

O modelowaniu i pomiarach procesu aktywacji jąder kondensacji w chmurach warstwy granicznej atmosfery

Sylwester Arabas, Hanna Pawłowska

Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

współpraca:

Suzanne Crumeyrolle (LaMP, Clermont-Ferrand – partner w EUCAARI),
Laurent Gomes (CNRS/Météo-France, Tuluza – partner w EUCAARI),
Shin-ichiro Shima (JAMSTEC, Jokohama)



22. października 2010, Seminarium Środowiskowe Fizyki Atmosfery,
Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski



EUCAARI

European Integrated Project
on Aerosol Cloud Climate Air Quality Interactions

- 6-ty Program Ramowy UE
- 2007–2010, 10M€
- 48 partnerów z 25 krajów, pod przewodnictwem Uniwersytetu Helsińskiego
- cel: zmniejszyć o połowę niepewność oszacowań wpływu aerozoli na klimat

Plan prezentacji

- 1 Aktywacja CCN a interakcje aerosol-chmura-klimat
- 2 Aktywacja CCN w pomiarach EUCAARI-IMPACT
- 3 Modelowanie aktywacji CCN: model cząstki
- 4 Modelowanie aktywacji CCN: model LES

CCN a interakcje aerozol-chmura-klimat

Aitken (1880-81):

- "when water vapour condenses in the atmosphere, it always does so on some solid nucleus"
- "if there was no dust in the air there would be no fogs, no clouds, no mists, and probably no rain"
- "there is probably also something due to the composition of the dust particles; some kinds of dust seem to form better nuclei than others"

Langmuir (1948):

- at the base of a cloud ... thousands of particles [droplets] per cc
- the small particles ... scatter [light] more completely
- a wide distribution of them [particles, IN] in the atmosphere might perhaps have a profound effect upon the climate

Aitken, J.: On dust, fogs, and clouds, T. Roy. Soc. Edinburgh, 30, 34–64, 1880-81.

Langmuir, I.: The growth of particles in smokes and clouds and the production of snow from super-cooled clouds, P. Am. Philos. Soc., 92, 167–85, 1948.

CCN a interakcje aerosol-chmura-klimat

Squires (1958) – zdolność do wytworzenia opadu:

- "high droplet concentrations and small average and maximum drop sizes are assoc. with ... [clouds] failing to rain"
- "Low droplet concentrations ... assoc. with ... release of warm rain"

Twomey (1977) – albedo:

- "pollution acts to increase the reflectance (albedo) of clouds"

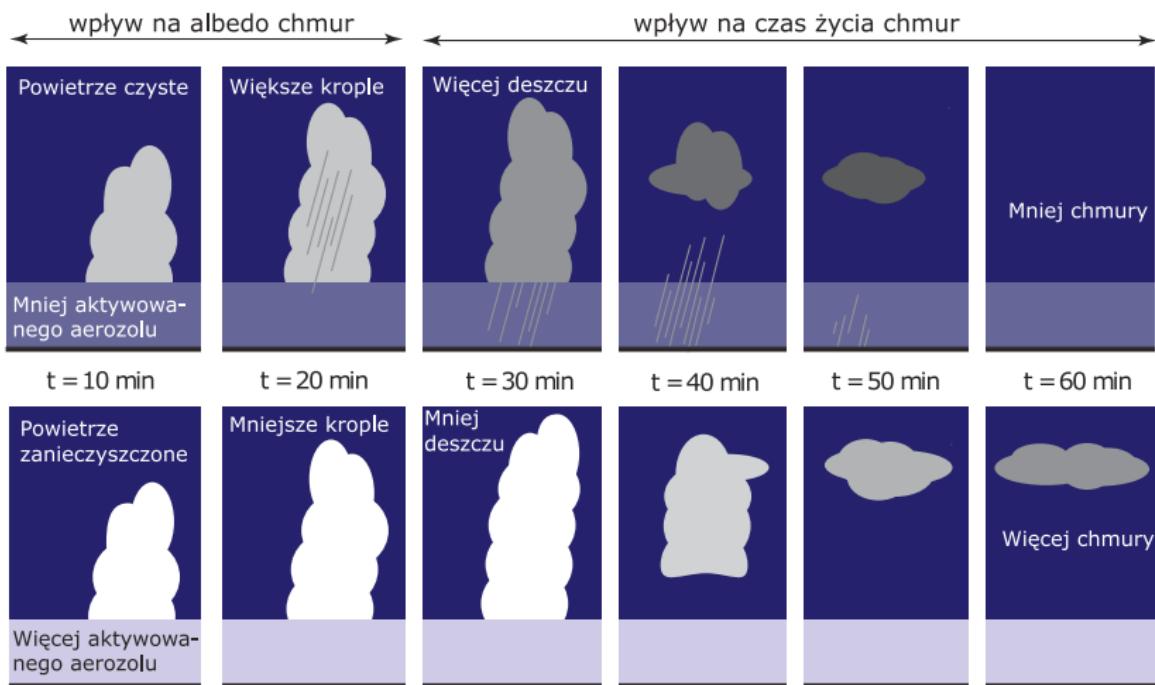
Albrecht (1989) – czas życia chmur:

- "increases in aerosol concentrations over the oceans may increase the amount of low-level cloudiness..."

Albrecht, B.: Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness, *Science*, 245, 1227–1230, 1989.

Squires, P.: The microstructure and colloidal stability of warm clouds. I. The relation between structure and stability, *Tellus*, 10, 256–271, 1958.

Twomey, S.: The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds, *J. Atmos. Sci.*, 34, 1149–1152, 1977.



(ilustracja: Stevens i Feingold, 2009)

Stevens, B. i Feingold, G.: Untangling aerosol effects on clouds and precipitation in a buffered system, Nature, 461, 607–613, 2009.

Plan prezentacji

- 1 Aktywacja CCN a interakcje aerozol-chmura-klimat
- 2 Aktywacja CCN w pomiarach EUCAARI-IMPACT
- 3 Modelowanie aktywacji CCN: model cząstki
- 4 Modelowanie aktywacji CCN: model LES

EUCAARI Intensite Measurement Period At Cabauw Tower (IMPACT)



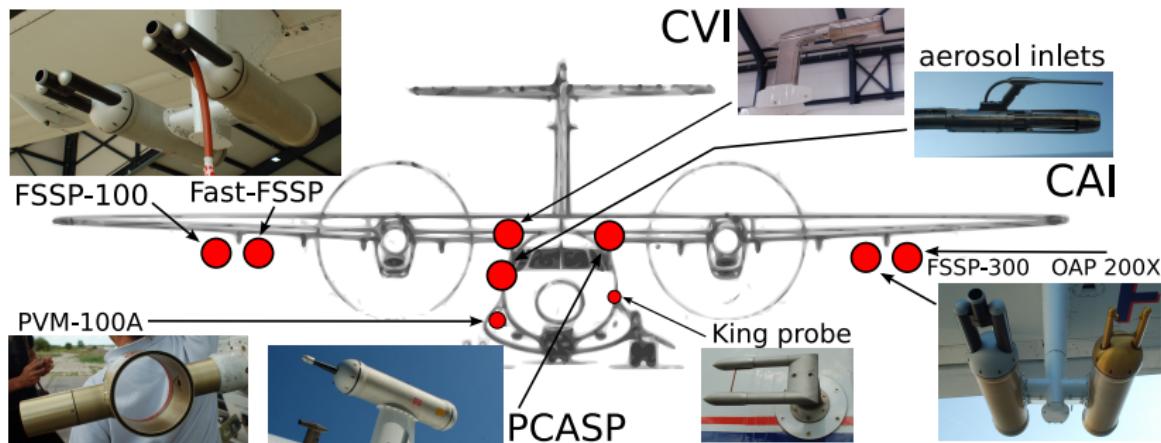
- 30 dni, maj 2008, Holandia
- naziemna teledetekcja i obserwacje in-situ na 200-metrowej wieży
- dwa samoloty, platforma podwieszana pod helikopterem, 50 lotów badawczych
- >20 instytutów europejskich w tym:

Królewski Holenderski Instytut Meteorologiczny (KNMI); Météo France; Leibniz Institute for Tropospheric Research w Lipsku; Uniwersytety z Berlina, Bonn, Clermont-Ferrand, Delft, Heidelbergu, Helsinek, Kolonii, Manchesteru, Utrechtu, Warszawy, Wageningen; Research Centre Jülich; Leosphere; Institute of Atmospheric Sciences and Climate in Bologna; TNO; Energy Research Center of the Netherlands; Dutch National Institute for Public Health and Environment

- więcej informacji: <http://knmi.nl/eucaari>



SAFIRE¹ ATR-42: pomiary chmur/aerozolu



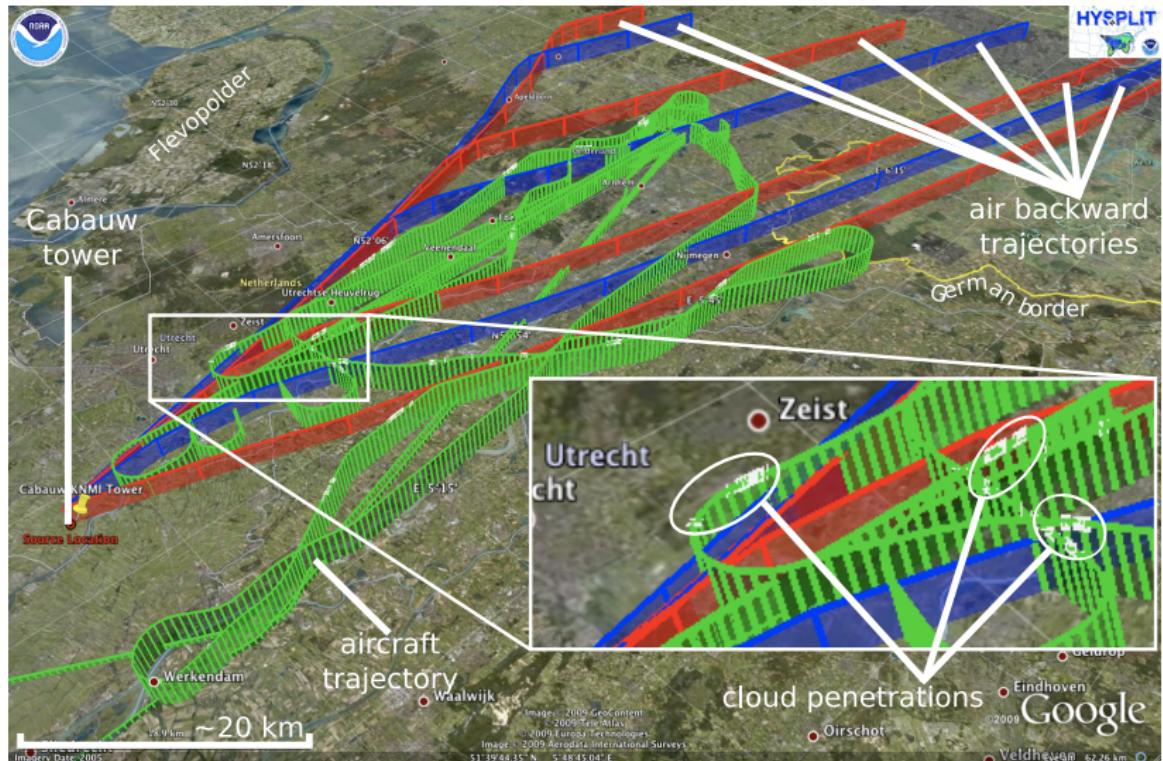
¹ Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement (www.safire.fr)

Przykład: mikrofizyka Sc nad Morzem Północnym i Cu nad Holandią

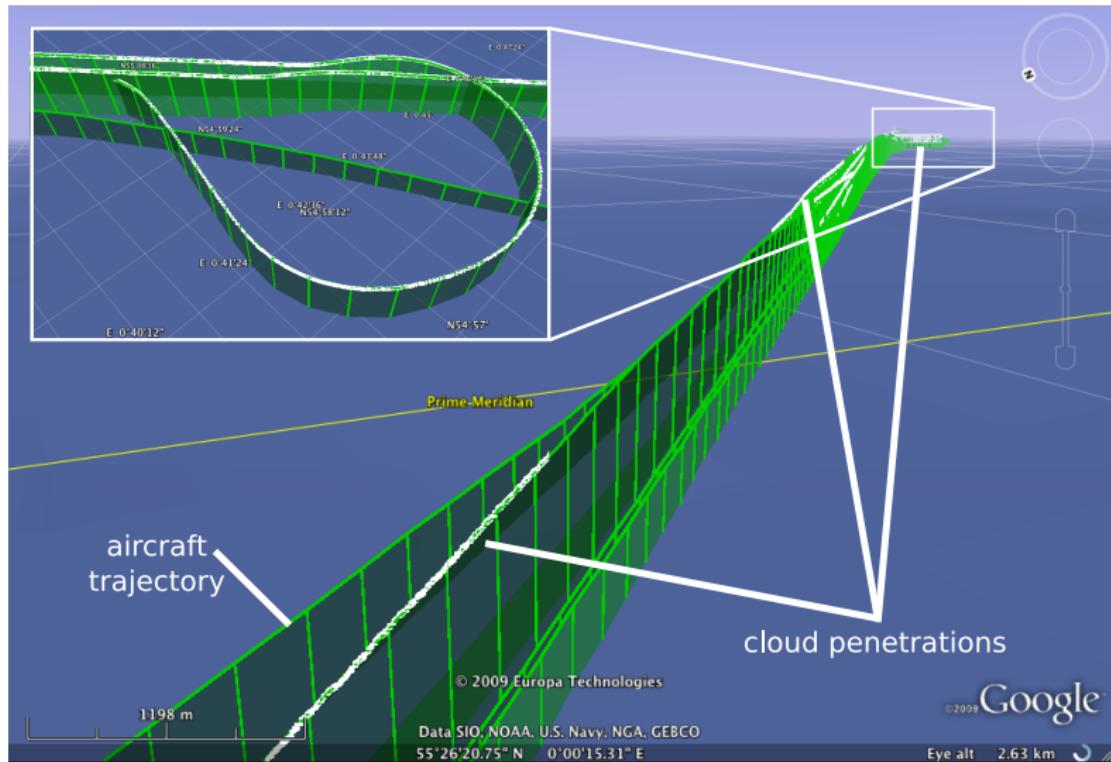
- lot RF49, 13. maja 2008:
 - lot nad Holandią (okolice Cabauw),
 - zanieczyszczone powietrze kontynentalne,
 - w sumie ~ 5 minut lotu wewnątrz chmur Cu
- lot RF51, 15. maja 2008:
 - lot z Holandii do Szkocji nad Morzem Północnym,
 - względnie czyste powietrze morskie,
 - w sumie ~ 50 minut lotu w warstwie Sc



RF49 (13.V 2008) Cu nad Holandią



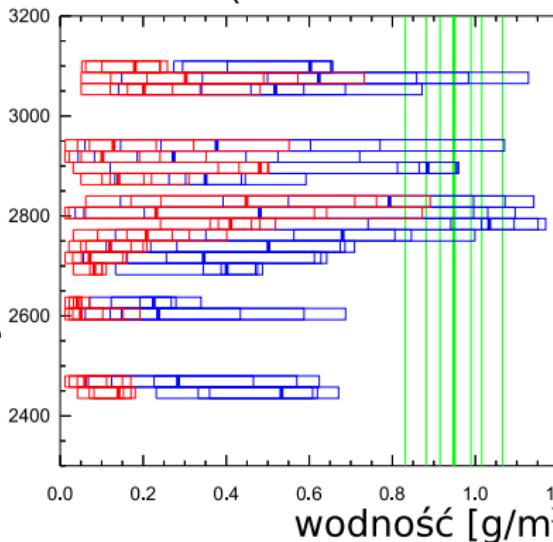
RF51 (15.V 2008) Sc nad Morzem Północnym



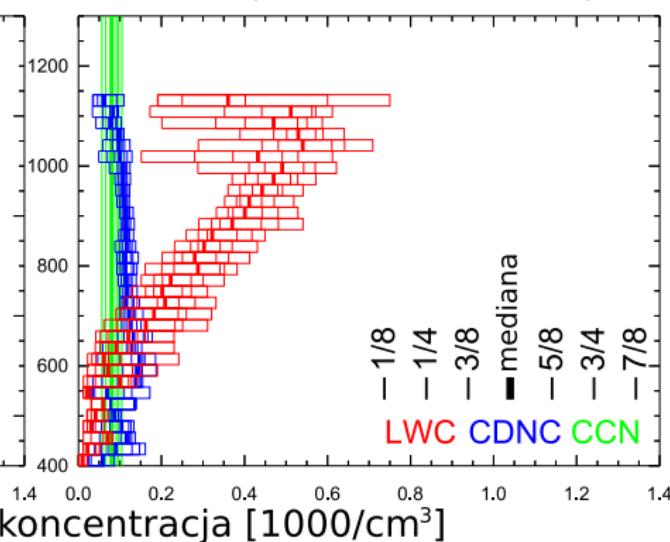
Koncentracja kropelek i CCN, wodność²

RF49 (FSSP-100 / CCNC)

wysokość [m]



RF51 (FSSP-100 / CCNC)



- CCNC zliczał jądra kondensacji aktywowane przy przesyceniu 0.21%
- FSSP-100 klasyfikował kropleki o promieniach $1\text{--}25\mu\text{m}$ pomiędzy 15 klas wielkości

²dane: CNRS/Météo-France, Tuluza

SAFIRE ATR-42: wewn. pomiary aerozolu



spektrometr mas aerozolu, licznik CCN, liczniki CN, dwie pary spektrometrów optycznych i klasyfikatorów elektrostatycznych (jedna para połączona poprzez piec z temp. 280°C), nefelometr...

Plan prezentacji

- 1 Aktywacja CCN a interakcje aerozol-chmura-klimat
- 2 Aktywacja CCN w pomiarach EUCAARI-IMPACT
- 3 Modelowanie aktywacji CCN: model cząstki
- 4 Modelowanie aktywacji CCN: model LES

Aktywacja w modelu cząstki powietrza

- unoszona do góry adiabatyczna cząstka powietrza ochładzana w wyniku rozprężania osiąga stan nasycenia
- zawarta w niej para wodna kondensuje na cząstkach aerozolu (kropelkach) wydzielając ciepło utajone
- kropelki o różnych rozmiarach i składzie chemicznym współzawodniczą o dostępną parę wodną
- krzywizna powierzchni kropelek, ich temperatura i skład chemiczny wpływają na wydajność kondensacji



Elementy opisu matematycznego

- równanie różniczkowe zwyczajne na ewolucję temperatury cząstki (adiabatyczny bilans ciepła, równanie stanu, równowaga hydrstatyczna):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C} \left(-gw - L \frac{dq}{dt} \right)$$

oznaczenia:

T: temperatura

t: czas

C: ciepło właściwe

g: przysp. ziemskie

w: prędkość pionowa

L: ciepło utajone

q: wilgotność właściwa

- równanie różniczkowo-całkowe na dq/dt :

$$\frac{dq}{dt} \sim \frac{d}{dt} \int r^3 n dr$$

- 1-wymiarowe (ściśliwe) równanie adwekcji na zachowanie $n(r, t)$:

$$\frac{dn}{dt} = -n \frac{\partial}{\partial r} \frac{dr}{dt}$$

- tempo wzrostu kropli: dyfuzja pary i ciepła, prawa Raouulta i Kelvina-Gibbsa, ...

$$\frac{dr}{dt} \sim \frac{D(r)}{r} (\rho|_\infty - \rho|_{\text{powierzchnia kropelki}})$$



Elementy opisu matematycznego

- równanie różniczkowe zwyczajne na ewolucję temperatury cząstki (adiabatyczny bilans ciepła, równanie stanu, równowaga hydrstatyczna):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C} \left(-g_w - L \frac{dq}{dt} \right)$$

- równanie różniczkowo-całkowe na dq/dt :

$$\frac{dq}{dt} \sim \frac{d}{dt} \int r^3 n dr$$

- 1-wymiarowe (ściśliwe) równanie adwekcji na zachowanie $n(r, t)$:

$$\frac{dn}{dt} = -n \frac{\partial}{\partial r} \frac{dr}{dt}$$

- tempo wzrostu kropli: dyfuzja pary i ciepła, prawa Raouulta i Kelvina-Gibbsa, ...

$$\frac{dr}{dt} \sim \frac{D(r)}{r} (\rho|_\infty - \rho|_{\text{powierzchnia kropelki}})$$

oznaczenia:

T: temperatura

t: czas

C: ciepło właściwe

g: przysp. ziemskie

w: prędkość pionowa

L: ciepło utajone

q: wilgotność właściwa

r: promień kropelki

n: gęstość koncentracji



Elementy opisu matematycznego

- równanie różniczkowe zwyczajne na ewolucję temperatury cząstki (adiabatyczny bilans ciepła, równanie stanu, równowaga hydrstatyczna):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C} \left(-g_w - L \frac{dq}{dt} \right)$$

- równanie różniczkowo-całkowe na dq/dt :

$$\frac{dq}{dt} \sim \frac{d}{dt} \int r^3 n dr$$

- 1-wymiarowe (ściśliwe) równanie adwekcji na zachowanie $n(r, t)$:

$$\frac{dn}{dt} = -n \frac{\partial}{\partial r} \frac{dr}{dt}$$

- tempo wzrostu kropli: dyfuzja pary i ciepła, prawa Raoulta i Kelvina-Gibbsa, ...

$$\frac{dr}{dt} \sim \frac{D(r)}{r} (\rho|_\infty - \rho|_{\text{powierzchnia kropelki}})$$

oznaczenia:

T: temperatura

t: czas

C: ciepło właściwe

g: przysp. ziemskie

w: prędkość pionowa

L: ciepło utajone

q: wilgotność właściwa

r: promień kropelki

n: gęstość koncentracji



Elementy opisu matematycznego

- równanie różniczkowe zwyczajne na ewolucję temperatury cząstki (adiabatyczny bilans ciepła, równanie stanu, równowaga hydrstatyczna):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C} \left(-g_w - L \frac{dq}{dt} \right)$$

- równanie różniczkowo-całkowe na dq/dt :

$$\frac{dq}{dt} \sim \frac{d}{dt} \int r^3 n dr$$

- 1-wymiarowe (ściśliwe) równanie adwekcji na zachowanie $n(r, t)$:

$$\frac{dn}{dt} = -n \frac{\partial}{\partial r} \frac{dr}{dt}$$

- tempo wzrostu kropli: dyfuzja pary i ciepła, prawa Raouulta i Kelvina-Gibbsa, ...

$$\frac{dr}{dt} \sim \frac{D(r)}{r} (\rho|_\infty - \rho|_{\text{powierzchnia kropelki}})$$

oznaczenia:

T: temperatura

t: czas

C: ciepło właściwe

g: przysp. ziemskie

w: prędkość pionowa

L: ciepło utajone

q: wilgotność właściwa

r: promień kropelki

n: gęstość koncentracji

D: wsp. dyfuzji pary

p: gęstość pary

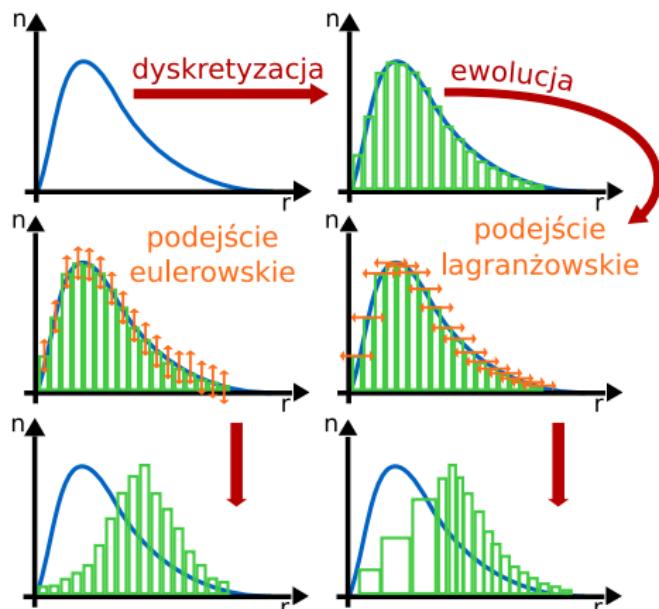


Rozw. numeryczne: podejście lagranżowskie

- ewolucja widma rozmiarów kropelek w podejściu lagranżowskim (method of lines, moving-sectional technique):

- przybliżenie n funkcją stałą przedziałami (słupki histogramu)
- położenie i szerokość słupków zmienne w czasie
- równanie cząstkowe (adwekcji)
~~ układ równań zwyczajnych
- brak dyfuzji numerycznej
- łatwość uwzględnienia różnorodnego składu chemicznego

- wprowadzone: Howell (1949)
- wyzwanie dla pierwszych komputerów:
 - szwedzki BESK: (Mordy, 1959)
 - amerykański SWAC:
(Neiburger i Chien, 1960)



Howell, W.: The growth of cloud drops in uniformly cooled air, J. Meteor., 6, 134–149, 1949.

Mordy, W.: Computations of the growth by condensation of a population of cloud droplets, Tellus, 11, 1959.

Neiburger, M. i Chien, C.: Computations of the growth of cloud drops by condensation using an electronic digital computer, in: Physics of Precipitation, edited by Weickmann, H., pp. 191–210, AGU, 1960.

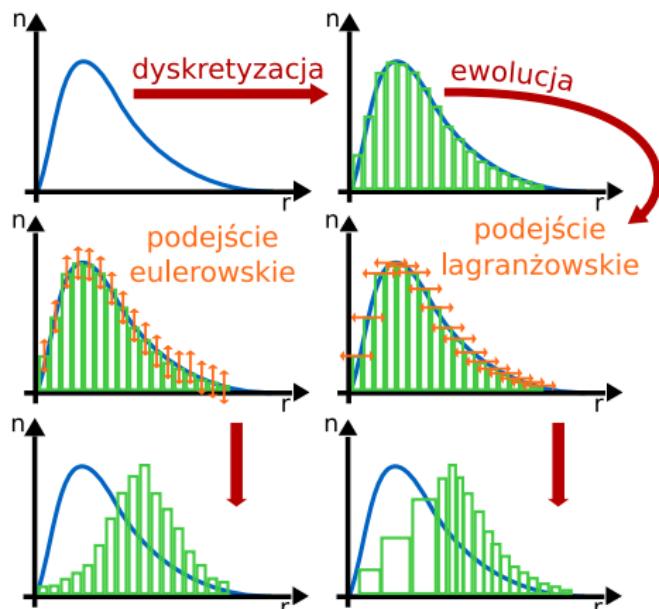


Rozw. numeryczne: podejście lagranżowskie

- ewolucja widma rozmiarów kropelek w podejściu lagranżowskim (method of lines, moving-sectional technique):

- przybliżenie n funkcją stałą przedziałami (słupki histogramu)
- położenie i szerokość słupków zmienne w czasie
- równanie cząstkowe (adwekcji)
~~ układ równań zwyczajnych
- brak dyfuzji numerycznej
- łatwość uwzględnienia różnorodnego składu chemicznego

- wprowadzone: Howell (1949)
- wyzwanie dla pierwszych komputerów:
 - szwedzki BESK: (Mordy, 1959)
 - amerykański SWAC:
(Neiburger i Chien, 1960)



Howell, W.: The growth of cloud drops in uniformly cooled air, J. Meteor., 6, 134–149, 1949.

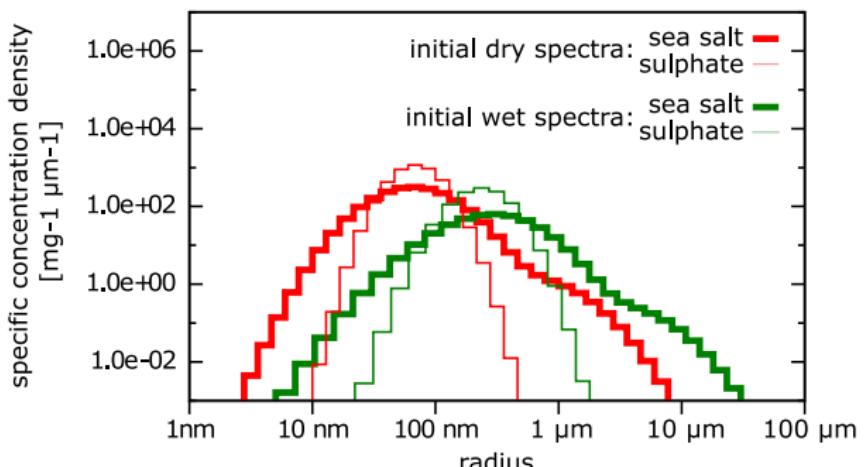
Mordy, W.: Computations of the growth by condensation of a population of cloud droplets, Tellus, 11, 1959.

Neiburger, M. i Chien, C.: Computations of the growth of cloud drops by condensation using an electronic digital computer, in: Physics of Precipitation, edited by Weickmann, H., pp. 191–210, AGU, 1960.



Przykład: sól morska/siarczany, warunek pocz.

parametry symulacji zaczerpnięte z (Ghan i in., 1998)



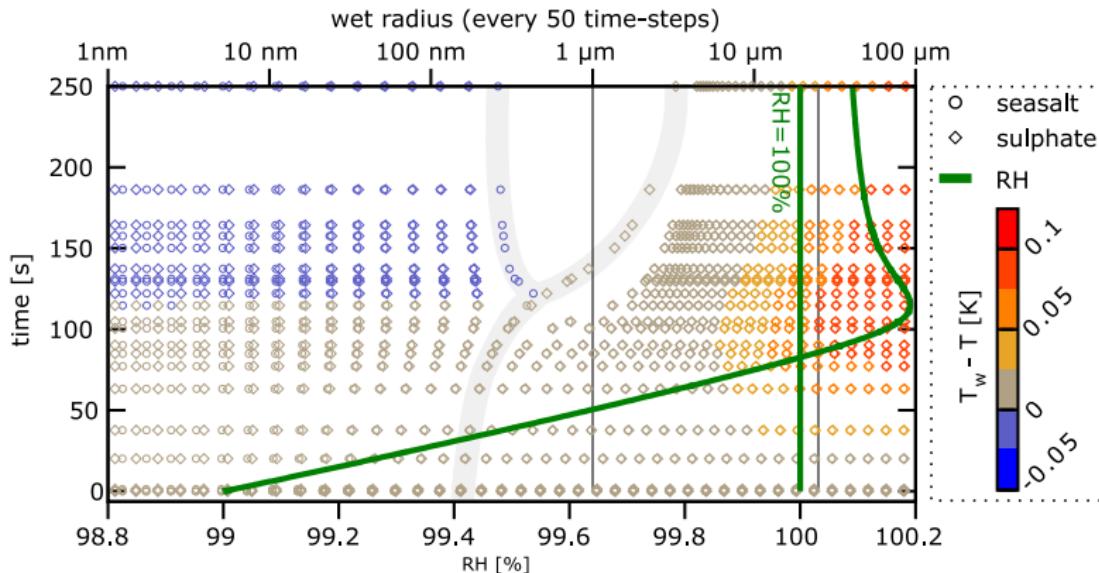
mode	solute	N_m [cm^{-3}]	r_m [μm]	σ_m [1]
film drop	NaCl	51.1	0.10	1.90
jet drop	NaCl	2.21	1.00	2.00
spume drop	NaCl	0.00001	6.00	3.00
accumulation	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	100	0.08	1.45

- 280K, 1000 hPa,
RH=99%
- kropelki w równowadze
- siarczan: jeden mod
lognormalny, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
- sól: trzy mody
lognormalne, NaCl
- 45 słupków rozłożonych
liniowo w logarytmie
promienia

Ghan, S., Guzman, G., i Abdul-Razzak, H.: Competition between sea salt and sulfate particles as cloud condensation nuclei, J. Atmos. Sci., 55, 3340–3347, 1998.



Przykład: sól morska/siarczany, wyniki



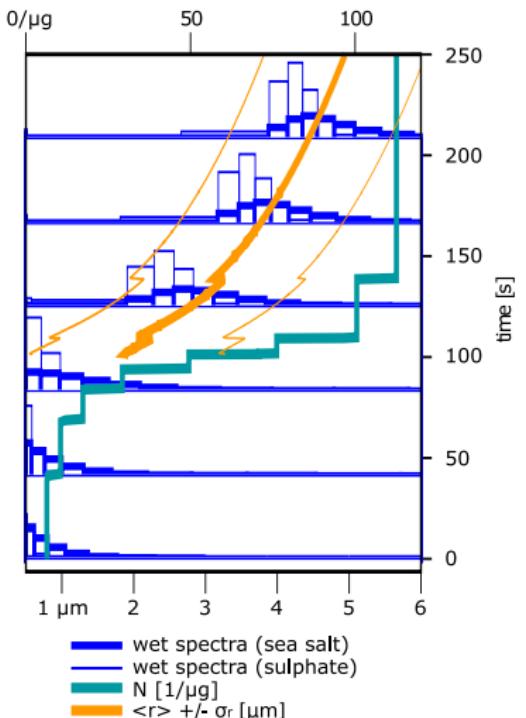
- wyniki obliczeń modelem „drops” (Arabas i Pawłowska, 2010)
- zmienny krok czasowy (algorytm CVODE, Cohen i Hindmarsh, 1996)

Arabas, S. i Pawłowska, H.: Adaptive method of lines for multi-component aerosol condensational growth and cloud droplet activation, Geosci. Model. Dev., (submitted), 2010.

Cohen, S. i Hindmarsh, A.: CVODE, A stiff/nonstiff ODE solver in C, Comput. Phys., 10, 138–143, 1996.

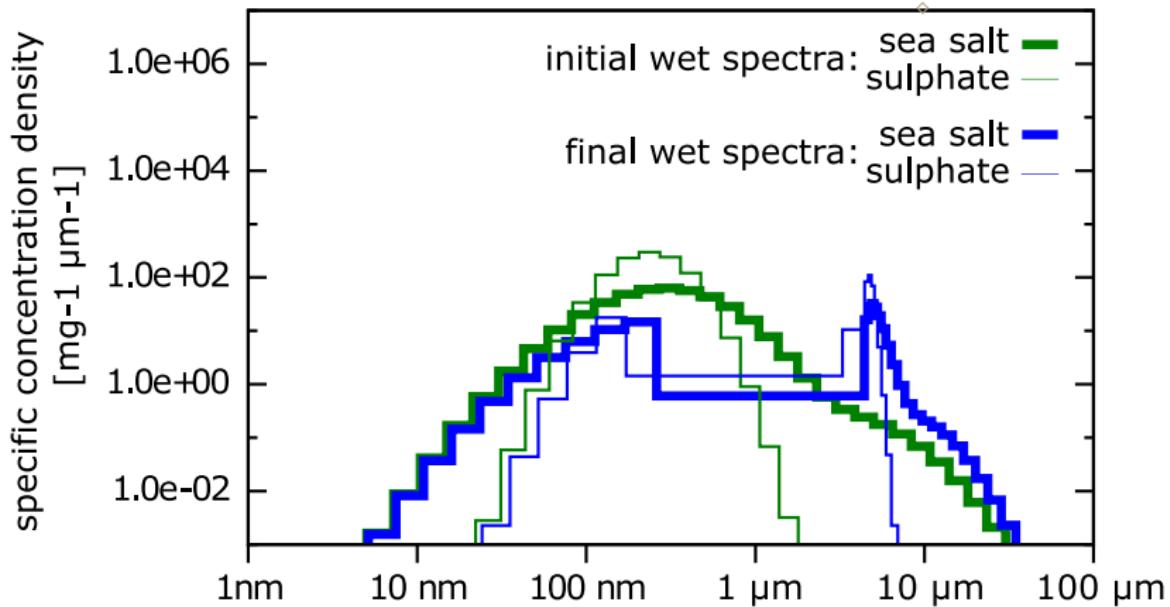


Przykład: sól morska/siarczany, wyniki



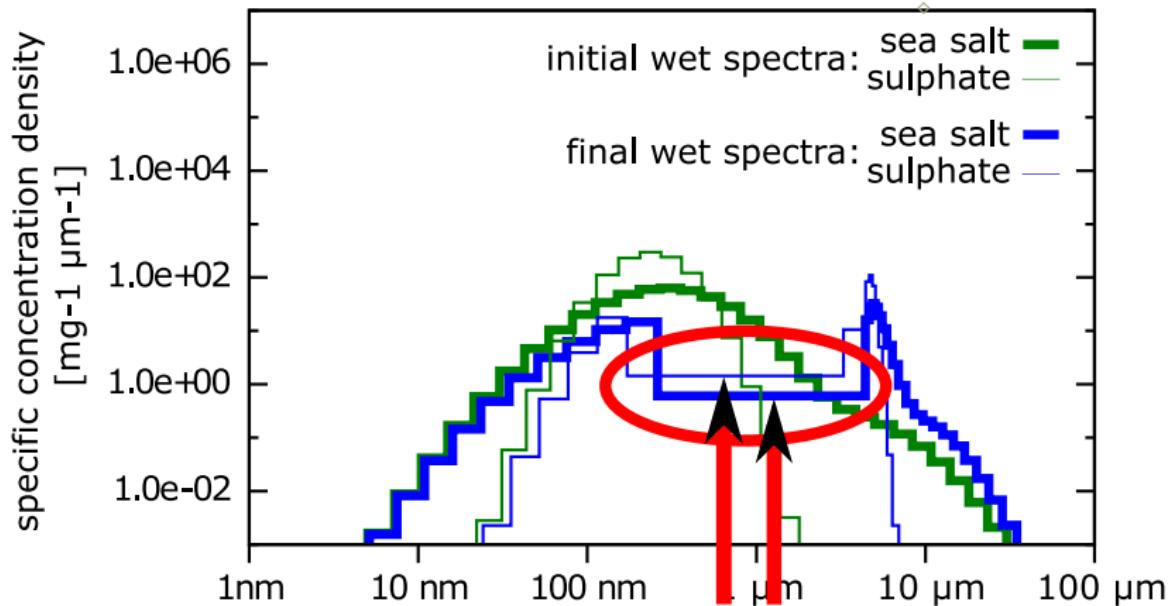
- rozmiary i koncentracja kropelek o promieniach w zakresie $1-25\mu\text{m}$
- koncentracja kropelet (linia turkusowa) wzrasta do 140 s (35 m), następnie stała
- średni promień wzrasta z wysokością (grubsza pomarańczowa linia)
- odchylenie standardowe względnie stałe (ciemna pomarańczowa linia: $\pm\sigma_r$)
- kropelki roztworu siarczanu dominują wśród najmniejszych kropelek (histogramy z cienkich niebieskich linii)
- największe kropelki powstały na soli (histogramy z grubszego niebieskiego linii)

Przykład: sól morska/siarczany, wyniki



bimodalne widmo: mody aerozolu nieaktywowanego
i aktywowanego (kropelek)

Przykład: sól morska/siarczany, wyniki



pojedynczy słupek obejmujący blisko dwa
"najważniejsze" rzędy wielkości promieni

Podejście lagranżowskie a aktywacja CCN

Takeda i Kuba (1982):

- "It is desirable that the number concentration of nuclei included in **one class**, specially near the smaller limit of activated nuclei, is very small in comparison with total number concentration of cloud droplets. Otherwise it would have a **large influence** on total number concentration of droplets ... "

Kreidenweis i in. (2003):

- "The grids ... play a role in determining the number concentration ..."
- "[if critical radius] ... falls just inside or just outside one of the bins, **a difference of 30 or more droplets cm⁻³** can be computed..."

Korhonen i in. (2005):

- "...special attention must be paid to the **critical sections(s)**, i.e. size section(s) into which a minimum activation diameter falls."
- "...doubling the particle size resolution improved the results significantly... "

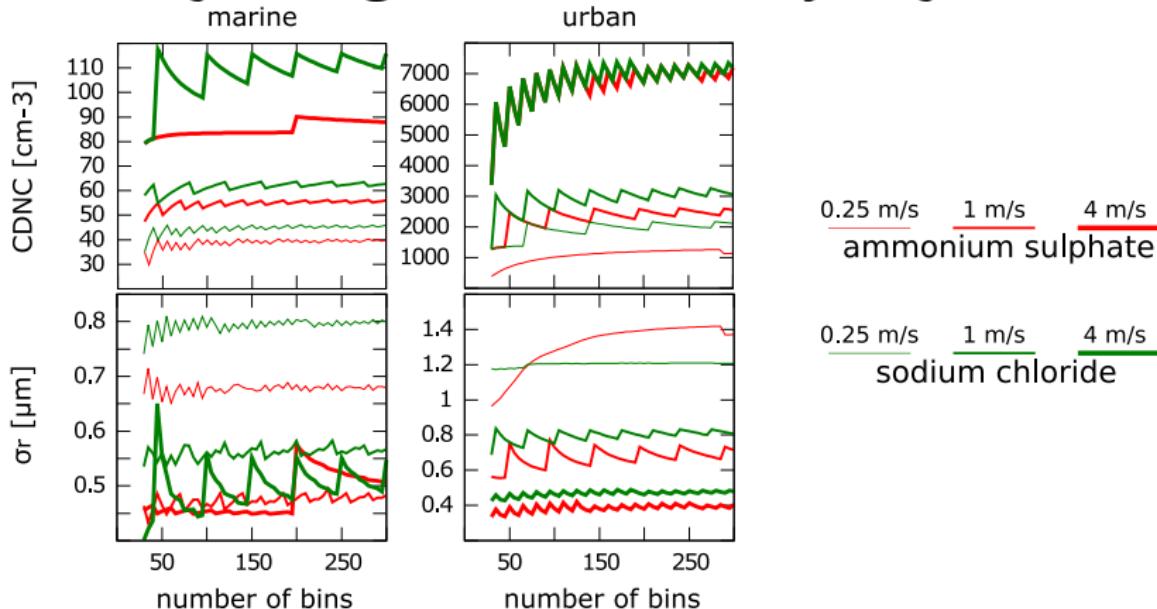
Korhonen, H., Kerminen, V.-M., Lehtinen, K., i Kulmala, M.: CCN activation and cloud processing in sectional aerosol models with low size resolution, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 2561–2570, 2005.

Kreidenweis, S., Walcek, C., Feingold, G., Gong, W., Jacobson, M., Kim, C.-H., Liu, X., Penner, J., Nenes, A., i Seinfeld, J.: Modification of aerosol mass and size distribution due to aqueous phase SO₂ oxidation in clouds: comparisons of several models, *J. Geophys. Res.*, 108, 4213, 2003.

Takeda, T. i Kuba, N.: Numerical study of the effect of CCN on the size distribution of cloud droplets. Part I. Cloud droplets in the stage of condensation growth, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 60, 978–993, 1982.



Podejście lagranżowskie a aktywacja CCN



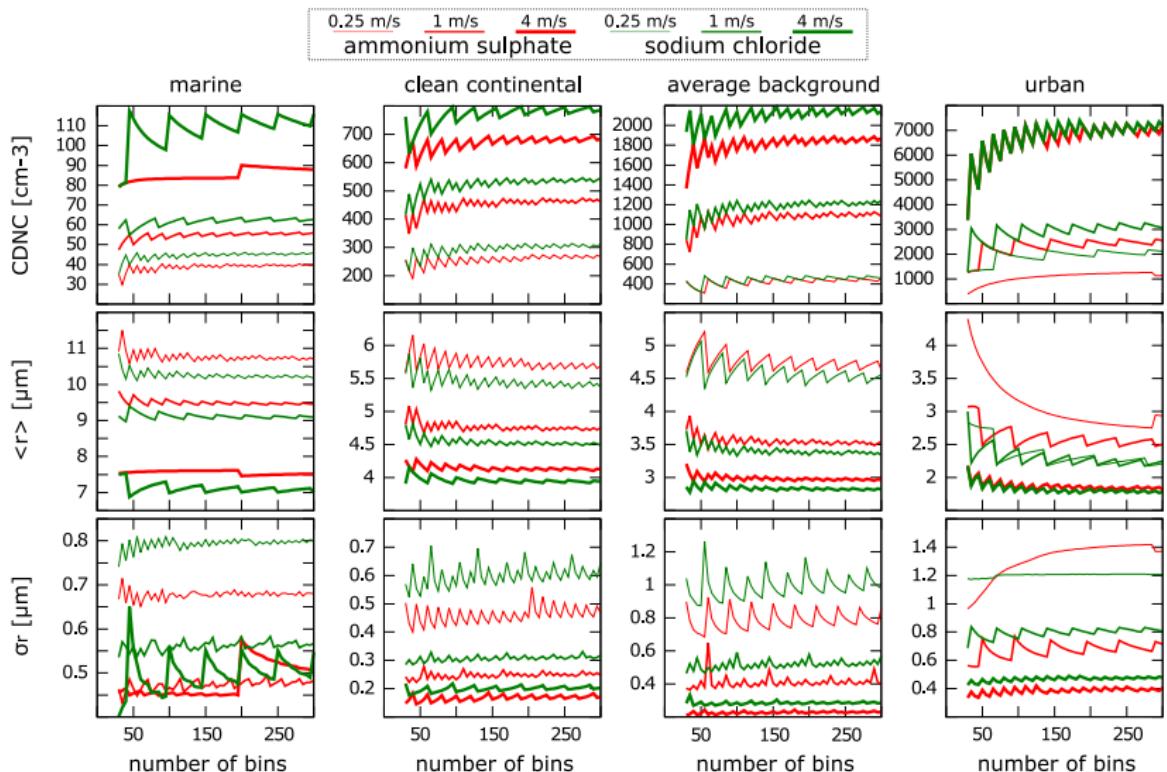
- wyniki obliczeń modelem „drops” (Arabas i Pawłowska, 2010)
- widma „suchego” aerosolu zaczerpnięte z (Whitby, 1978)

Arabas, S. i Pawłowska, H.: Adaptive method of lines for multi-component aerosol condensational growth and cloud droplet activation, Geosci. Model. Dev., (submitted), 2010.

Whitby, K.: The physical characteristics of sulfur aerosols, Atmos. Environ., 12, 135–159, 1978.



Podejście lagranżowskie a aktywacja CCN



Podejście lagranżowskie a aktywacja CCN

Arabas i Pawlowska (2010):

- adaptacyjne rozpinanie siatki obliczeniowej (i adaptacyjny dobór kroku czasowego)
- identyfikacja „krytycznych” słupków i ich podział na kilka mniejszych w trakcie całkowania
- możliwość zadania żądanej dokładności wyniku (wyrażonej poprzez koncentrację kropelek w krytycznym słupku)
- wyeliminowanie czułości modelu na parametry siatki obliczeniowej
- recenzje :-)
 - „Arabas and Pawlowska contribute significantly to a long-standing problem in cloud physics.” (J. Snider)
 - „This is a nicely written and thorough paper...” (H. Korhonen)

Arabas, S. i Pawlowska, H.: Adaptive method of lines for multi-component aerosol condensational growth and cloud droplet activation, Geosci. Model. Dev., (submitted), 2010.



Podejście lagranżowskie a aktywacja CCN

Arabas i Pawlowska (2010):

- adaptacyjne rozpinanie siatki obliczeniowej (i adaptacyjny dobór kroku czasowego)
- identyfikacja „krytycznych” słupków i ich podział na kilka mniejszych w trakcie całkowania
- możliwość zadania żądanej dokładności wyniku (wyrażonej poprzez koncentrację kropelek w krytycznym słupku)
- wyeliminowanie czułości modelu na parametry siatki obliczeniowej
- recenzje :-)
 - „Arabas and Pawlowska contribute significantly to a long-standing problem in cloud physics.” (J. Snider)
 - „This is a nicely written and thorough paper...” (H. Korhonen)

Arabas, S. i Pawlowska, H.: Adaptive method of lines for multi-component aerosol condensational growth and cloud droplet activation, Geosci. Model. Dev., (submitted), 2010.



Podejście lagranżowskie a aktywacja CCN

Arabas i Pawlowska (2010):

- adaptacyjne rozpinanie siatki obliczeniowej (i adaptacyjny dobór kroku czasowego)
- identyfikacja „krytycznych” słupków i ich podział na kilka mniejszych w trakcie całkowania
- możliwość zadania żądanej dokładności wyniku (wyrażonej poprzez koncentrację kropelek w krytycznym słupku)
- wyeliminowanie czułości modelu na parametry siatki obliczeniowej
- recenzje :-)
 - „Arabas and Pawlowska contribute significantly to a long-standing problem in cloud physics.” (J. Snider)
 - „This is a nicely written and thorough paper...” (H. Korhonen)

Arabas, S. i Pawlowska, H.: Adaptive method of lines for multi-component aerosol condensational growth and cloud droplet activation, Geosci. Model. Dev., (submitted), 2010.



Podejście lagranżowskie a aktywacja CCN

Arabas i Pawlowska (2010):

- adaptacyjne rozpinanie siatki obliczeniowej (i adaptacyjny dobór kroku czasowego)
- identyfikacja „krytycznych” słupków i ich podział na kilka mniejszych w trakcie całkowania
- możliwość zadania żądanej dokładności wyniku (wyrażonej poprzez koncentrację kropelek w krytycznym słupku)
- wyeliminowanie czułości modelu na parametry siatki obliczeniowej
- recenzje :-)
 - „Arabas and Pawlowska contribute significantly to a long-standing problem in cloud physics.” (J. Snider)
 - „This is a nicely written and thorough paper...” (H. Korhonen)

Arabas, S. i Pawlowska, H.: Adaptive method of lines for multi-component aerosol condensational growth and cloud droplet activation, Geosci. Model. Dev., (submitted), 2010.



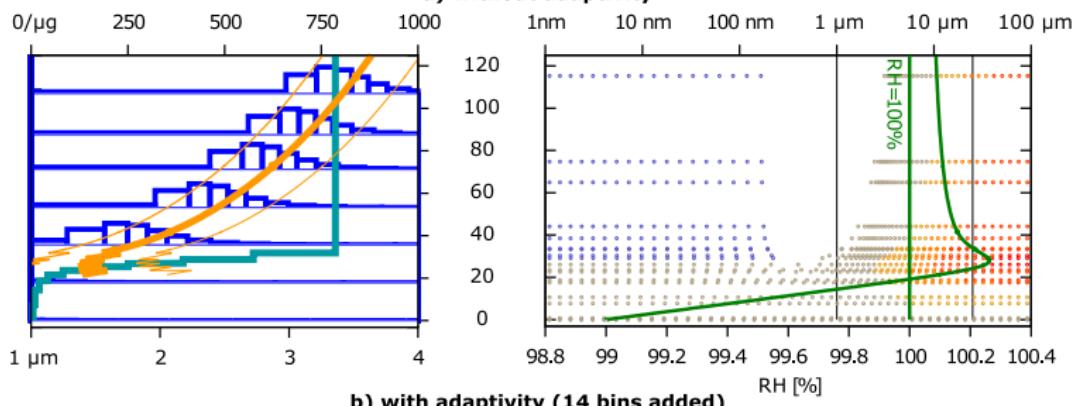
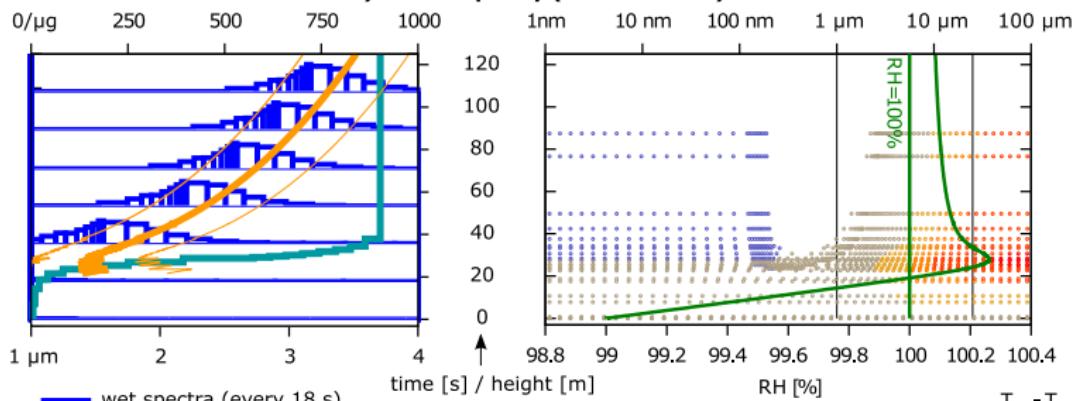
Podejście lagranżowskie a aktywacja CCN

Arabas i Pawlowska (2010):

- adaptacyjne rozpinanie siatki obliczeniowej (i adaptacyjny dobór kroku czasowego)
- identyfikacja „krytycznych” słupków i ich podział na kilka mniejszych w trakcie całkowania
- możliwość zadania żądanej dokładności wyniku (wyrażonej poprzez koncentrację kropelek w krytycznym słupku)
- wyeliminowanie czułości modelu na parametry siatki obliczeniowej
- recenzje :-)
 - „Arabas and Pawlowska contribute significantly to a long-standing problem in cloud physics.” (J. Snider)
 - „This is a nicely written and thorough paper...” (H. Korhonen)

Arabas, S. i Pawlowska, H.: Adaptive method of lines for multi-component aerosol condensational growth and cloud droplet activation, Geosci. Model. Dev., (submitted), 2010.



a) without adaptivity**b) with adaptivity (14 bins added)**

— wet spectra (every 18 s)

— N [1/μg]

— $\langle r \rangle \pm \sigma_r [\mu\text{m}]$ (for $N > 50/\mu\text{g}$)

○ wet radii (every 50 steps)

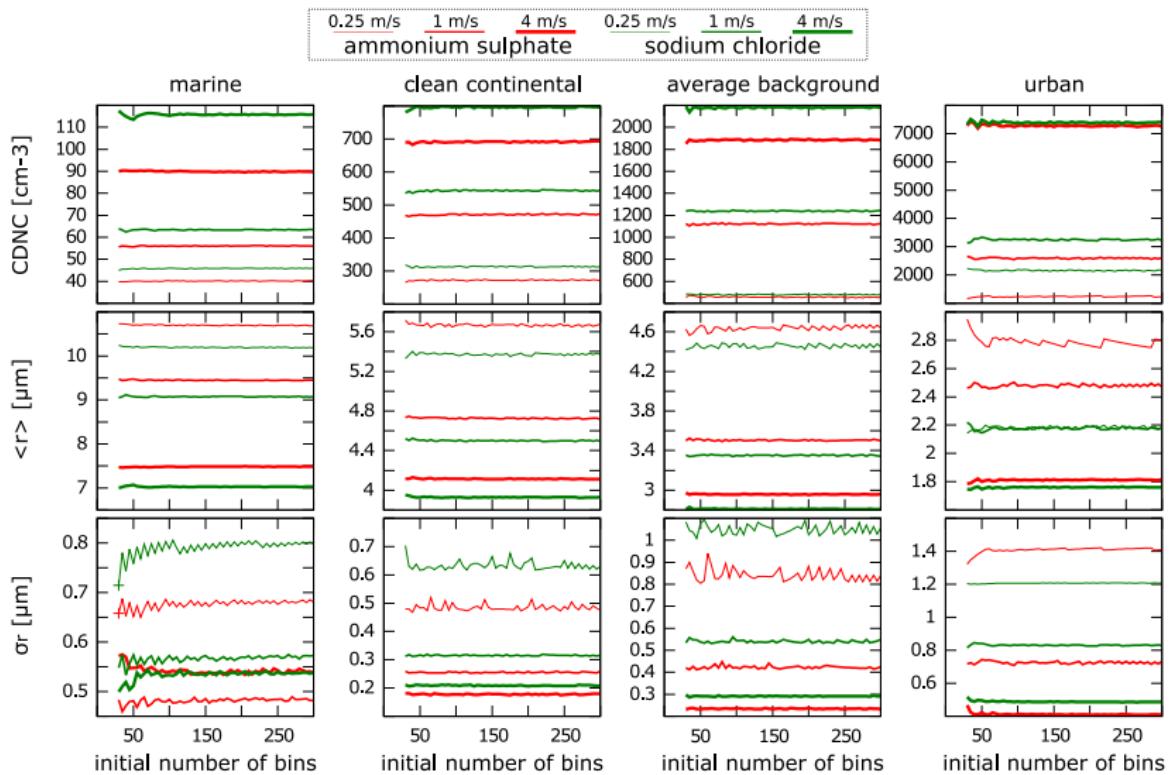
— RH

T_w - T

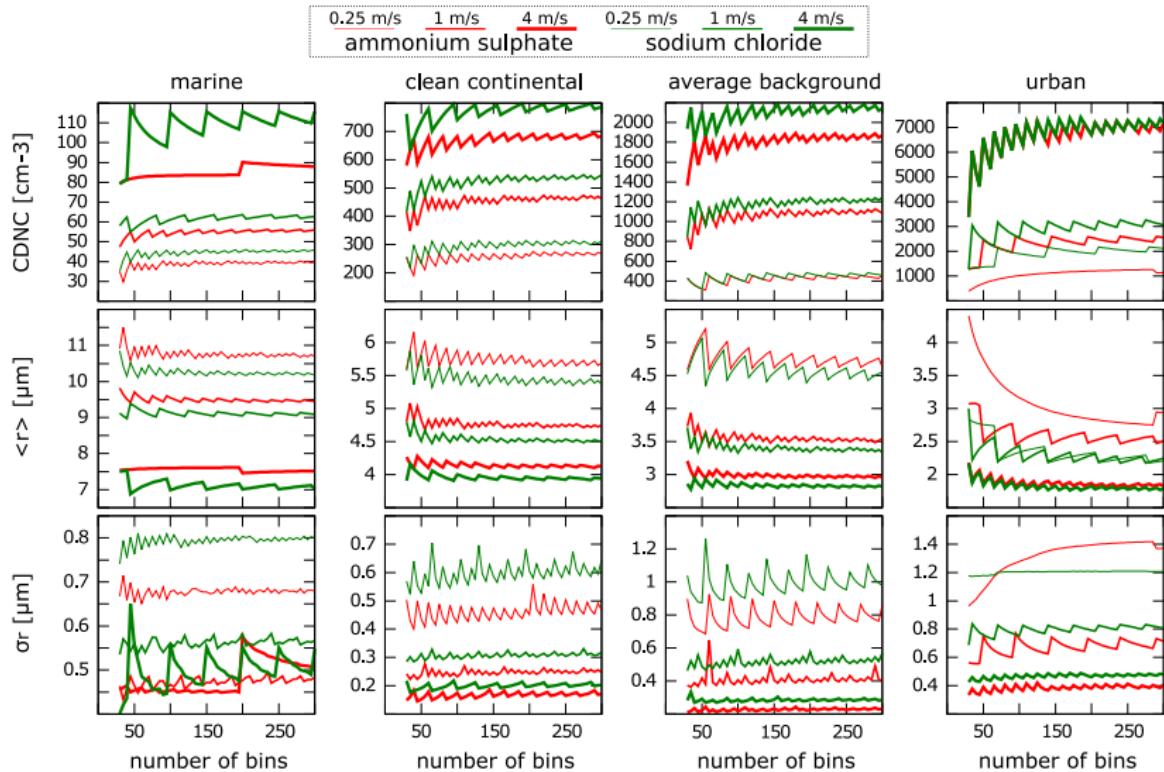
-0.05 0 0.05 0.1



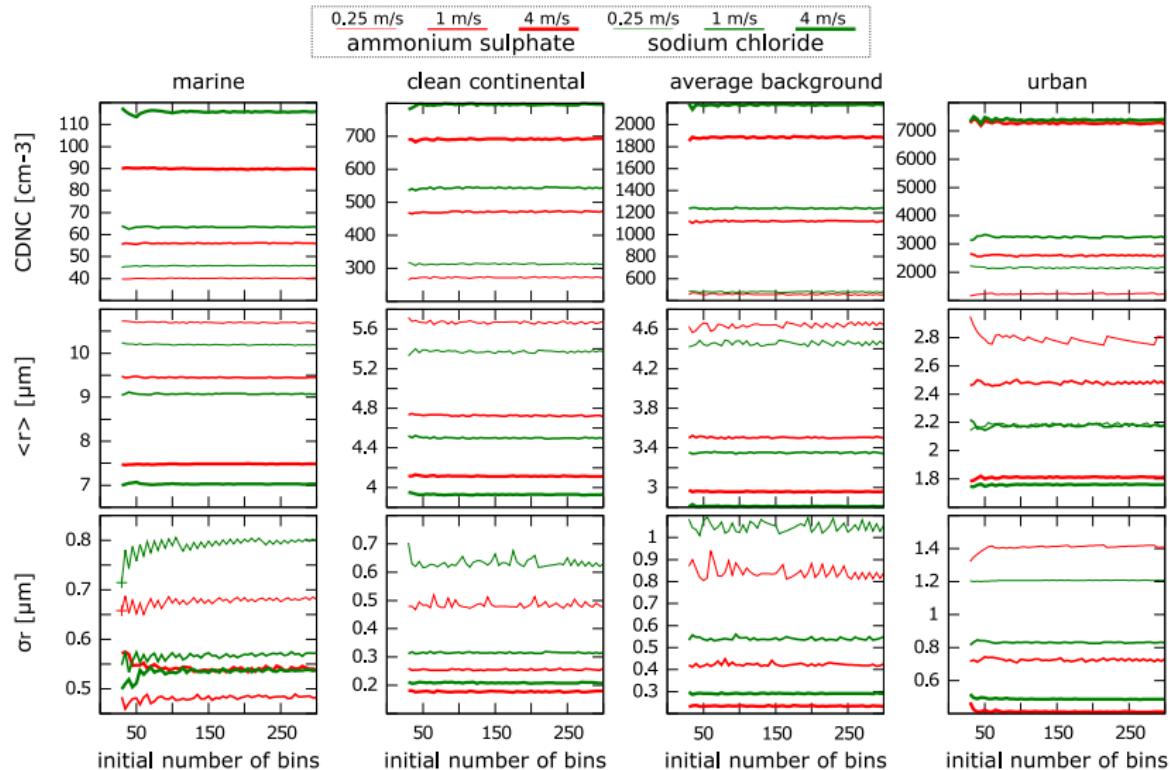
to działa!



schemat adaptacyjny wyłączony



schemat adaptacyjny włączony



Kilka słów o implementacji

- skład chemiczny aerosolu: κ -Köhler (Petters i Kreidenweis, 2007)
- całkowanie równ. rózn. zwycz: LLNL SUNDIALS (Hindmarsh i in., 2005)
- pomocnicze algorytmy: GNU Scientific Library (Galassi i in., 2009)
- kod: C++ i Boost.units (Schabel i Watanabe, 2008)
- kod źródłowy i instrukcja obsługi jako załączniki do artykułu
- licencja GNU GPL, publiczny CVS: <http://gna.org/projects/drops/>
- dwa przyjazne użytkownikowi interfejsy:
 - opcje linii komend, skrypt gnuplota na standardowym wyjściu
 - interfejs graficzny HTML/SVG do obsługi poprzez przeglądarkę internetową

Galassi, M., Davies, J., Theiler, J., Gough, B., Jungman, G., Alken, P., Booth, M., i Rossi, F.: GNU Scientific Library Reference Manual - Third Edition (v1.12), Network Theory Ltd., 2009.

Hindmarsh, A., Brown, P., Grant, K., Lee, S., Serban, R., Shumaker, D., i Woodward, C.: SUNDIALS: Suite of Nonlinear and Differential/Algebraic Equation Solvers, ACM Transactions on Mathematical Software, 31, 363–396, 2005.

Petters, M. i Kreidenweis, S.: A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity, Atmos. Chem. Phys., 7, 1961–1971, 2007.

Schabel, M. i Watanabe, S.: Boost.Units: Zero-overhead dimensional analysis and unit/quantity manipulation and conversion, in: Boost Library Documentation, (available at <http://www.boost.org/doc/libs/>), 2008.



Kilka słów o implementacji

- skład chemiczny aerosolu: κ -Köhler (Petters i Kreidenweis, 2007)
- całkowanie równ. różn. zwycz: LLNL SUNDIALS (Hindmarsh i in., 2005)
- pomocnicze algorytmy: GNU Scientific Library (Galassi i in., 2009)
- kod: C++ i Boost.units (Schabel i Watanabe, 2008)
- kod źródłowy i instrukcja obsługi jako załączniki do artykułu
- licencja GNU GPL, publiczny CVS: <http://gna.org/projects/drops/>
- dwa przyjazne użytkownikowi interfejsy:
 - opcje linii komend, skrypt gnuplota na standardowym wyjściu
 - interfejs graficzny HTML/SVG do obsługi poprzez przeglądarkę internetową

Galassi, M., Davies, J., Theiler, J., Gough, B., Jungman, G., Alken, P., Booth, M., i Rossi, F.: GNU Scientific Library Reference Manual - Third Edition (v1.12), Network Theory Ltd., 2009.

Hindmarsh, A., Brown, P., Grant, K., Lee, S., Serban, R., Shumaker, D., i Woodward, C.: SUNDIALS: Suite of Nonlinear and Differential/Algebraic Equation Solvers, ACM Transactions on Mathematical Software, 31, 363–396, 2005.

Petters, M. i Kreidenweis, S.: A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity, Atmos. Chem. Phys., 7, 1961–1971, 2007.

Schabel, M. i Watanabe, S.: Boost.Units: Zero-overhead dimensional analysis and unit/quantity manipulation and conversion, in: Boost Library Documentation, (available at <http://www.boost.org/doc/libs/>), 2008.



Kilka słów o implementacji

- skład chemiczny aerosolu: κ -Köhler (Petters i Kreidenweis, 2007)
- całkowanie równ. różn. zwycz: LLNL SUNDIALS (Hindmarsh i in., 2005)
- pomocnicze algorytmy: GNU Scientific Library (Galassi i in., 2009)
- kod: C++ i Boost.units (Schabel i Watanabe, 2008)
- kod źródłowy i instrukcja obsługi jako załączniki do artykułu
- licencja GNU GPL, publiczny CVS: <http://gna.org/projects/drops/>
- dwa przyjazne użytkownikowi interfejsy:
 - opcje linii komend, skrypt gnuplota na standardowym wyjściu
 - interfejs graficzny HTML/SVG do obsługi poprzez przeglądarkę internetową

Galassi, M., Davies, J., Theiler, J., Gough, B., Jungman, G., Alken, P., Booth, M., i Rossi, F.: GNU Scientific Library Reference Manual - Third Edition (v1.12), Network Theory Ltd., 2009.

Hindmarsh, A., Brown, P., Grant, K., Lee, S., Serban, R., Shumaker, D., i Woodward, C.: SUNDIALS: Suite of Nonlinear and Differential/Algebraic Equation Solvers, ACM Transactions on Mathematical Software, 31, 363–396, 2005.

Petters, M. i Kreidenweis, S.: A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity, Atmos. Chem. Phys., 7, 1961–1971, 2007.

Schabel, M. i Watanabe, S.: Boost.Units: Zero-overhead dimensional analysis and unit/quantity manipulation and conversion, in: Boost Library Documentation, (available at <http://www.boost.org/doc/libs/>), 2008.



Kilka słów o implementacji

- skład chemiczny aerosolu: κ -Köhler (Petters i Kreidenweis, 2007)
- całkowanie równ. różn. zwycz: LLNL SUNDIALS (Hindmarsh i in., 2005)
- pomocnicze algorytmy: GNU Scientific Library (Galassi i in., 2009)
- kod: C++ i Boost.units (Schabel i Watanabe, 2008)
- kod źródłowy i instrukcja obsługi jako załączniki do artykułu
- licencja GNU GPL, publiczny CVS: <http://gna.org/projects/drops/>
- dwa przyjazne użytkownikowi interfejsy:
 - opcje linii komend, skrypt gnuplota na standardowym wyjściu
 - interfejs graficzny HTML/SVG do obsługi poprzez przeglądarkę internetową

Galassi, M., Davies, J., Theiler, J., Gough, B., Jungman, G., Alken, P., Booth, M., i Rossi, F.: GNU Scientific Library Reference Manual - Third Edition (v1.12), Network Theory Ltd., 2009.

Hindmarsh, A., Brown, P., Grant, K., Lee, S., Serban, R., Shumaker, D., i Woodward, C.: SUNDIALS: Suite of Nonlinear and Differential/Algebraic Equation Solvers, ACM Transactions on Mathematical Software, 31, 363–396, 2005.

Petters, M. i Kreidenweis, S.: A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity, Atmos. Chem. Phys., 7, 1961–1971, 2007.

Schabel, M. i Watanabe, S.: Boost.Units: Zero-overhead dimensional analysis and unit/quantity manipulation and conversion, in: Boost Library Documentation, (available at <http://www.boost.org/doc/libs/>), 2008.



Kilka słów o implementacji

- skład chemiczny aerosolu: κ -Köhler (Petters i Kreidenweis, 2007)
- całkowanie równ. różn. zwycz: LLNL SUNDIALS (Hindmarsh i in., 2005)
- pomocnicze algorytmy: GNU Scientific Library (Galassi i in., 2009)
- kod: C++ i Boost.units (Schabel i Watanabe, 2008)
- kod źródłowy i instrukcja obsługi jako załączniki do artykułu
- licencja GNU GPL, publiczny CVS: <http://gna.org/projects/drops/>
- dwa przyjazne użytkownikowi interfejsy:
 - opcje linii komend, skrypt gnuplota na standardowym wyjściu
 - interfejs graficzny HTML/SVG do obsługi poprzez przeglądarkę internetową

Galassi, M., Davies, J., Theiler, J., Gough, B., Jungman, G., Alken, P., Booth, M., i Rossi, F.: GNU Scientific Library Reference Manual - Third Edition (v1.12), Network Theory Ltd., 2009.

Hindmarsh, A., Brown, P., Grant, K., Lee, S., Serban, R., Shumaker, D., i Woodward, C.: SUNDIALS: Suite of Nonlinear and Differential/Algebraic Equation Solvers, ACM Transactions on Mathematical Software, 31, 363–396, 2005.

Petters, M. i Kreidenweis, S.: A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity, Atmos. Chem. Phys., 7, 1961–1971, 2007.

Schabel, M. i Watanabe, S.: Boost.Units: Zero-overhead dimensional analysis and unit/quantity manipulation and conversion, in: Boost Library Documentation, (available at <http://www.boost.org/doc/libs/>), 2008.



Kilka słów o implementacji

- skład chemiczny aerosolu: κ -Köhler (Petters i Kreidenweis, 2007)
- całkowanie równ. różn. zwycz: LLNL SUNDIALS (Hindmarsh i in., 2005)
- pomocnicze algorytmy: GNU Scientific Library (Galassi i in., 2009)
- kod: C++ i Boost.units (Schabel i Watanabe, 2008)
- kod źródłowy i instrukcja obsługi jako załączniki do artykułu
- licencja GNU GPL, publiczny CVS: <http://gna.org/projects/drops/>
- dwa przyjazne użytkownikowi interfejsy:
 - opcje linii komend, skrypt gnuplota na standardowym wyjściu
 - interfejs graficzny HTML/SVG do obsługi poprzez przeglądarkę internetową

Galassi, M., Davies, J., Theiler, J., Gough, B., Jungman, G., Alken, P., Booth, M., i Rossi, F.: GNU Scientific Library Reference Manual - Third Edition (v1.12), Network Theory Ltd., 2009.

Hindmarsh, A., Brown, P., Grant, K., Lee, S., Serban, R., Shumaker, D., i Woodward, C.: SUNDIALS: Suite of Nonlinear and Differential/Algebraic Equation Solvers, ACM Transactions on Mathematical Software, 31, 363–396, 2005.

Petters, M. i Kreidenweis, S.: A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity, Atmos. Chem. Phys., 7, 1961–1971, 2007.

Schabel, M. i Watanabe, S.: Boost.Units: Zero-overhead dimensional analysis and unit/quantity manipulation and conversion, in: Boost Library Documentation, (available at <http://www.boost.org/doc/libs/>), 2008.



Kilka słów o implementacji

- skład chemiczny aerosolu: κ -Köhler (Petters i Kreidenweis, 2007)
- całkowanie równ. różn. zwycz: LLNL SUNDIALS (Hindmarsh i in., 2005)
- pomocnicze algorytmy: GNU Scientific Library (Galassi i in., 2009)
- kod: C++ i Boost.units (Schabel i Watanabe, 2008)
- kod źródłowy i instrukcja obsługi jako załączniki do artykułu
- licencja GNU GPL, publiczny CVS: <http://gna.org/projects/drops/>
- dwa przyjazne użytkownikowi interfejsy:
 - opcje linii komend, skrypt gnuplota na standardowym wyjściu
 - interfejs graficzny HTML/SVG do obsługi poprzez przeglądarkę internetową

Galassi, M., Davies, J., Theiler, J., Gough, B., Jungman, G., Alken, P., Booth, M., i Rossi, F.: GNU Scientific Library Reference Manual - Third Edition (v1.12), Network Theory Ltd., 2009.

Hindmarsh, A., Brown, P., Grant, K., Lee, S., Serban, R., Shumaker, D., i Woodward, C.: SUNDIALS: Suite of Nonlinear and Differential/Algebraic Equation Solvers, ACM Transactions on Mathematical Software, 31, 363–396, 2005.

Petters, M. i Kreidenweis, S.: A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity, Atmos. Chem. Phys., 7, 1961–1971, 2007.

Schabel, M. i Watanabe, S.: Boost.Units: Zero-overhead dimensional analysis and unit/quantity manipulation and conversion, in: Boost Library Documentation, (available at <http://www.boost.org/doc/libs/>), 2008.



Plan prezentacji

- 1 Aktywacja CCN a interakcje aerozol-chmura-klimat
- 2 Aktywacja CCN w pomiarach EUCAARI-IMPACT
- 3 Modelowanie aktywacji CCN: model cząstki
- 4 Modelowanie aktywacji CCN: model LES

Podejście lagranżowskie a LES

sprzężenie równań ewolucji widma rozmiarów aerosolu z:

- modelem cząstki
 - ~~siatka obliczeniowa: promienie cząstek suchych
 - ~~stałe (dla słupka): koncentracje cząstek
 - ~~zmienne (dla słupka): **promienie kropelek** (ew. temperatury)
- modelem LES
 - ~~siatka obliczeniowa: promienie cząstek „suchych” (+ siatka LES)
 - ~~stałe (dla słupka): koncentracje cząstek (bez źródeł i koalescencji)
 - ~~zmienne: **promienie i położenia kropelek**,

moduł mikrofizyki LES „Super Droplet” (Shima i in., 2009)

Procesy liczone explicite: wzrost kondensacyjny aerosolu/kropel (w tym aktywacja), osiadanie grawitacyjne (w tym opad mżawki i deszczu), zderzenia i koalescencja kropelek (Monte Carlo).

Shima, S., Kusano, K., Kawano, A., Sugiyama, T., i Kawahara, S.: The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: A particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model. Quart. J. Roy. Meteor. Soc.. 135. 1307–1320. 2009.



Podejście lagranżwskie a LES

sprzężenie równań ewolucji widma rozmiarów aerosolu z:

- modelem cząstki
 - ~~siatka obliczeniowa: promienie cząstek suchych
 - ~~stałe (dla słupka): koncentracje cząstek
 - ~~zmienne (dla słupka): **promienie kropelek** (ew. temperatury)
- modelem LES
 - ~~siatka obliczeniowa: promienie cząstek „suchych” (+ siatka LES)
 - ~~stałe (dla słupka): koncentracje cząstek (bez źródeł i koalescencji)
 - ~~zmienne: **promienie i położenia kropelek**,

moduł mikrofizyki LES „Super Droplet” (Shima i in., 2009)

Procesy liczone explicite: wzrost kondensacyjny aerosolu/kropel (w tym aktywacja), osiadanie grawitacyjne (w tym opad mżawki i deszczu), zderzenia i koalescencja kropelek (Monte Carlo).

Shima, S., Kusano, K., Kawano, A., Sugiyama, T., i Kawahara, S.: The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: A particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model. Quart. J. Roy. Meteor. Soc.. 135. 1307–1320. 2009.



Podejście lagranżwskie a LES

sprzężenie równań ewolucji widma rozmiarów aerosolu z:

- modelem cząstki
 - ~~siatka obliczeniowa: promienie cząstek suchych
 - ~~stałe (dla słupka): koncentracje cząstek
 - ~~zmienne (dla słupka): **promienie kropelek** (ew. temperatury)
- modelem LES
 - ~~siatka obliczeniowa: promienie cząstek „suchych” (+ siatka LES)
 - ~~stałe (dla słupka): koncentracje cząstek (bez źródeł i koalescencji)
 - ~~zmienne: **promienie i położenia kropelek**,

moduł mikrofizyki LES „Super Droplet” (Shima i in., 2009)

Procesy liczone explicite: wzrost kondensacyjny aerosolu/kropel (w tym aktywacja), osiadanie grawitacyjne (w tym opad mżawki i deszczu), zderzenia i koalescencja kropelek (Monte Carlo).

Shima, S., Kusano, K., Kawano, A., Sugiyama, T., i Kawahara, S.: The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: A particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model. Quart. J. Roy. Meteor. Soc.. 135. 1307–1320. 2009.



Chmury RICO (pływkie Cu strefy pasatowej): symulacje CReSS-SDM i pomiary Fast-FSSP

- symulacje:

- dynamika (LES): Cloud Resolving Storm Simulator (Tsuboki i Sakakibara, 2006)
- mikrofizyka: Super Droplet Method (Shima i in., 2009)
- podstawowe parametry symulacji: GCSS RICO set-up (vanZanten i in., 2010)
- pocz. widmo aerozolu: dopasowanie do pomiarów RICO (Derksen i in., 2009)



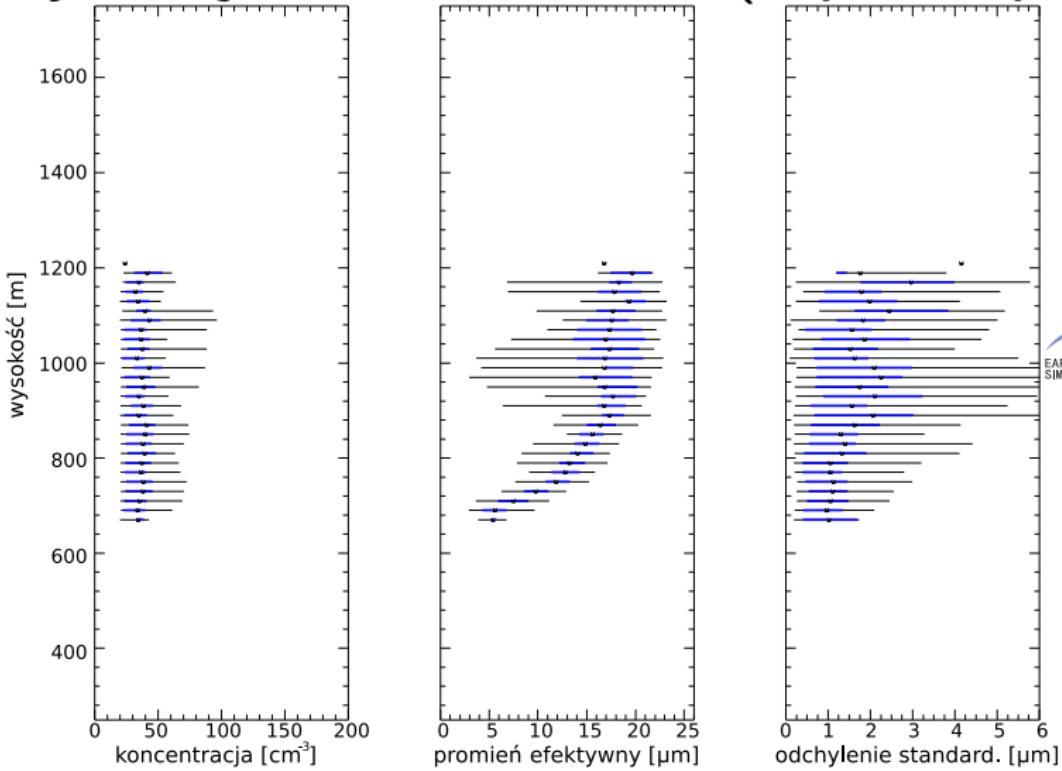
Chmury RICO (pływkie Cu strefy pasatowej): symulacje CReSS-SDM i pomiary Fast-FSSP

- pomiary:

- 8-godzinne loty pomiarowe C-130 z wyspy Antigua (Rauber i in., 2007)
- optyczny spektrometr rozmiarów kropelek **Fast-FSSP** (Brenguier i in., 1998)
- statystyki zmienności widma rozmiarów z wysokością (Arabas i in., 2009)



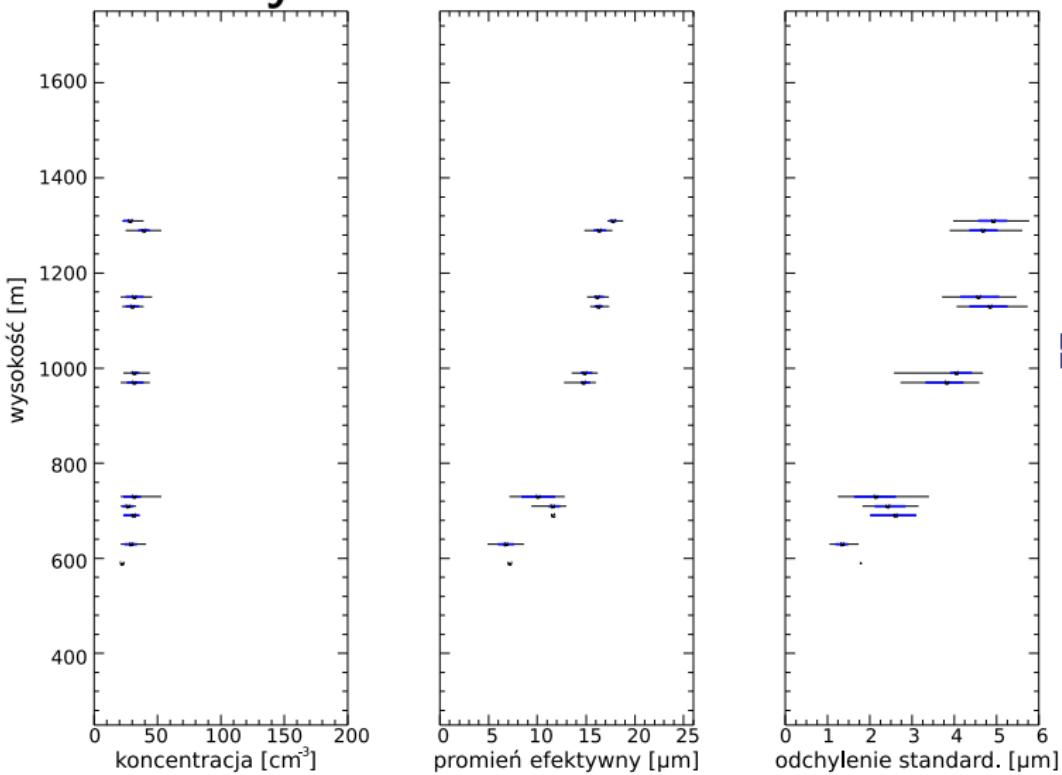
Symulacja LES chmur RICO (Super Droplet)³



³ obliczenia wykonane na Earth Symulatorze (JAMSTEC, Jokohama)



Pomiary Fast-FSSP w chmurach RICO⁴



⁴dane: CNRS/Météo-France, Tuluza; NCAR, Boulder



Dziękuję za uwagę!

Zapraszamy do lektury artykułu i wypróbowania modelu:

<http://geosci-model-dev-discuss.net/3/1271/2010/>

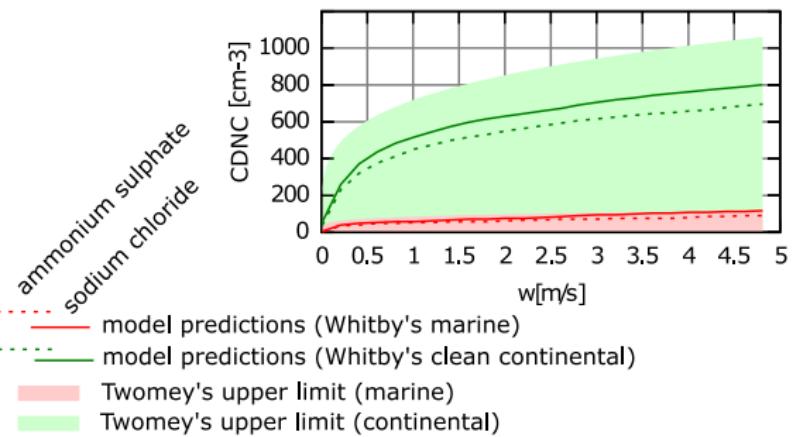
(kod źródłowy i instrukcja obsługi na stronie czasopisma)

Arabas & Pawlowska 2010: Adaptive method of lines for multi-component aerosol condensational growth and cloud droplet activation



Example usage / tentative validation

comparison with the Twomey's approximate upper-limit solution (1959):



E : dew-point elevation [K]

w : vertical velocity [cm/s]

$CDNC$: drop conc. [cm⁻³]

k, c : aerosol parameters

marine: $k = 1/3, c = 125/cm^3$

continental: $k = 2/5, c = 2000/cm^3$

$$E_{max} < \left[\frac{1.63 \times 10^{-3} \cdot w^{3/2}}{c \cdot k \cdot B(3/2, k/2)} \right]^{\frac{1}{k+2}}$$

$$CDNC < c \cdot (E_{max})^k$$

may be used for creating look-up tables/parametrizations for models run at time/space resolutions where CCN activation is a sub-scale process

Układ równań model cząstki

$$\begin{bmatrix} r_{wl}^{[c,b]} \\ T_{wl}^{[c,b]} \\ \frac{dq_v}{dt} \\ p \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{D(\lambda_D, r_w)}{\rho_I r_{wl}^{[c,b]}} \left[\frac{p q_v}{R(q_v) T} - \frac{p_{vs}(T_{wl}^{[c,b]}, r_{wl}^{[c,b]}, r_{dl}^{[c,b]})}{R_v T_{wl}^{[c,b]}} \right] \\ \frac{3}{c_l} \left[\frac{dr_{wl}^{[c,b]}}{dt} \frac{I_v(T_{wl}^{[c,b]})}{r_{wl}^{[c,b]}} + \frac{T - T_{wl}^{[c,b]}}{r_{wl}^{[c,b]}} \frac{K(\lambda_K, r_w)}{\rho_I} \right] \\ (q_v - 1) \frac{\pi \rho_I}{3} \sum_c \sum_b N^{[c,b]} \\ \cdot \left[\gamma \left[r_{wr}^{[c,b]}, r_{wl}^{[c,b]} \right] \frac{dr_{wr}^{[c,b]}}{dt} + \gamma \left[r_{wl}^{[c,b]}, r_{wr}^{[c,b]} \right] \frac{dr_{wl}^{[c,b]}}{dt} \right] \\ - \frac{p g}{T R(q_v)} w \\ \frac{1}{c_p(q_v)} \left[\frac{T R(q_v)}{p} \frac{dp}{dt} - I_v(T) \frac{dq_v}{dt} \right] \end{bmatrix}$$

pomiary IMPACT/aktywacja w modelu cząstki

pomiary wykonywane podczas lotów EUCAARI-IMPACT
istotne z punktu widzenia badania procesu aktywacji CCN:

- przy podstawie chmur:
 - widmo rozmiarów „suchego” aerosolu
 - widmo rozmiarów aerosolu
 - koncentracja CCN (dla zadanego przesycenia)
 - prędkość pionowa powietrza
 - ciśnienie, temperatura, wilgotność
- wewnątrz chmur:
 - widmo rozmiarów kropelek chmurowych

pomiary IMPACT/aktywacja w modelu cząstki

pomiary wykonywane podczas lotów EUCAARI-IMPACT
istotne z punktu widzenia badania procesu aktywacji CCN:

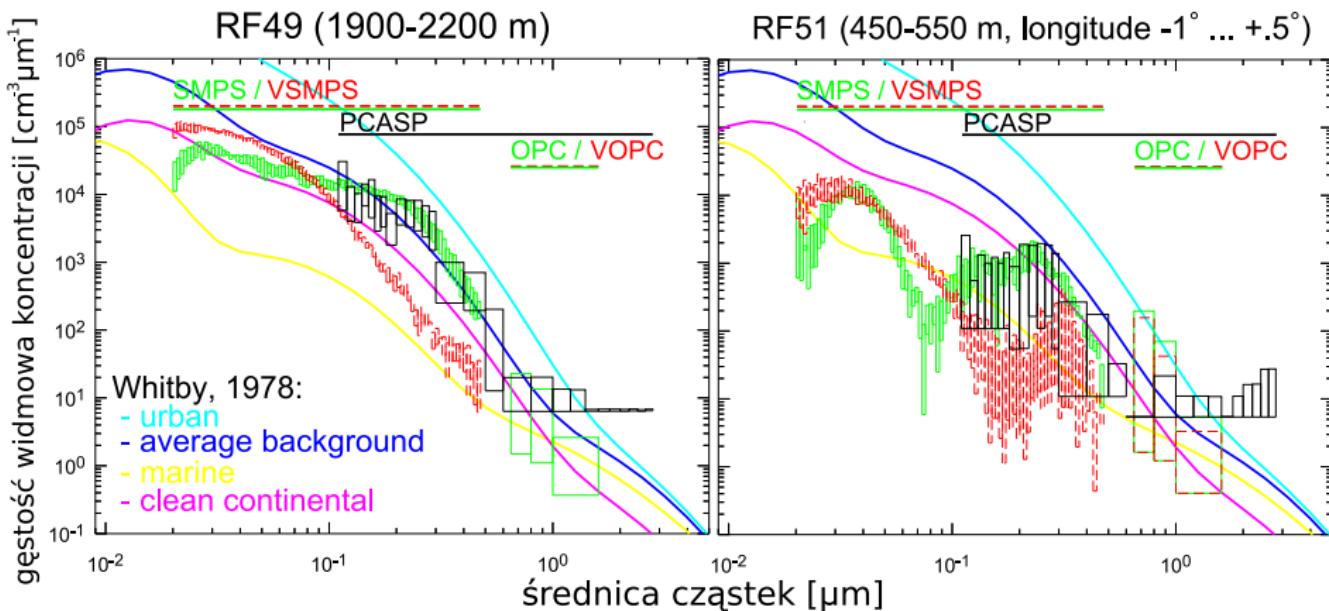
- przy podstawie chmur:
 - widmo rozmiarów „suchego” aerosolu ([war. pocz](#))
 - widmo rozmiarów aerosolu
 - koncentracja CCN (dla zadanego przesycenia)
 - prędkość pionowa powietrza ([parametr](#))
 - ciśnienie, temperatura, wilgotność ([war. pocz](#))
- wewnątrz chmur:
 - widmo rozmiarów kropelek chmurowych

pomiary IMPACT/aktywacja w modelu cząstki

pomiary wykonywane podczas lotów EUCAARI-IMPACT
istotne z punktu widzenia badania procesu aktywacji CCN:

- przy podstawie chmur:
 - widmo rozmiarów „suchego” aerosolu (**war. pocz**)
 - widmo rozmiarów aerosolu (**wynik**)
 - koncentracja CCN (dla zadanego przesycenia) (**wynik**)
 - prędkość pionowa powietrza (**parametr**)
 - ciśnienie, temperatura, wilgotność (**war. pocz**)
- wewnątrz chmur:
 - widmo rozmiarów kropelek chmurowych (**wynik**)

Widmo rozmiarów aerozolu tuż pod podstawą chmur mierzone podczas RF49 i RF51⁵



- zakresy minimum-maksimum, VSPMS/VOPC – pomiary po wygrzaniu w 280°C

⁵dane: LaMP, Clermont-Ferrand, France

Bibliografia do slajdów 33 i 34

- Derksen, J. W. B., Roelofs, G.-J. H., i Röckmann, T.: Influence of entrainment of CCN on microphysical properties of warm cumulus, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 6005–6015, 2009.
- Shima, S., Kusano, K., Kawano, A., Sugiyama, T., i Kawahara, S.: The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: A particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 135, 1307–1320, 2009.
- Tsuboki, K. i Sakakibara, A.: Large-Scale Parallel Computing of Cloud Resolving Storm Simulator, *Lecture Notes in Computer Science*, 2327/2006, 463–471, 2006.
- vanZanten, M., Stevens, B., Nuijens, L., Siebesma, A., Ackerman, A., Burnet, F., Cheng, A., Couvreux, F., Jiang, H., Khairoutdinov, M., Lewellen, D., Mecham, D., Noda, A., Shipway, B., Slawinska, J., Wang, S., i Wyszogrodzki, A.: Controls on precipitation and cloudiness in simulations of trade-wind cumulus as observed during RICO, *J. Adv. Model. Earth Sys.*, (submitted), 2010.
- Arabas, S., Pawłowska, H., i Grabowski, W.: Effective radius and droplet spectral width from in-situ aircraft observations in trade-wind cumuli during RICO, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L11803, 2009.
- Brenguier, J.-L., Bourrianne, T., Coelho, A., Isbert, J., Peytavi, R., Trevarin, D., i Weschler, P.: Improvements of Droplet Size Distribution Measurements with the Fast-FSSP (Forward Scattering Spectrometer Probe), *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 15, 1077–1090, 1998.
- Rauber, R., Stevens, B., Ochs III, H., Knight, C., Albrecht, B., Blyth, A., Fairall, C., Jensen, J., Lasher-Trapp, S., Mayol-Bracero, O., Vali, G., Anderson, J., Baker, B., Bandy, A., Burnet, F., Brenguier, J.-L., Brewer, W., Brown, P., Chuang, P., Cotton, W., Di Girolamo, L., Geerts, H., Gerber, H., Göke, S., Gomes, L., Heikes, B., Hudson, J., Kollias, P., Lawson, R., Krueger, S., Lenschow, D., Nuijens, L., O'Sullivan, D., Rilling, R., Rogers, D., Siebesma, A., Snodgrass, E., Stith, J., Thornton, D., Tucker, S., Twohy, C., i Zuidema, P.: Rain in Shallow Cumulus Over the Ocean – The RICO Campaign, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88, 1912–1928, 2007.