

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 arozoli na klimat

Plan prezentacji

- 1 Aktywacja CCN a interakcje aerosol-chemura-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 aerozol-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"

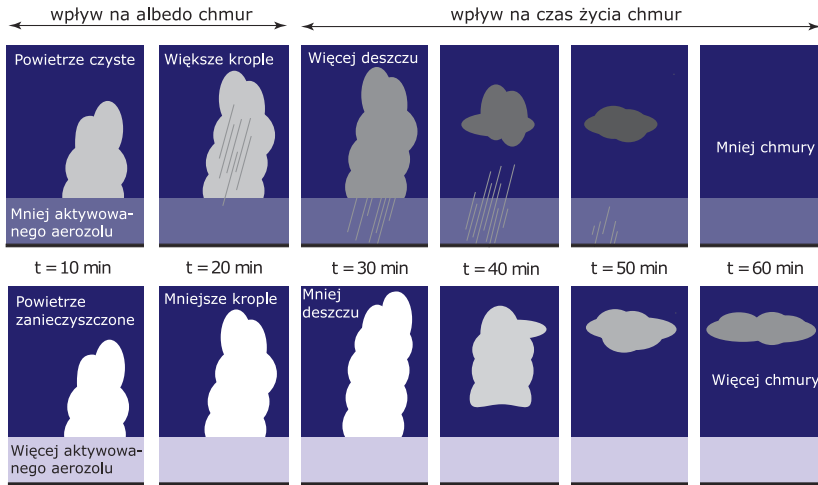
Albrecht (1989) – czas życia chmur:

- "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

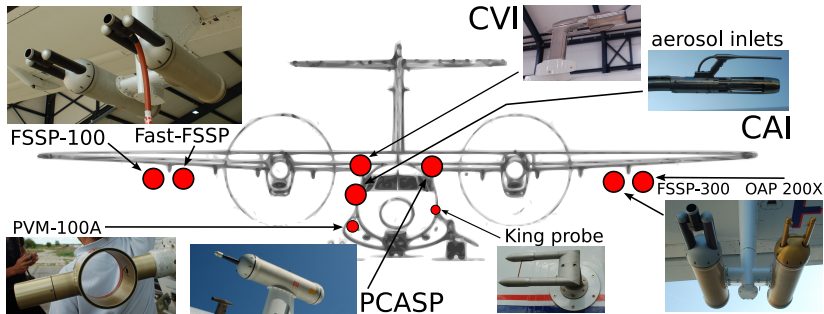
- 1 Aktywacja CCN a interakcje aerosol-chmura-klimat
- 2 Aktywacja CCN w pomiarach EUCAARI-IMPACT**
- 3 Modelowanie aktywacji CCN: model cząstki
- 4 Modelowanie aktywacji CCN: model LES

EUCAARI Intensive 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



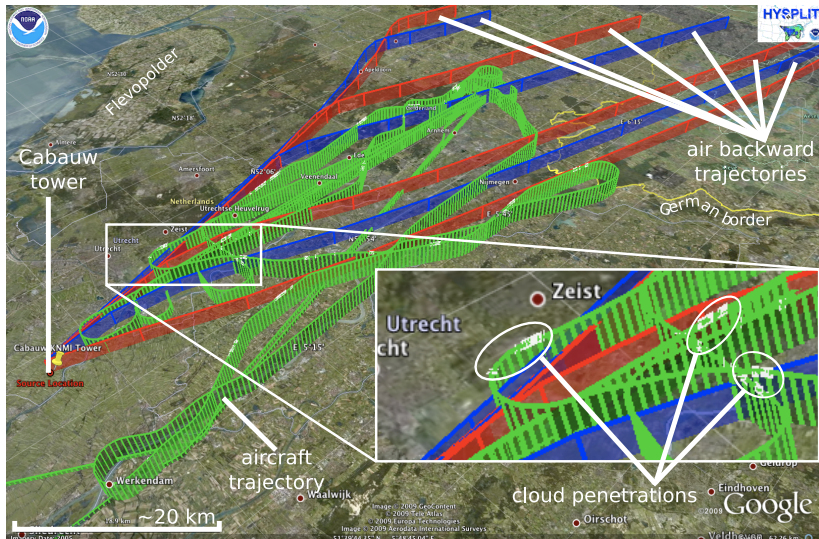
¹Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement (www.safire.fr)

Przykład: mikrofizyka Sc nad Morzem Północnym i Cu nad Holandią

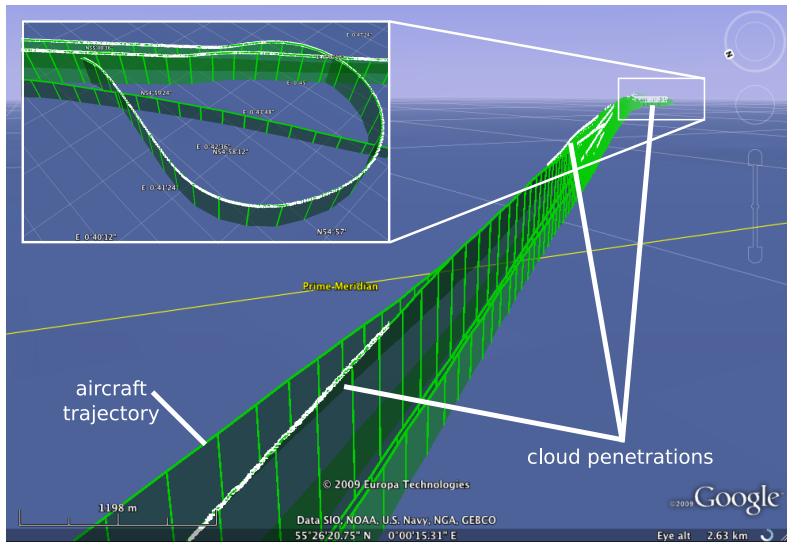
- lot RF49, 13. maja 2008:
 - lot nad Holandią (okolice Cabauw),
 - zanieczyszczone powietrze kontynentalne,
 - w sumie ~ 5 minut lotu wewnątrz chmur Cu

- 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



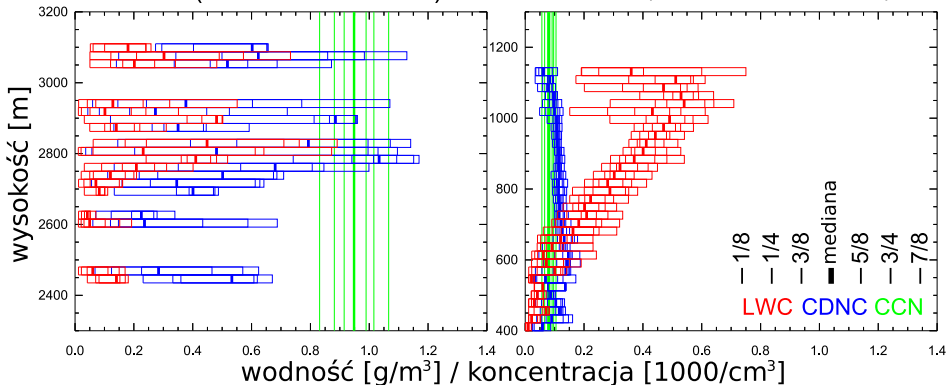
RF51 (15.V 2008) Sc nad Morzem Północnym



Koncentracja kropelek i CCN, wodność²

RF49 (FSSP-100 / CCNC)

RF51 (FSSP-100 / CCNC)



- CCNC zliczał jądra kondensacji aktywowane przy przesyceniu 0.21%
- FSSP-100 klasyfikował kropelki o promieniach 1–25 μm pomiędzy 15 klas wielkości

² dane: CNRS/Météo-France, Tuluzja

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 aerosol-chemura-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 (adiabaticzny bilans ciepła, równanie stanu, równowaga hydrstatyczna):

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

- 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 Raoult'a 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

Elementy opisu matematycznego

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

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

- 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 Raoult'a 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 (adiabatywny bilans ciepła, równanie stanu, równowaga hydrstatyczna):

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

- 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 Raoult'a 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 (adiabatyyczny bilans ciepła, równanie stanu, równowaga hydrstatyczna):

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

- 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 Raoult'a 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

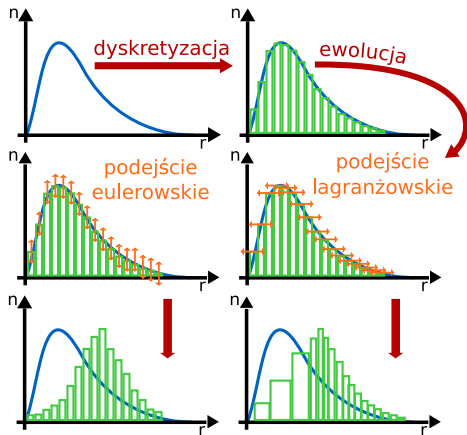
D: wsp. dyfuzji pary

ρ : 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) \rightsquigarrow 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.

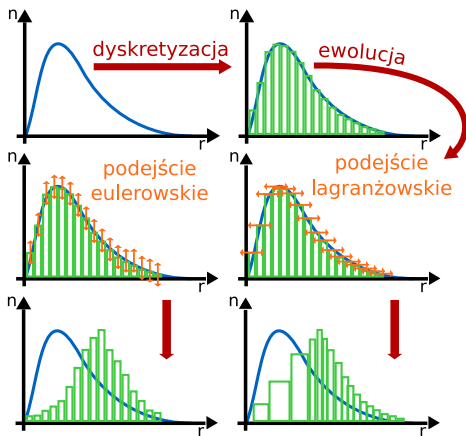
Mordy, W.: Computations of the growth by condensation of a population of cloud droplets, Tellus, 11, 1959.

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) \rightsquigarrow 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)



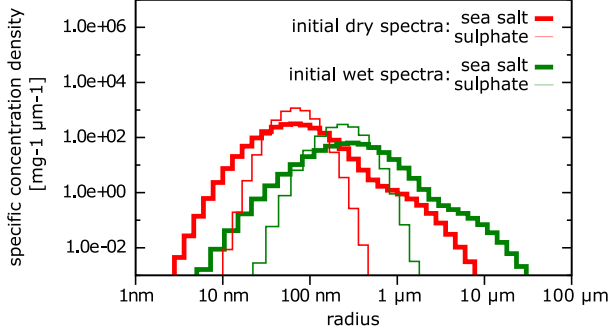
Howell, W.: The growth of cloud drops in uniformly cooled air, J. Meteor., 6, 134–149, 1949.

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 morsa/siarczany, warunek pocz.

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

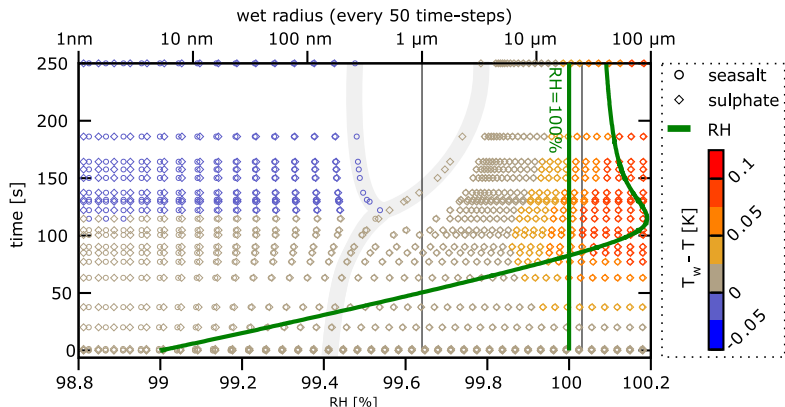


- 280K, 1000 hPa, RH=99%
- kropelki w równowadze
- siarczan: jeden mod lognormalny, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
- sól: trzy mody lognormalne, NaCl
- 45 słupków rozłożonych liniowo w logarytmie promienia

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

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 morsa/siarczany, wyniki

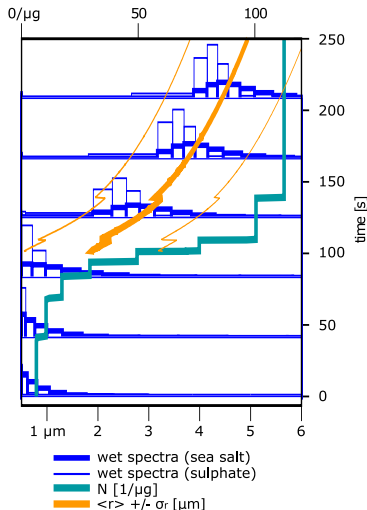


- wyniki obliczeń modelem „drops” (Arabas i Pawlowska, 2010)
- zmienny krok czasowy (algorytm CVODE, Cohen i Hindmarsh, 1996)

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

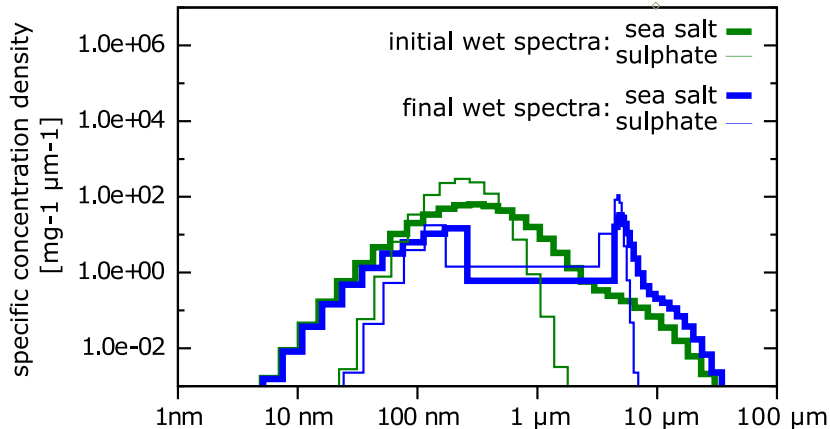
Cohen, S. i Hindmarsh, A.: CVODE, A stiff/nonstiff ODE solver in C, Comput. Phys., 10, 138–143, 1996.

Przykład: sól morsa/siarczany, wyniki



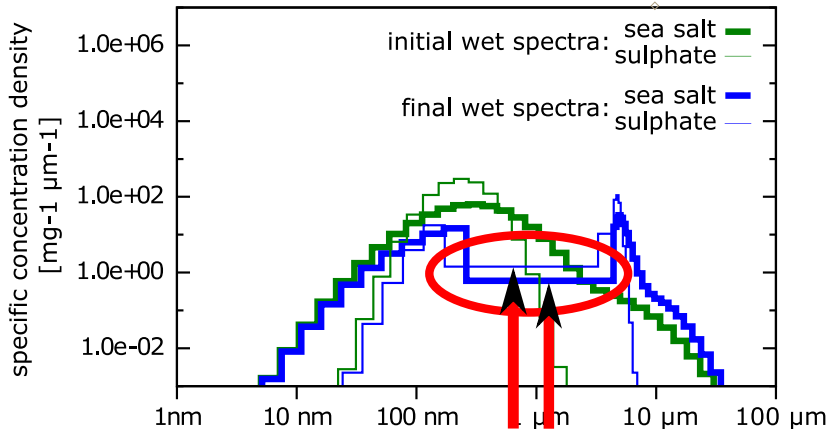
- rozmiary i koncentracja kropelek o promieniach w zakresie $1\text{--}25\mu\text{m}$
- koncentracja kropelet (linia turkusowa) wzrasta do 140 s (35 m), następnie stała
- średni promień wzrasta z wysokością (grubsza pomarańczowa linia)
- odchylenie standardowe względnie stałe (cienka pomarańczowa linia: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

Przykład: sól morska/siarczany, wyniki



bimodalne widmo: mody aerozolu nieaktywowanego
i aktywowanego (kropelek)

Przykład: sól morsa/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):

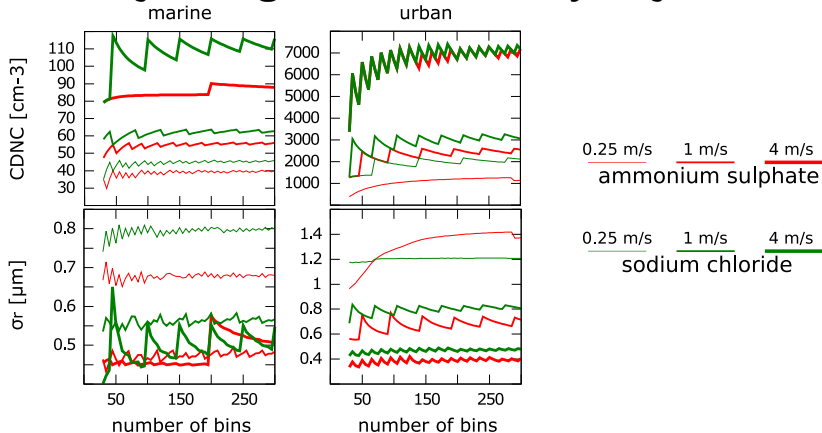
- "...special attention must be paid to the **critical sections(s)**, i.e. size section(s) into which a minimum activation diameter falls."
- "...doubling the particle size resolution improved the results significantly..."

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 SO_2 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 condensationa growth, J. Meteorol. Soc. Jpn, 60, 978–993, 1982.

Podejście lagranżowskie a aktywacja CCN

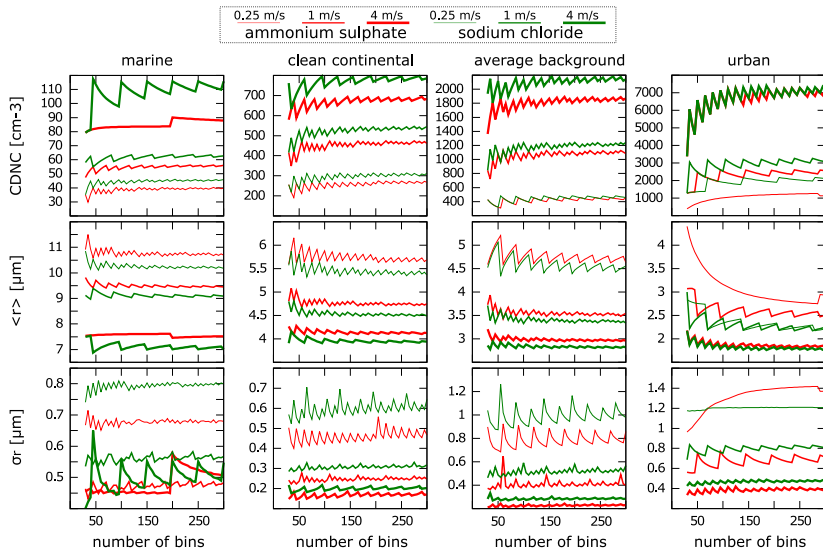


- wyniki obliczeń modelem „drops” (Arabas i Pawlowska, 2010)
- widma „suchego” aerosolu zaczerpnięte z (Whitby, 1978)

Arabas, S. i Pawlowska, 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 :-) (<http://geosci-model-dev-discuss.net/3/1271/2010/>):
 - „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 :-) (<http://geosci-model-dev-discuss.net/3/1271/2010/>):
 - „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 :-) (<http://geosci-model-dev-discuss.net/3/1271/2010/>):
 - „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 :-) (<http://geosci-model-dev-discuss.net/3/1271/2010/>):
 - „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)

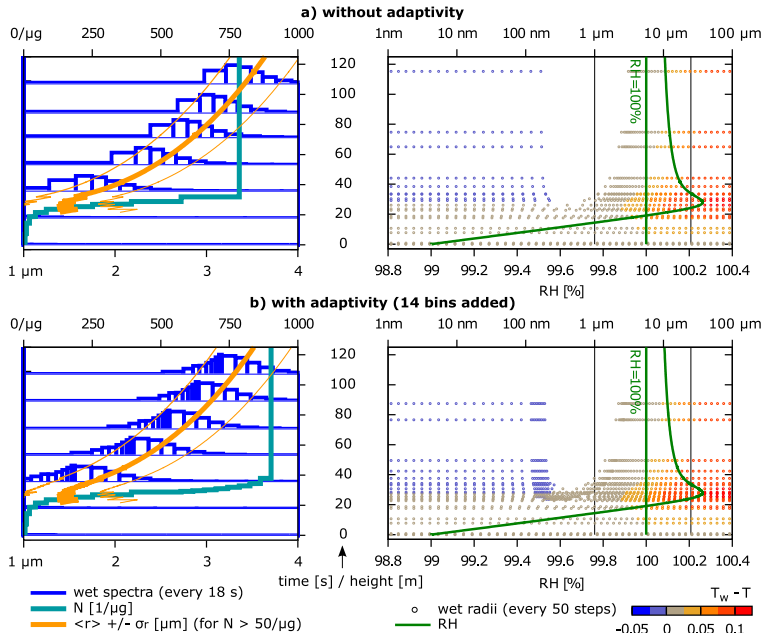
Arabas, S. i Pawlowska, H.: Adaptive method of lines for multi-component aerosol condensational growth and cloud droplet activation, Geosci. Model. Dev., (submitted), 2010.

Podejście lagranżowskie a aktywacja CCN

Arabas i Pawlowska (2010):

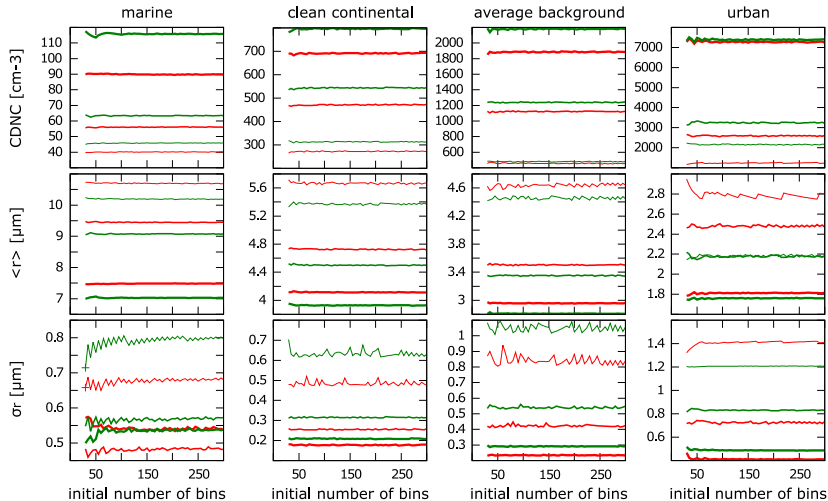
- adaptacyjne rozpinanie siatki obliczeniowej (i adaptacyjny dobór kroku czasowego)
- identyfikacja „krytycznych” słupków i ich podział na kilka mniejszych w trakcie całkowania
- możliwość zadania żądanej dokładności wyniku (wyrażonej poprzez koncentrację kropelek w krytycznym słupku)
- wyeliminowanie czułości modelu na parametry siatki obliczeniowej
- recenzje :-) (<http://geosci-model-dev-discuss.net/3/1271/2010/>):
 - „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.



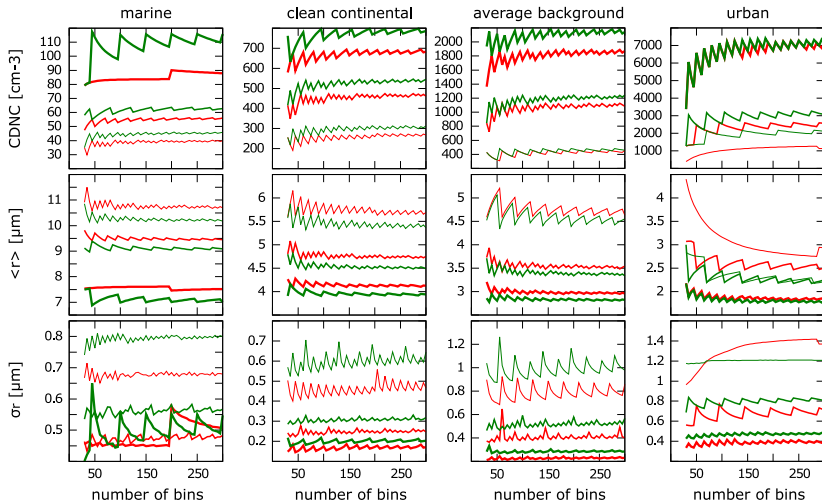
to działa!

0.25 m/s 1 m/s 4 m/s 0.25 m/s 1 m/s 4 m/s
 ammonium sulphate sodium chloride



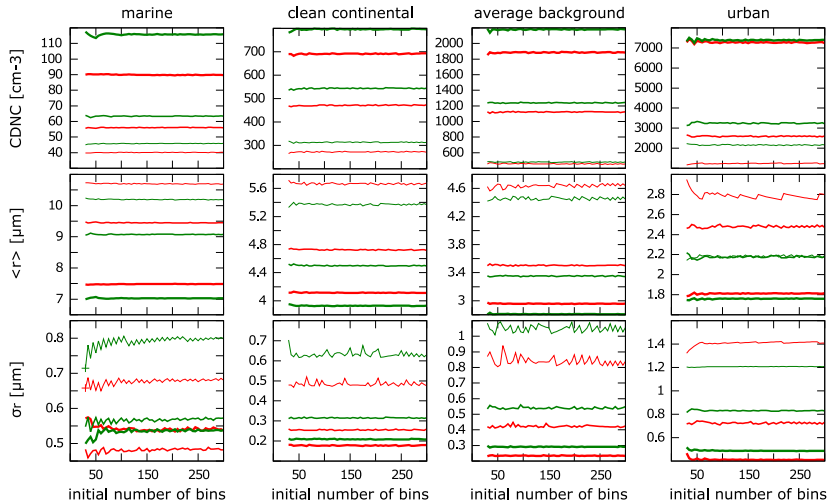
schemat adaptacyjny **wyłączony**

0.25 m/s 1 m/s 4 m/s 0.25 m/s 1 m/s 4 m/s
 ammonium sulphate sodium chloride



schemat adaptacyjny **włączony**

0.25 m/s 1 m/s 4 m/s 0.25 m/s 1 m/s 4 m/s
 ammonium sulphate sodium chloride



Kilka słów o implementacji

- skład chemiczny aerozolu: κ -Köhler (Petters i Kreidenweis, 2007)
- całkowanie równ. różn. zwyczaj: 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 gnuplot 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 aerozolu: κ -Köhler (Petters i Kreidenweis, 2007)
- całkowanie równ. różn. zwyczaj: 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 gnuplot 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 aerozolu: κ -Köhler (Petters i Kreidenweis, 2007)
- całkowanie równ. różn. zwyczaj: 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 gnuplot 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 aerozolu: κ -Köhler (Petters i Kreidenweis, 2007)
- całkowanie równ. różn. zwyczaj: 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 gnuplot 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 aeroszolu: κ -Köhler (Petters i Kreidenweis, 2007)
- całkowanie równ. różn. zwyczaj: 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 gnuplot 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. zwyczaj: 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 gnuplot 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 aerozolu: κ -Köhler (Petters i Kreidenweis, 2007)
- całkowanie równ. różn. zwyczaj: 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 gnuplot 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 aerosol-chmura-klimat
- 2 Aktywacja CCN w pomiarach EUCAARI-IMPACT
- 3 Modelowanie aktywacji CCN: model cząstki
- 4 Modelowanie aktywacji CCN: model LES**

Podejście lagranżwskie a LES

sprężenie równań ewolucji widma rozmiarów aerozolu z:

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

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

Procesy liczone explicite: wzrost kondensacyjny aerozolu/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

sprężenie równań ewolucji widma rozmiarów aerozolu z:

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

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

Procesy liczone explicite: wzrost kondensacyjny aerozolu/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

sprężenie równań ewolucji widma rozmiarów aerozolu z:

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

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

Procesy liczone explicite: wzrost kondensacyjny aerozolu/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 (płytkie Cu strefy pasatowej): symulacje **CReSS-SDM** i pomiary Fast-FSSP

- symulacje:
 - dynamika (LES): **C**loud **R**esolving **S**torm **S**imulator (Tsuboki i Sakakibara, 2006)
 - mikrofizyka: **S**uper **D**roplet **M**ethod (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)

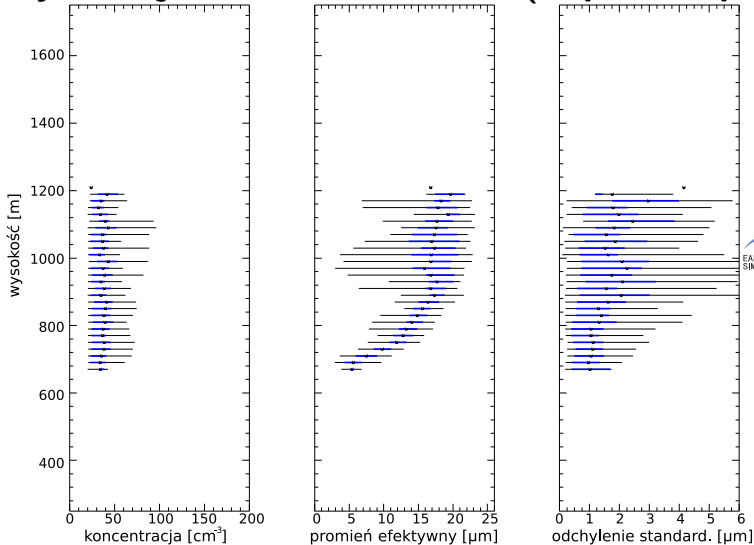


Chmury RICO (płytkie Cu strefy pasatowej): symulacje CReSS-SDM i pomiary **Fast-FSSP**

- 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)

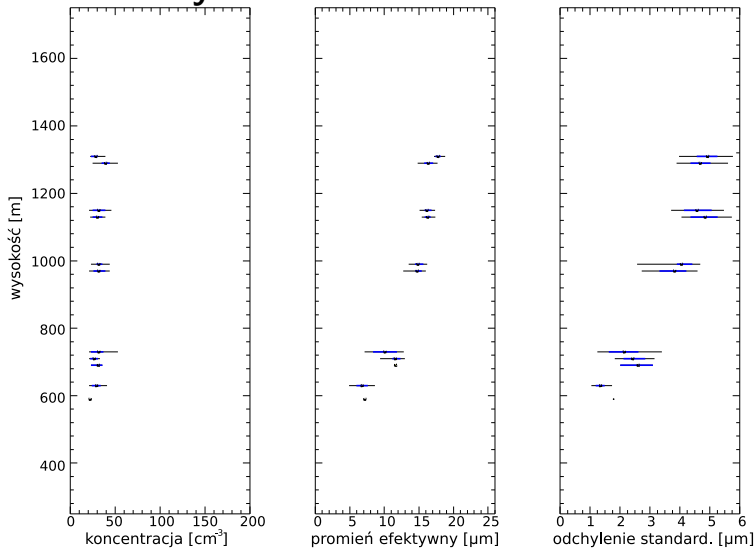


Symulacja LES chmur RICO (Super Droplet)³



³ obliczenia wykonane na Earth Symulatorze (JAMSTEC, Jokohama)

Pomiary Fast-FSSP w chmurach RICO⁴



⁴ dane: 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/>

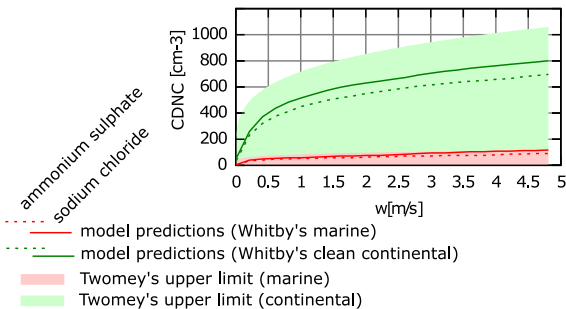
(kod źródłowy i instrukcja obsługi na stronie czasopisma)

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

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

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

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

Twomey, S.: The nuclei of natural cloud formation. Part II: The supersaturation in natural clouds and the variation of cloud droplet concentration, *Geofis. Pura Appl.*, 43, 243–249, 1959.

Układ równań model cząstki

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} r_{wl}^{[c,b]} \\ T_{wl}^{[c,b]} \\ q_v \\ p \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{D(\lambda_D, r_w)}{\rho_l r_{wl}^{[c,b]}} \left[\frac{p q_v}{R(q_v) T} - \frac{p_{vs}(T_{wl}^{[c,b]}, r_{wl}^{[c,b]}, r_{dl}^{[c,b]})}{R_v T_{wl}^{[c,b]}} \right] \\ \frac{3}{c_l} \left[\frac{dr_{wl}^{[c,b]}}{dt} \frac{l_v(T_{wl}^{[c,b]})}{r_{wl}^{[c,b]}} + \frac{T - T_{wl}^{[c,b]}}{r_{wl}^{[c,b]2}} \frac{K(\lambda_K, r_w)}{\rho_l} \right] \\ (q_v - 1) \frac{\pi \rho_l}{3} \sum_c \sum_b N^{[c,b]} \cdot \left[\gamma \left[r_{wr}^{[c,b]}, r_{wl}^{[c,b]} \right] \frac{dr_{wr}^{[c,b]}}{dt} + \gamma \left[r_{wl}^{[c,b]}, r_{wr}^{[c,b]} \right] \frac{dr_{wl}^{[c,b]}}{dt} \right] \\ - \frac{p g}{TR(q_v)} w \\ \frac{1}{c_p(q_v)} \left[\frac{TR(q_v)}{p} \frac{dp}{dt} - l_v(T) \frac{dq_v}{dt} \right] \end{bmatrix}$$

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” aerozolu
 - widmo rozmiarów aerozolu
 - koncentracja CCN (dla zadanego przesylenia)
 - 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” aerozolu (war. pocz)
 - widmo rozmiarów aerozolu
 - 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

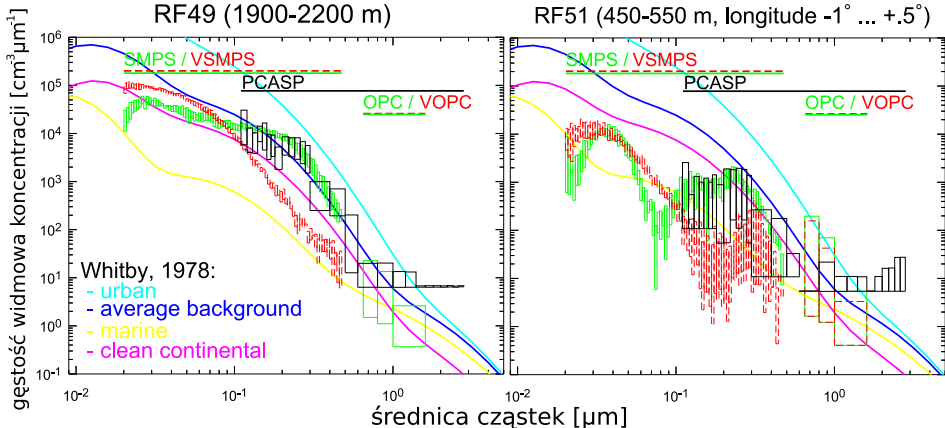
pomiary wykonywane podczas lotów EUCAARI-IMPACT
istotne z punktu widzenia badania procesu aktywacji CCN:

- przy podstawie chmur:
 - widmo rozmiarów „suchego” aerozolu (war. pocz)
 - widmo rozmiarów aerozolu (wynik)
 - koncentracja CCN (dla zadanego przesylenia) (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

RF49 (1900-2200 m)

RF51 (450-550 m, longitude -1° ... +.5°)



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

⁵ dane: 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., Mechem, 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., Pawlowska, 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, L11 803, 2009.
- Brenguier, J.-L., Bourriane, 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.