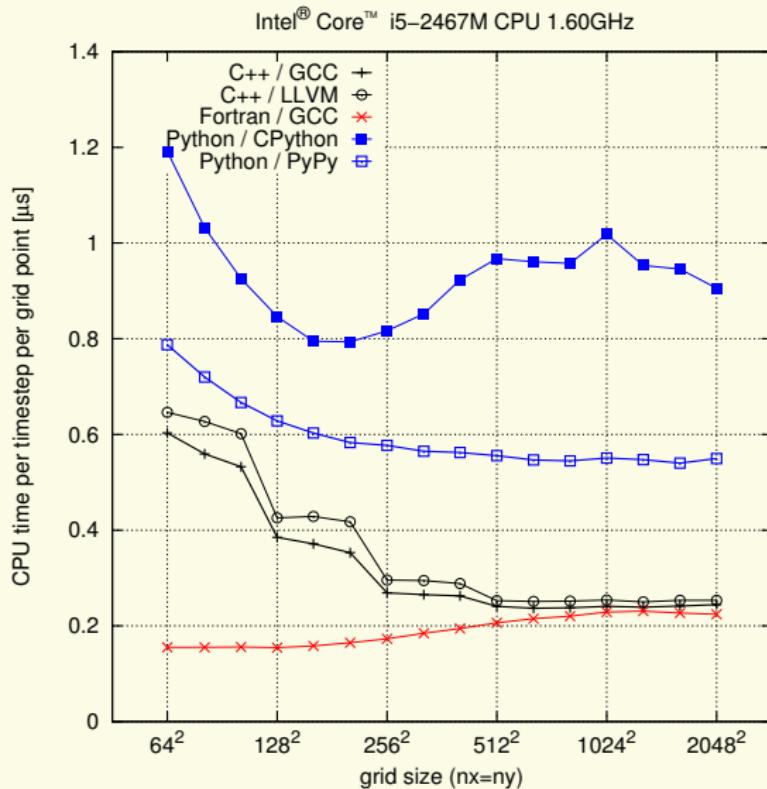
Kontakt:

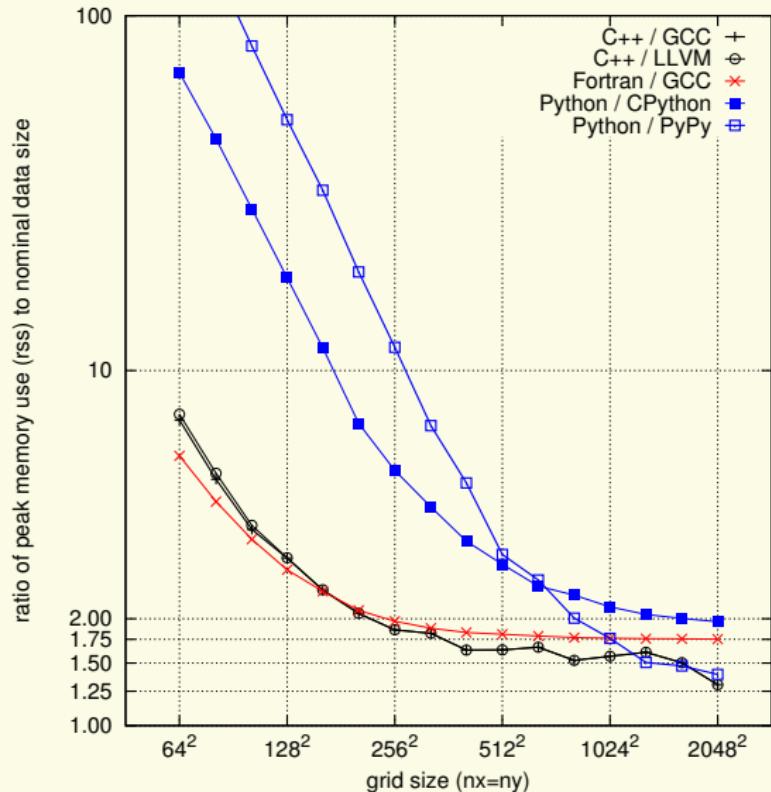
hanna.pawlowska, ajaruga, sarabas  
@igf.fuw.edu.pl

Finansowanie:

- ▶ NCN-PRELUDIUM 2011/01/N/ST10/0183
- ▶ NCN-HARMONIA 2012/06/M/ST10/00434







## parametryzacja $\kappa$ -Köhler

```
/// @brief activity of water in solution
/// (eqs. 1,6) in @copydetails Petters_and_Kreidenweis_2007
template <typename real_t>
quantity<si::dimensionless, real_t> a_w(
    quantity<si::volume, real_t> rw3,
    quantity<si::volume, real_t> rd3,
    quantity<si::dimensionless, real_t> kappa
)
{
    return (rw3 - rd3) / (rw3 - rd3 * (real_t(1) - kappa));
}
```

<http://boost.org/doc/libs/release/libs/units/>



## Zalety podejścia lagranżowskiego

- opis mikrofizyki z punktu widzenia cząstek:



# Zalety podejścia lagranżowskiego

---

- ▶ opis mikrofizyki z punktu widzenia cząstek:
  - ▶ prawa fizyczne aplikowane do cząstek a nie oczek siatki (np. dyfuzja pary w powietrzu wokół kropli)

# Zalety podejścia lagranżowskiego

---

- ▶ opis mikrofizyki z punktu widzenia cząstek:
  - ▶ prawa fizyczne aplikowane do cząstek a nie oczek siatki (np. dyfuzja pary w powietrzu wokół kropli)

# Zalety podejścia lagranżowskiego

---

- ▶ opis mikrofizyki z punktu widzenia cząstek:
  - ▶ prawa fizyczne aplikowane do cząstek a nie oczek siatki (np. dyfuzja pary w powietrzu wokół kropli)
- ▶ łatwość dodawania nowych atrybutów

# Zalety podejścia lagranżowskiego

---

- ▶ opis mikrofizyki z punktu widzenia cząstek:
  - ▶ prawa fizyczne aplikowane do cząstek a nie oczek siatki (np. dyfuzja pary w powietrzu wokół kropli)
- ▶ łatwość dodawania nowych atrybutów
  - ▶ przydatne gdy np. chcemy dodać reakcje chemiczne zachodzące w kropelkach

# Zalety podejścia lagranżowskiego

---

- ▶ opis mikrofizyki z punktu widzenia cząstek:
  - ▶ prawa fizyczne aplikowane do cząstek a nie oczek siatki (np. dyfuzja pary w powietrzu wokół kropli)
- ▶ łatwość dodawania nowych atrybutów
  - ▶ przydatne gdy np. chcemy dodać reakcje chemiczne zachodzące w kropelkach
- ▶ siatka podąża za rozwiązaniem

# Zalety podejścia lagranżowskiego

---

- ▶ opis mikrofizyki z punktu widzenia cząstek:
  - ▶ prawa fizyczne aplikowane do cząstek a nie oczek siatki (np. dyfuzja pary w powietrzu wokół kropli)
- ▶ łatwość dodawania nowych atrybutów
  - ▶ przydatne gdy np. chcemy dodać reakcje chemiczne zachodzące w kropelkach
- ▶ siatka podąża za rozwiązaniem
  - ▶ brak dyfuzji numerycznej

# Zalety podejścia lagranżowskiego

---

- ▶ opis mikrofizyki z punktu widzenia cząstek:
  - ▶ prawa fizyczne aplikowane do cząstek a nie oczek siatki (np. dyfuzja pary w powietrzu wokół kropli)
- ▶ łatwość dodawania nowych atrybutów
  - ▶ przydatne gdy np. chcemy dodać reakcje chemiczne zachodzące w kropelkach
- ▶ siatka podąża za rozwiązaniem
  - ▶ brak dyfuzji numerycznej
  - ▶ dobra rozdzielcość tam gdzie jej potrzebujemy

## definicja makra preprocesora return\_macro() (C++11)

```
#define return_macro(expr) \
-> decltype(safeToReturn(expr)) \
{ return safeToReturn(expr); }
```



# Super-Droplet Method example (Arabas & Shima 2012)

- example application to 3D LES (the "RICO" set-up):

Arabas & Shima 2012, arXiv:1205.3313 (accepted to JAS)

