
Mikrofizyka chmur

Cloud microphysics

Hanna Pawłowska*

Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Abstrakt. Mikrofizyka chmur zajmuje się opisem powstawania i ewolucji cząstek tworzących chmurę. W niniejszym artykule omówiono podstawowe procesy mikrofizyczne zachodzące w tzw. ciepłych chmurach, czyli takich, w których nieobecna jest faza lodowa. Reprezentacja tych procesów w numerycznych modelach chmur jest wyzwaniem ze względu na ogrom cząstek tworzących chmurę, w jednym metrze sześciennym powietrza bowiem znajduje się około 10^8 cząstek. Ich rozmiary i rozkład w przestrzeni mają bezpośredni wpływ na własności radiacyjne chmur, a zatem na bilans promieniowania w atmosferze, który z kolei jest najważniejszym czynnikiem kształtującym klimat. Najnowszy sposób opisu mikrofizyki chmur w modelach numerycznych wykorzystuje koncepcję superkropelki. W artykule przedstawiono podstawowe założenia metody superkropelki wraz z argumentacją wskazującą, że jest to aktualnie najbardziej kompleksowy opis mikrofizyki chmur.

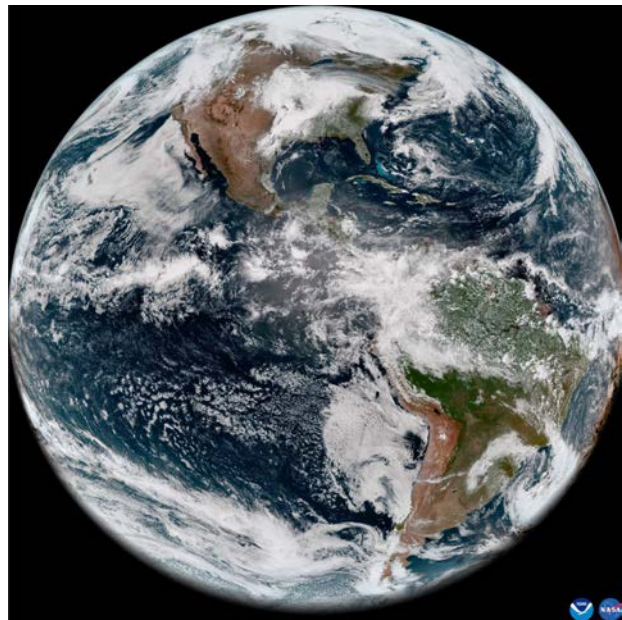
Słowa kluczowe: chmury, mikrofizyka chmur, modelowanie chmur, superkropelki

Abstract. Cloud microphysics addresses description of formation and evolution of cloud particles. In this paper we describe basic microphysical processes in the so-called warm clouds, i.e., those void of ice. Representation of microphysics in numerical models is challenging because of the myriad of cloud particles – in one cubic meter there is approximately 10^8 cloud particles. Their sizes and spatial distribution define cloud radiative properties, and therefore radiative budget; which is the main element governing climate. The latest way to report microphysics in numerical models is based on a so-called superdroplet method. In this paper the main assumption of this method is presented along with the argument that it is the most complex, up-to date cloud microphysics description.

Keywords: clouds, cloud microphysics, cloud modelling, superdroplets

Chmury zawsze fascynowały ludzi. Można podziwiać ich walory estetyczne, kiedy pięknie dekorują niebo. Często są zwiastunem groźnych zjawisk atmosferycznych. Nigdy dotychczas konieczność poznania chmur i procesów w nich zachodzących nie była tak paląca jak obecnie. Działalność człowieka wpływająca na skład atmosfery i zmieniająca własności pokrycia powierzchni ziemi, a co za tym idzie globalny wzrost temperatury, mają ogromne konsekwencje dla klimatu. Chmury uczestniczą w kształtowaniu klimatu poprzez wpływ na transfer energii radiacyjnej, udział w transporcie energii w wyniku ruchów konwekcyjnych oraz pośrednicząc w cyklu obiegu wody w atmosferze. To, jak chmury będą się zmieniały w przekształcającym się klimacie i jaki będzie ich wpływ na klimat, jest przedmiotem zaawansowanych prac naukowych. Prowadzone są one zarówno w ośrodkach zajmujących się modelowaniem klimatu, jak i w tych, w których badane są wybrane procesy chmurowe.

Każdy z nas widzi chmury niemalże codziennie. Jednak zdefiniowanie czy opisanie chmury nie jest takie oczywiste. Na rycinie 1 pokazany jest obraz zachodniej

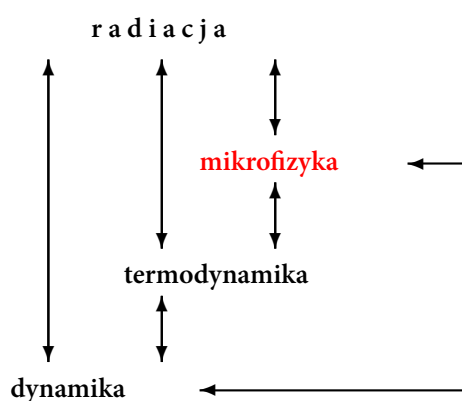


Ryc. 1. Zdjęcie zachodniej półkuli Ziemi (w świetle widzialnym) wykonane 11 maja 2022 roku przez satelitę GOES-T (Geostationary Operational Environmental Satellite-T) (www.nasa.gov/image-feature/earth-from-orbit-noaa-debuts-first-imagery-from-goes-18)

półkuli Ziemi wykonany w świetle widzialnym przez satelitę GOES-T. Chmury są widoczne, ponieważ odbijają promieniowanie widzialne dochodzące ze Słońca.

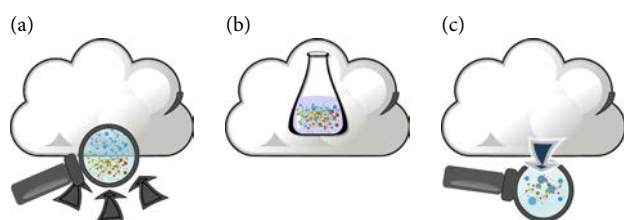
*ORCID: 0000-0002-5345-778X

Różnorodność pól chmurowych odzwierciedla pośrednio dynamiczną strukturę atmosfery. Chmury powstają w wyniku procesów fizycznych związanych z radiacją, dynamiką, termodynamiką i mikrofizyką. Procesy te są w wzajemnie ze sobą powiązane (ryc. 2). Można się spierać, który z procesów jest najbardziej istotny dla zrozumienia zjawiska zwanego chmurą. Niniejszy artykuł przedstawi chmurę z punktu widzenia mikrofizyki. Terminem *mikrofizyka chmur* określamy zarówno opis cząstek (kropelek wody i kryształków lodu), jak i procesów, które wpływają na tworzenie i ewolucję cząstek chmurowych. Procesy te zachodzą w skalach rzędu mikrometrów (10^{-6} m); stąd termin *mikroskala* i *mikrofizyka*.



Ryc. 2. Procesy fizyczne i ich wzajemne reakcje w chmurach

Procesy powstania i ewolucji kropelek chmurowych pokazuje schematycznie ryc. 3. Kroplelki chmurowe tworzą się na aerozolah zwanymi jądrami kondensacji (3a), rosną w chmurze na skutek kondensacji pary wodnej, a następnie w wyniku zderzeń i łączenia się kropelek (3b), po czym krople opadu wypadają z chmury w postaci deszczu (3c).



Ryc. 3. Schematyczne obrazy procesów: (a) powstawania, (b) rozwoju, (c) rozpadu chmury

Jeśli krople deszczu wyparują w warstwie podchmurowej, wówczas jądra kondensacji pozostają w atmosferze. Opad dochodzący do powierzchni ziemi wymywa aerozole z atmosfery. Aerozole tworzące jądra kondensacji są nierozdzielnie związane z chmurami. Uczestniczą w procesie tworzenia kropelek chmurowych i mają bezpośredni wpływ na własności mikrofizyczne chmur. Z kolei procesy zachodzące w chmurze zmieniają własności aerozolu; efekt ten nazywa się często *procesowaniem aerozolu przez chmurę*.

W niniejszym artykule omówione zostaną podstawowe procesy rządzące powstawaniem i ewolucją kropelek chmurowych oraz sposoby opisu mikrofizyki chmur w modelach numerycznych. Większość procesów będzie omawiana na przykładzie chmur konwekcyjnych. Dla zachowania jasności przekazu ograniczymy się do problematyki związanej z tzw. ciepłymi chmurami, czyli zawierającymi wyłącznie krople w fazie ciekłej, a pominiemy procesy związane z różnymi formami lodu.

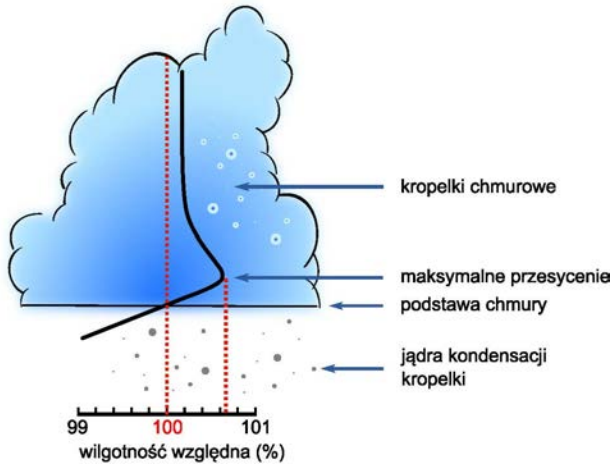
1. Opis procesów powstawania i ewolucji cząstek chmurowych

Aby w powietrzu powstała woda w postaci ciekłej, para wodna musi osiągnąć co najmniej stan nasycenia. Ilość pary wodnej obecnej w powietrzu opisuje się podając wartość nasycenia (inaczej wilgotność względną). W procesie powstawania chmury istotne jest rozważenie bilansu pary wodnej. Wzrost nasycenia pary wodnej może być osiągnięty w wyniku ochładzania związanego ze wznoszeniem (konwekcją) lub wychładzaniem radiacyjnym. Z kolei kondensacja prowadzi do zmniejszenia nasycenia. Zmiany nasycenia w czasie w chmurze konwekcyjnej można zapisać w postaci

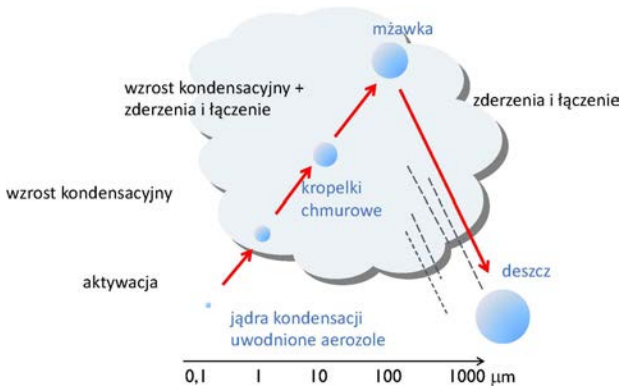
$$\frac{dS}{dt} = Q_1 w - Q_2 \frac{dq_c}{dt}, \quad (1)$$

gdzie Q_1 i Q_2 są zmiennymi termodynamicznymi zależnymi od temperatury i ciśnienia ([6] i w wersji polskiej [5]), w jest prędkością ruchu wznoszącego, dq_c/dt oznacza szybkość kondensacji wyrażoną jako zmiana w czasie masy skroplonej wody w jednostce masy powietrza (q_c). Pierwszy człon po prawej stronie w równaniu (1) nazywa się członem produkcyjnym (P) związanym z ochładzaniem w wyniku rozprężania podczas ruchu pionowego, na skutek czego następuje wzrost nasycenia. Drugi człon zwany członem kondensacyjnym (K) opisuje zmniejszenie się wartości nasycenia w wyniku kondensacji pary wodnej. W chmurze konwekcyjnej w trakcie ruchu pionowego człon produkcyjny (P) początkowo dominuje, a w miarę wzrostu rozmiarów kropelek człon kondensacyjny (K) zaczyna odgrywać coraz większą rolę. Profil nasycenia przedstawiono schematycznie na ryc. 4. Wysokość, na której nasycenie osiąga wartość 100%, uznaje się za podstawę chmury; 15-30 m nad podstawą chmury nasycenie osiąga wartość maksymalną, a następnie spada i utrzymuje się na stałym poziomie lekko przekraczającym 100 %.

W kolejnych rozdziałach omówione zostaną procesy fizyczne odpowiadające za tworzenie się i ewolucję cząstek chmurowych. Rozróżnienie pomiędzy różnymi cząstkami stanowiącymi chmurę wynika z ich rozmiarów oraz procesów fizycznych, którym są poddane



Ryc. 4. Schematyczny obraz zmiany nasycenia pary wodnej w chmurze konwekcyjnej (ilustracja autorstwa Katarzyny Nurowskiej)



Ryc. 5. Schematyczny obraz mikrofizycznych procesów chmurowych; orientacyjne rozmiary cząstek chmurowych

(ryc. 5). Powszechnie stosowana jest następująca terminologia. *Jądra kondensacji* to cząstki aerozolu atmosferycznego, które umożliwiają kondensację pary wodnej w atmosferze, mające rozmiary rzędu 0,1 μm . To na nich powstają *kropelki*. Tylko część kropelek zostaje aktywowana i staje się *kropelkami chmurowymi*, ich typowe rozmiary są rzędu 10 μm . Kropelki chmurowe rosną na skutek kondensacji. Kiedy osiągną większe rozmiary, mogą zacząć zderzać się i łączyć prowadząc do powstania dużo większych *kropelek*, które nazywamy *kroplami mżawki* (rozmiary rzędu 100 μm) oraz *kroplami deszczu* (rozmiary rzędu 1 mm).

1.1. Tworzenie kropelek chmurowych; aktywacja

Kropelki w atmosferze powstają w wyniku *nukleacji*. Nukleacja jest procesem, w trakcie którego pojawia się stabilny element nowej fazy w substancji zawierającej początkowo tylko jedną fazę (np. kropelka wody w polu pary wodnej). W atmosferze realizowana jest nukleacja heterogeniczna. Zachodzi ona w obecności obcej substancji, która zmniejsza barierę potencjału dla nukleacji. Substancje, na których zachodzi nukleacja, nazywane są *jądrami kondensacji*. Nasycenie pary wodnej będącej

w równowadze z kropelką wody o promieniu r , powstałą na jądrze kondensacji, jest inne niż równowagowe ciśnienie nasycenia nad płaską powierzchnią czystej wody, które wynosi 1 (odpowiada to wilgotności względnej równej 100%). Opisywane jest *krzywą Köhlera*

$$S_{eq}(r, r_d, \kappa) = a_w(r, r_d, \kappa) \exp\left(\frac{A(T)}{r}\right). \quad (2)$$

Człon $\exp(A(T)/r)$, zwany *członem Kelvina*, odpowiada za wzrost nasycenia równowagowego nad zakrzywioną powierzchnią, w tym przypadku nad kropelką o promieniu r . Czynniki A zależy od temperatury i dany jest wyrażeniem

$$A(T) = \frac{2\sigma}{R_v T \rho_l}, \quad (3)$$

gdzie σ oznacza napięcie powierzchniowe między fazą ciekłą i gazową, R_v – indywidualną stałą gazową dla pary wodnej, ρ_l – gęstość wody, T – temperaturę.

Człon a_w w równaniu (2) jest *aktywnością*, która zależy od ilości i własności rozpuszczonej substancji (jader kondensacji)

$$a_w(r, r_d, \kappa) = \frac{r^3 - r_d^3}{r^3 - (1 - \kappa)r_d^3}. \quad (4)$$

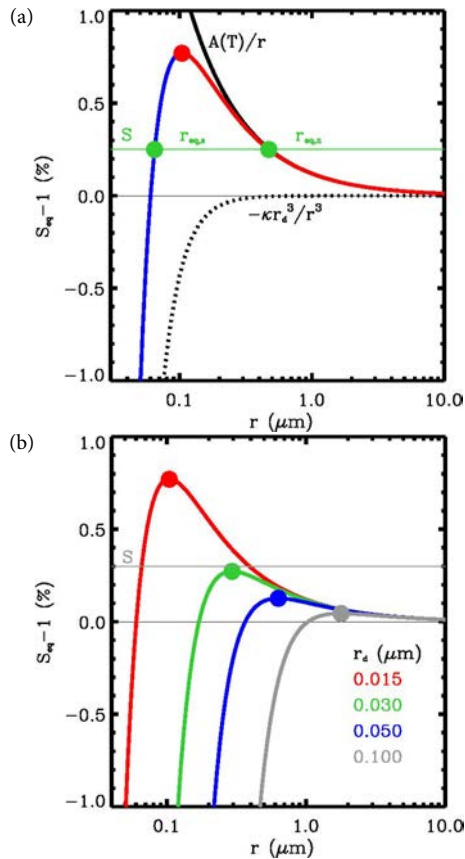
Ilość rozpuszczonej substancji określa się wartością *promienia suchego* r_d , czyli promienia kuli, której masa odpowiada masie jądra kondensacji, na którym tworzy się kropelka. Własności rozpuszczonej substancji opisane są parametrem higroskopijności κ [3]. Większość substancji obecnych w atmosferze, które mogą służyć za jądra kondensacji, charakteryzuje się wartościami $\kappa > 0,2$. Obecność substancji rozpuszczonej w kropelce zmniejsza wartość nasycenia równowagowego.

Krzywa Köhlera (2) oraz jej składowe (człon Kelvina (3) i aktywność (4) - pokazane są na ryc. 6a. Bardzo często zamiast nasycenia S używa się pojęcia *przesylenia*, $S - 1$, tj. nadwyżki nasycenia ponad stan równowagi dla płaskiej powierzchni czystej wody. Przesylenie najczęściej jest wyrażane w procentach (ryc. 6). Maksimum krzywej Köhlera wyznacza parametry aktywacji – promień aktywacji (r_{act}) i nasycenie aktywacji (S_{act}). Parametry te jest łatwo wyznaczyć, jeśli równanie (2) rozwinie się w szereg (rozwiniecie to jest poprawne dla r niewiele większych niż kilkukrotność r_d)

$$S_{eq}(r, r_d, \kappa) = 1 + \frac{A(T)}{r} - \frac{\kappa r_d^3}{r^3}, \quad (5)$$

$$r_{act} = \sqrt{\frac{3\kappa r_d^3}{A}}, \quad S_{act} = 1 + \sqrt{\frac{4A^3}{27\kappa r_d^3}}. \quad (6)$$

Kropelki o promieniach $r < r_{act}$ znajdują się w równowadze stałej, dla $r > r_{act}$ kropelki są w równowadze chwiejnej. Kropelki o promieniach większych niż ich



Ryc. 6. (a) Krzywa Köhlera (niebieska i czerwona linia). Na osi pionowej pokazane jest przesylenie wyrażone w procentach. Czarna ciągła linia to wkład związany z zakrzywieniem powierzchni kropli (3), linia przerywana obrazuje aktywność (4). Maksimum krzywej Köhlera (oznaczone czerwoną kropką) wyznacza parametry aktywacji: promień aktywacji r_{act} i przesylenie aktywacji $S_{act} - 1$. Niebieskim kolorem oznaczono obszar równowagi stałej, a czerwonym – obszar równowagi chwiejnej (niestabilnej). Rysunek został sporządzony dla następujących wartości parametrów: $T = 273,15$ K, $r_d = 0,015$ μm , $\kappa = 1,28$. (b) Krzywa Köhlera dla różnych wartości promienia suchego; kropkami zaznaczono parametry aktywacji

promień aktywacji, r_{act} , nazywamy *kropelkami chmurowymi*. Fakt przejścia kropelek z reżimu równowagi stałej do reżimu równowagi chwiejnej nazywa się *aktywacją kropelek*. Na rycinie 6b widzimy krzywe Köhlera dla różnych wartości suchego promienia jądra kondensacji i ustalonej wartości parametru higroskopijności κ . Im większy promień suchy, tym nasycenie aktywacji jest mniejsze, a wartość promienia aktywacji jest większa. Dla dużych promieni kropelek wartość nasycenia równowagowego zbiega asymptotycznie do jedynki, czyli wartości nasycenia równowagowego nad płaską powierzchnią czystej wody. Dla kropelek o promieniu większym niż ~ 10 μm można przyjąć, że nasycenie równowagowe jest równe jeden. Nie wszystkie kropelki utworzone na jądrach kondensacji stają się kropelkami chmurowymi. Tylko kropelki, dla których nasycenie aktywacji jest mniejsze lub równe aktualnemu nasyceniu w otoczeniu, ulegają aktywacji i stają się kropelkami chmurowymi. Analizując ryc. 6b można powiedzieć, że jeśli przesylenie w otoczeniu wynosi 0,4%, tylko kropelki utworzone na jądrach kondensacji o promieniach suchych

$r_d \geq 0,3$ μm staną się kropelkami chmurowymi. Widać zatem, że to, co dzieje się z kroplami, zależy zarówno od rozmiarów i rodzaju jąder kondensacji (promień suchy r_d , parametr higroskopijności κ), jak i od warunków nasycenia w otoczeniu. Można wyróżnić trzy charakterystyczne reżimy:

- $S \leq 1$: Jeśli w otoczeniu nasycenie (S) jest mniejsze lub równe 1 (wilgotność względna mniejsza lub równa 100%) istnieje tylko jeden punkt równowagi. Kropelki będące w równowadze z otoczeniem mają taki rozmiar, aby $S_{eq}(r, r_d, \kappa) = S$. Bardzo małe kropelki mogą zatem pozostawać w równowadze z otoczeniem przy wilgotności względnej mniejszej niż 100%; przykładem są kropelki mgły. Kropelki takie nie zmieniają swojego rozmiaru, chyba że wilgotność względna w otoczeniu ulegnie zmianie. Wówczas dostosowują swój rozmiar do zmienionych warunków w otoczeniu. W takich warunkach żadna z kropelek nie stanie się kropelką chmurową.
- $S > S_{act}$: Nasycenie w otoczeniu jest większe niż nasycenie aktywacji ($S > S_{act}$). Niezależnie od rozmiaru kropli ich nasycenie równowagowe jest mniejsze niż nasycenie w otoczeniu; krople będą rosły w wyniku kondensacji.
- $1 < S < S_{act}$: Istnieją dwa punkty równowagi (ryc.6a). $r_{eq,s}$ odpowiada równowadze stałej, $r_{eq,n}$ – równowadze chwiejnej. Krople o rozmiarach $r < r_{eq,s}$ będą rosły w wyniku kondensacji aż do osiągnięcia punktu równowagi stałej ($r = r_{eq,s}$). Krople o rozmiarach $r < r_{eq,n}$ będą parować i dążyć do osiągnięcia punktu równowagi ($r_{eq,s}$), gdyż nasycenie w otoczeniu jest mniejsze niż ich nasycenie równowagowe. Krople o promieniach $r > r_{eq,n}$ będą rosły poprzez kondensację, nawet jeśli nasycenie w otoczeniu pozostanie stałe.

Aktywacja kropelek jest jednym z istotniejszych procesów tworzenia chmury. To ona odpowiada za to, jak duże są kropelki chmurowe oraz ile ich jest. Jest zatem odpowiedzialna za całą mikrofizykę na początkowym etapie tworzenia chmury. Jak ważne jest ustalenie koncentracji i rozmiarów kropelek chmurowych można zilustrować spektakularnymi zdjęciami satelitarnymi, na których widać ślady statków płynących pod cienką warstwą chmur i w miejscach, gdzie statki dostarczyły do atmosfery dodatkowych jąder kondensacji (produkty spalania), chmura jest jaśniejsza, czyli odbija więcej promieniowania słonecznego. Dzieje się tak dlatego, że większa liczba jąder kondensacji skutkuje większą liczbą aktywowanych kropelek chmurowych. Przy tej samej zawartości wody w chmurze rozmiary kropelek będą mniejsze. Taka chmura, często nazywana „chmurą zanieczyszczoną” będzie odbijała więcej widzialnego promieniowania słonecznego.



Ryc. 7. Widoczne ślady statków na Północnym Pacyfiku w dniu 04.03.2009 (Obraz z czujnika MODIS umieszczonego na satelicie NASA <https://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=3667>). Na jednorodnej (na oko) warstwie chmur występują dużo jaśniejsze linie. To ślady statków. Ich produkty spalania to *de facto* jądra kondensacji. Wzdłuż trajektorii statków zwiększona liczba jąder kondensacji pozwala na stworzenie chmury, w której koncentracja kropelek jest większa, a ich rozmiary mniejsze. Taka chmura odbija więcej promieniowania słonecznego, niż chmura o mniejszej liczbie, ale większych kropelek

1.2. Kondensacyjny wzrost kropelek chmurowych

Kropelki utworzone w wyniku nukleacji heterogenicznej rosną na skutek kondensacji pary wodnej. Odległość pomiędzy pojedynczymi kropelkami w chmurze jest co najmniej 10 razy większa niż rozmiar kropelek. Można zatem przyjąć, że obecność sąsiadujących kropelek nie ma wpływu na procesy zachodzące w skali pojedynczej kropelki. Opis wzrostu kondensacyjnego zawiera dwa elementy: dyfuzję pary wodnej w kierunku do kropki oraz przeciwnie skierowaną dyfuzję ciepła uwolnionego w procesie kondensacji. Bardzo dobre analityczne (aczkolwiek przybliżone) rozwiązanie problemu wzrostu kondensacyjnego pojedynczej kropelki w jednorodnym polu pary wodnej opisywane jest równaniem, znanym jako równanie Maxwella–Masona

$$\frac{dr}{dt} = D \frac{S - S_{eq}(r, r_d, \kappa)}{r}, \quad (7)$$

gdzie S – nasycenie pary wodnej w okolicy kropelki, $S_{eq}(r, r_d, \kappa)$ – nasycenie równowagowe nad powierzchnią kropelki (2), D – człon opisujący dyfuzję pary wodnej oraz ciepła zależny od temperatury i stosunkowo słabo od ciśnienia [4, 6]. Jeśli nasycenie w otoczeniu jest większe niż nasycenie równowagowe dla danej kropelki ($S > S_{eq}(r, r_d, \kappa)$) wówczas rośnie ona w wyniku kondensacji, w przeciwnym przypadku zmniejsza swój rozmiar w wyniku parowania.

Rozwiązanie równania (7) jest proste, jeśli zaniebamy fakt, że przesycenie równowagowe dla kropelek (S_{eq}) jest różne od jedynki. Założenie to jest prawdziwe dla kropelek o rozmiarach większych niż ok. 10 μm (ryc. 6b). Przyjmijmy na chwilę, że $S_{eq} = 1$ dla wszystkich aktywowanych kropelek oraz że warunki termodynamiczne nie zmieniają się w czasie (czyli $D = \text{const}$). Wówczas $dr/dt \sim 1/r$ oraz

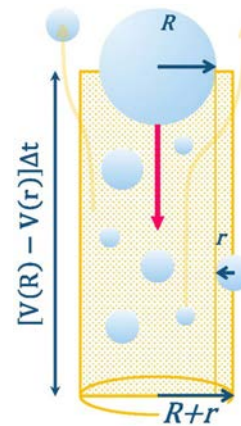
$$r(t) = \sqrt{r_0^2 + 2\xi t}, \quad (8)$$

gdzie r_0 to promień kropki w chwili początkowej, $\xi = D \cdot (S - 1)$. Małe kropelki rosną szybciej niż duże. Im większa kropla, tym szybkość jej wzrostu jest coraz mniejsza. W rezultacie, w wyniku kondensacji rozkład rozmiarów kropelek chmurowych ulega zwężeniu. W rzeczywistości szybkość wzrostu kropelek chmurowych nieco różni się od tego uproszczonego obrazu, jeśli w równaniu (7) uwzględnimy zależność nasycenia równowagowego od wielkości kropelek oraz parametrów opisujących jądra kondensacji, na których powstały krople (promień suchy r_d oraz parametr higroskopijności κ). Ma to bardzo istotne znaczenie dla kropelek mniejszych niż ok. 10 μm .

Zgodnie z (8) czas potrzebny do wzrostu kropli o promieniu 10 μm do rozmiaru typowego dla kropli mżawki (100 μm) lub opadu (ok. 1 mm) wynosi od kilku do kilkunastu godzin. Obserwacje pokazują, że opad w chmurze konwekcyjnej tworzy się dużo szybciej. Jaki jest zatem mechanizm jego powstawania?

1.3. Wzrost kropelek w wyniku zderzeń

Omówimy tu mechanizm zderzeń między kropelkami chmurowymi, który jest głównym procesem prowadzącym do powstania opadu w chmurze, czyli kropelek na tyle dużych, żeby mogły wypaść z chmury i dotrzeć do powierzchni ziemi w postaci opadu.



Ryc. 8. Schemat ilustrujący grawitacyjne zderzenia kropelek. Kolorem żółtym zaznaczono obszar, z którego wymywane są kropelki przez spadającą kroplę o promieniu R . Ze względu na oddziaływania hydrodynamiczne część kropelek z tego obszaru porusza się po trajektoriach (pokazanych żółtymi liniami zakończonymi strzałkami), które pozwalają im uniknąć zderzenia z dużą kroplą

Kropelki chmurowe widziane z daleka wydają się być zawieszony w powietrzu. W rzeczywistości kropelki poruszają się z prędkością zależną od wielu czynników, z których najważniejszym jest ich rozmiar. Prędkość opadania małych kropelek w polu grawitacyjnym jest praktycznie zaniedbywalna. Kropelka o promieniu 10 μm porusza się z prędkością mniejszą niż 1 cm/s. Prędkość ta szybko rośnie i dla kropli o rozmiarze ok. 100 μm osiąga wartość 1 m/s. Aby dwie kropelki mogły się ze

sobą zderzyć, ich względna prędkość opadania musi być niezerowa. Można przyjąć, że dopiero krople o rozmiarach 10-20 μm mogą zacząć się zderzać z praktycznie nieruchomymi mniejszymi kropelkami.

Opis procesu zderzeń i łączenia się kropelek jest skomplikowany. Na rycinie 8 pokazano schematycznie kroplę o promieniu R poruszającą się w powietrzu zawierającym wiele kropelek o mniejszych promieniach r . W jednostce czasu większa kropla będzie mogła się zderzyć z kropelkami, które znajdują się w objętości wyznaczonej przez walec, który ma podstawę o promieniu $R + r$ i wysokość $[V(R) - V(r)] \Delta t$, gdzie $V(R)$ i $V(r)$ oznaczają prędkości poruszania się kropelek odpowiednio o promieniach R i r . Tempo zmiany masy kropli o promieniu R poruszającej się w polu kropelek o jednakowych promieniach r i koncentracji N można opisać równaniem

$$\frac{dM}{dt} = \pi(R+r)^2 [V(R) - V(r)] N \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_l \right), \quad (9)$$

gdzie M to masa kropli o promieniu R , ρ_l – gęstość wody, $\pi(R+r)^2 [V(R) - V(r)]$ – objętość walca, z którego w jednostce czasu wymywane są krople (ryc. 8). W rzeczywistości obraz ten jest bardziej skomplikowany. Spadająca kropla generuje przepływ powietrza i na skutek oddziaływań hydrodynamicznych część kropelek znajdujących się w walcu jest „wymieciona” na zewnątrz i nie zderza się z dużą kroplą. Dodatkowo nie każde zderzenie musi skończyć się połączeniem kropelek. Można zdefiniować dwa parametry: wydajność zderzeń i wydajność łączenia się. Parametry te określa się na podstawie eksperymentów laboratoryjnych oraz szczegółowych symulacji numerycznych. Wydajność łączenia się jest szczególnie trudna do określenia. W fizyce chmur przyjmuje się, że wydajność łączenia wynosi jeden, a odstępstwo od jedynki włączone jest w niepewność, z jaką określa się wydajność zderzeń. Objętość walca, z którego wymywane są krople należy zatem pomnożyć przez tak określoną wydajność zderzeń, $E(R, r)$. Otrzymujemy wielkość zwaną jądrem zderzeniowym, które w przypadku zderzeń grawitacyjnych przyjmuje postać

$$K(R, r) = \pi(R+r)^2 [V(R) - V(r)] E(R, r). \quad (10)$$

Im większa różnica rozmiarów kropelek, tym większa jest wartość jądra zderzeniowego. Postać jądra zderzeniowego $K(R, r)$, wyprowadzona dla bardzo prostego przypadku zderzeń grawitacyjnych (ryc. 8 oraz (10)) w wielu zastosowaniach przyjmuje inne formy, które opisują poprawniej zjawisko zderzeń. Analiza różnych jąder zderzeniowych nie jest jednak tematem niniejszego artykułu.

Jeśli w walcu, z którego wymywane są małe krople, rozkład ich rozmiarów określony jest funkcją gęstości rozkładu $n(r)$ taką, że $N = \int n(r) dr$, wówczas równanie

tempa wzrostu masy dużej kropli przyjmuje postać

$$\frac{dM}{dt} = \int \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_l \right) K(R, r) n(r) dr. \quad (11)$$

W przeciwieństwie do wzrostu kondensacyjnego kropelek, kiedy to zmianie ulega tylko rozmiar kropelek, w wyniku zderzeń następuje zmiana zarówno rozmiaru, jak i liczby kropelek. Weźmy kroplę o objętości x ($x = 4/3 \pi r^3$). Liczba kropelek o objętości x , $n(x)$, zwiększa się w efekcie zderzenia dwóch kropelek o objętościach $x - y$ oraz y . Jeśli natomiast kropla o objętości x zderzy się z jakąkolwiek inną kroplą, wówczas $n(x)$ zmniejszy się.

Tempo zmiany koncentracji kropelek o objętości x opisane jest równaniem

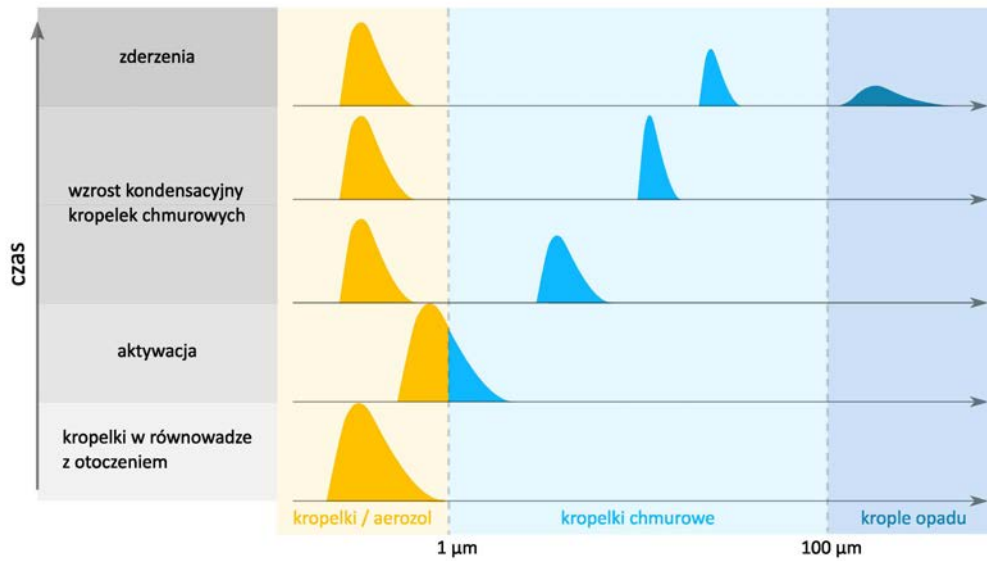
$$\frac{\partial n(x, t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_0^x n(x-y, t) n(y, t) K(x-y, y) dy - n(x, t) \int_0^\infty n(y, t) K(x, y) dy. \quad (12)$$

W fizyce chmur powyższe równanie nazywane jest równaniem Smoluchowskiego, ponieważ wykorzystano tu stochastyczne równanie koagulacji, które jako pierwszy sformułował Marian Smoluchowski w 1916. Pierwszy człon po prawej stronie opisuje wzrost koncentracji kropelek o objętości x w wyniku zderzenia dwóch kropelek o objętościach $x - y$ i y . Drugi człon po prawej stronie równania opisuje zmniejszenie koncentracji w wyniku zderzeń kropli o objętości x z dowolną inną kroplą. Równanie (12) często błędnie nazywane jest w fizyce chmur równaniem stochastycznym. W rzeczywistości nie ma w nim żadnego elementu stochastycznego. Jest to równanie deterministyczne.

Przedstawiona powyżej metoda opisu wzrostu wynikającego ze zderzeń opisuje zachowanie całej populacji kropelek. Aby opisać, jaki jest efekt zderzenia pojedynczych kropelek, potrzebna byłaby szczegółowa informacja o położeniu kropelek w każdej chwili czasu; wiedza praktycznie niemożliwa do uzyskania.

1.4. Jak szybko powstaje opad

Powyższy opis podstawowych procesów wzrostu kropelek w rzeczywistości nie następuje sekwencyjnie. Na rycinie 9 przedstawiono schematycznie, jak ewoluuje rozkład rozmiarów cząstek uczestniczących w tworzeniu chmury konwekcyjnej. Rycina ta jest dopełnieniem ryc. 5. Początkowo w atmosferze mamy krople, które powstają na aerozolach stanowiących jądra kondensacji. Jądra kondensacji charakteryzują promienie suche, których rozkład rozmiarów określa funkcja $n_a(r_a)$; całkowita liczba jąder kondensacji wynosi N_a . Dla uproszczenia obrazu przyjmijmy, że wszystkie aerozole charakteryzowane są takim samym współczynnikiem higroskopijności κ . W warunkach wilgotności w otoczeniu mniejszej niż 100%, na jądrach

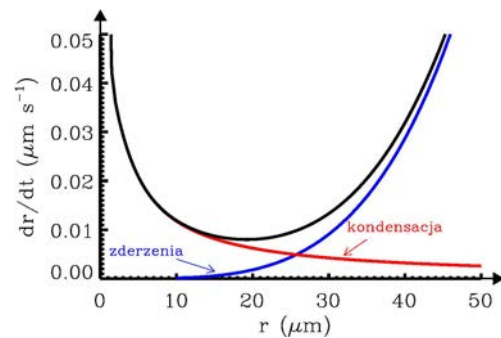


Ryc. 9. Schematyczny obraz ewolucji rozmiarów kropek podzielonych na trzy kategorie: *kropelki* znajdujące się w równowadze z otoczeniem w warunkach nasycenia (wilgotności względnej) mniejszej niż 100%. Część kropek ulega aktywowacji się i staje się *kroplami chmurowymi*. Krople o rozmiarach większych niż 100 µm nazywamy *kroplami opadu* (ilustracja autorstwa Katarzyny Nurowskiej)

kondensacji tworzą się kropelki, które pozostają w równowadze z otoczeniem. Kropelki będą charakteryzowane rozkładem rozmiarów $n(r)$ i całkowitą liczbą N . W miarę wzrostu nasycenia aktywowane są kropelki, dla których nasycenie aktywacji jest mniejsze od nasycenia maksymalnego (ryc. 4). Inne krople pozostaną w stanie równowagi. Kropelki chmurowe charakteryzuje rozkład $n_c(r)$, całkowita liczba N_c oraz zawartość wody ciekłej q_c (masa kropek chmurowych w jednostce objętości powietrza $q_c = \frac{4}{3}\pi\rho_l \int r^3 n(r) dr$). Kropelki chmurowe rosną w wyniku kondensacji. Z uwagi na to, że małe kropelki chmurowe rosną szybciej niż duże, rozkład rozmiarów staje się coraz węższy. Istnieją mechanizmy, które powodują, że niektóre kropelki chmurowe mogą urosnąć szybciej niż pozostałe i wtedy zaczynają się zderzać z tymi mniejszymi. Efektem zderzeń są bardzo szybkie zmiany rozmiarów powstających kropek (masa nowo powstałej kropli jest sumą mas zderzających się kropek). W ten sposób pojawiają się nagle krople o rozmiarach większych niż ok. 100 µm. Opisuje się je podając parametry: $n_r(r)$, N_r i q_r . Podział na kropelki, kropelki chmurowe i krople opadowe jest istotny. Przejście z jednego obszaru do drugiego wyznacza mikrofizyczne parametry chmury. Jak wiemy, obecność jąder kondensacji jest niezbędna. To one oraz wartość maksymalnego nasycenia wytworzonego tuż nad podstawą chmury decydują, ile będzie kropek chmurowych. Drugim krytycznym punktem jest przejście z obszaru kropek chmurowych do kropek opadowych.

Szybkość procesów zależy przede wszystkim od rozmiarów kropek. Na rycinie 10 pokazano schematycznie szybkość wzrostu kropli o promieniu r w wyniku konden-

sacji oraz zderzeń. Dla bardzo małych kropek dominuje wzrost kondensacyjny; jego tempo bardzo szybko maleje ze wzrostem rozmiarów kropek. Duże rosną praktycznie wyłącznie w wyniku zderzeń. W zakresie rozmiarów 15-25 µm żaden w procesów nie jest wydajny. Bardzo mała szybkość wzrostu w tym obszarze powoduje, że czas potrzebny na stworzenie kropek opadu wynosi od kilku do kilkunastu godzin.



Ryc. 10. Szybkość wzrostu kropek w wyniku kondensacji (czerwona linia) oraz w wyniku zderzeń (niebieska linia). Czarna linia obrazuje szybkość wzrostu kropek w wyniku obu procesów. Widać, że w zakresie rozmiarów 15-25 µm szybkość wzrostu jest najmniejsza

Z obserwacji wynika jednoznacznie, że opad w chmurze może powstać w czasie kilkunastu lub kilkadziesiąt minut. Przedstawiony do tej pory opis procesów jest poprawny, aczkolwiek ich analiza była przeprowadzona przy założeniu szeregu uproszczeń. Przyjęto, że warunki, w których powstają i rosną krople są dla nich wszystkich jednakowe. W rzeczywistości warunki termodynamiczne nie są jednorodne i fluktuują w czasie. Wyzwaniem modelowania chmur jest opis warunków termodynamicznych w połączeniu z precyzyjnym opisem mikrofizyki rzeczywistości.

2. Numeryczny model mikrofizyki chmur

Modelowanie polega na numerycznym rozwiązaniu równań opisujących zmienność parametrów termodynamicznych, dynamicznych i mikrofizycznych.

Powietrze wraz z zawartą w nim parą wodną jest ośrodkiem ciągłym i jego własności są opisywane równaniami stosowanymi w mechanice płynów. Ilość pary wodnej w powietrzu zmienia się w wyniku przemian fazowych. Opis fazy skondensowanej w modelu numerycznym jest przedmiotem niniejszej publikacji. W większości modeli chmur stosowany jest eulerowski opis zarówno powietrza i pary wodnej, jak i fazy skondensowanej. Faza skondensowana w chmurze złożona jest z luźno rozłożonej populacji kropelek, kropelek chmurowych i kropelek opadu. W każdym metrze sześciennym chmury znajduje się około 10^8 cząstek. Opisanie każdej z nich przekracza możliwości współczesnych maszyn obliczeniowych. Tylko modele typu DNS (ang. *Direct Numerical Simulation*), których domena obliczeniowa (obszar, dla którego przeprowadzamy obliczenia) jest rzędu kilku metrów sześciennych, pozwalają na prowadzenie tego typu obliczeń. Modele, które opisują całą chmurę mają siatkę obliczeniową dużo większą; jej rozmiar liniowy jest rzędu co najmniej 10^3 m. Pojedyncze chmury oraz pola chmurowe opisywane są przy użyciu modeli zwanych LES (ang. *Large Eddy Sumulation*), które rozwiązują równania ruchu w skali przestrzennej rzędu setek metrów. Ruch w mniejszych skalach, aż do tej najmniejszej, w której zachodzą procesy mikrofizyczne, jest w pewnym sensie „nielowolnikiem” tego, co dzieje się w wielkich skalach, tzn. jest ich funkcją. Informację na temat parametrów termodynamicznych oraz dynamicznych otrzymujemy tylko w skali pojedynczego oczka siatki obliczeniowej.

Opis fazy skondensowanej w chmurach jest wyzwaniem. W większość modeli chmur stosuje się eulerowski sposób opisu zarówno powietrza i pary wodnej, jak i fazy skondensowanej. Na rycinie 11 przedstawiono całą gamę różnych sposobów eulerowskiego opisu mikrofizyki chmur. Pierwsze modele chmurowe opisywały fazę skondensowaną globalnie za pomocą gęstości jej rozkładu (np. całkowita masa skondensowanej wody w jednostce masy powietrza q_c , tj. *stosunek mieszania*). Woda dzieli się na dwie frakcje: wodę chmurową i wodę opadową. Para wodna w chmurze jest zawsze w stanie nasycenia; każda nadwyżka zostaje zamieniana na wodę chmurową. Woda chmurowa traktowana jest jak ośrodek ciągły. Kiedy wartość q_c przekroczy zadaną wartość graniczną, jej nadwyżka tworzy wodę opadową opisywaną gęstością rozkładu, q_r . W takim podejściu nie uwzględnia się procesu aktywacji, tj. faktu, że kropelki chmurowe tworzą się na jądrach kondensacji. Transformacja wody chmurowej w wodę opadową opisywana jest w sposób odległy od skomplikowanej natury tego procesu. Opisany powyżej model nazywa się jednomomentowym modelem masowym (ang. *single-moment bulk model*). Jeden moment oznacza, że wykorzystywany jest tylko jeden moment rozkładu rozmiarów kropelek w tym wypadku q_c .

W nieco bardziej wyszukany opis mikrofizyki chmur dodaje się informację o całkowitej koncentracji kropelek. Jest to dwumomentowy model masowy (ang. *double-moment bulk model*). Koncentrację kropelek chmurowych N_c określamy na podstawie znajomości całkowitej koncentracji jąder kondensacji N_a oraz aktualnego stanu nasycenia w chmurze S , np. $N_c = N_a S^a$, gdzie a jest parametrem, który w arbitralny sposób jest powiązany z typem aerozolu. Zakłada się, że widmo kropelek chmurowych opisuje funkcja analityczna; najczęściej jest to rozkład logarytmiczno-normalny, którego

	jednomomentowa mikrofizyka	dwumomentowa mikrofizyka	mikrofizyka pudełkowa	dwuwymiarowa mikrofizyka pudełkowa
jądra kondensacji	—	—	$N_c = N_a S^b$	
kropelki chmurowe	q_c	$q_c N_c$	kropelki chmurowe i krople opadu	
krople opadu	q_r	$q_r N_r$		

Ryc. 11. Tabela obrazuje rosnącą złożoność eulerowskich mikrofizycznych schematów numerycznych. Jednomomentowy masowy schemat mikrofizyczny przewiduje wyłącznie proporcje, w jakich mieszają się krople wody (woda w kropelkach chmurowych q_c , woda opadowa, q_r). Dwumomentowy schemat masowy przewiduje dodatkowo całkowite koncentracje N kropelek o danym rozmiarze, co w połączeniu z q umożliwia szacowanie średnich rozmiarów kropelek w odpowiednich kategoriach. Schematy pudełkowe mikrofizyki chmur dzielą krople na klasy rozmiarów, jak pokazano w tabeli. Jeśli chcemy poznać bardziej szczegółowe informacje o kropelkach, to należy wziąć pod uwagę kolejne wymiary (np. 2-D dodaje informację o rozmiarach jąder kondensacji, na których tworzą się kropelki). Na rycinie widzimy ogólne podsumowanie istniejących eulerowskich schematów mikrofizycznych; w rzeczywistości istnieje cały wachlarz ich odmian. [1]

parametry zależą od q_c i N_c . W ten sposób tworzy się funkcję widma rozkładu rozmiarów $n_c(r)$. Woda opadająca tworzy się, podobnie jak poprzednio, wtedy gdy q_c przekroczy pewną wartość graniczną, albo w sposób bardziej skomplikowany zależny zarówno od q_c , jak i N_c .

Aby uwzględnić informację o rozmiarach kropelek chmurowych stosowana jest, wymagająca czasochłonnych obliczeń, spektralna reprezentacja typu *bin microphysics*. Cały zakres rozmiarów kropelek chmurowych i kropel opadu (od najmniejszych rzędu 1 μm do rozmiarów rzędu 1 mm) dzielony jest na klasy/pudełka (ang. *bin*). W danej klasie krople mają przypisany rozmiar charakteryzujący dane pudełko. W wyniku procesów kondensacji i/lub zderzeń, krople „przechodzą” do pudełka, które odpowiada ich nowemu rozmiarowi. Przy takim podejściu nie ma możliwości zawarcia informacji o jądrach kondensacji, na których tworzone są kropelki; niemożliwy jest zatem opis aktywacji kropelek. Podobnie jak w modelu 2-D *bulk* liczba nowo powstających kropelek chmurowych jest zależna od przesycenia w chmurze oraz bardzo ogólnej informacji o jądrach kondensacji. Nowo powstałe kropelki chmurowe są umieszczane w dwóch pudełkach o najmniejszych rozmiarach.

Opisując proces aktywacji należy w modelu *bin* dodać drugi wymiar, czyli stworzyć *dwuwymiarowy model spektralny* (2-D *bin*). W każdej klasie wielkości rozmiarów kropel dodawane jest całe spektrum możliwych rozmiarów jąder kondensacji, na których kropelki są tworzone. Pamiętajmy jeszcze, że jądra kondensacji opisywane są parametrem higroskopijności, który niekoniecznie musi być jednakowy dla wszystkich jąder kondensacji. Tak postawiony problem jest w praktyce bardzo skomplikowany, jego rozwiązanie niezwykle czasochłonne, a jednocześnie obciążony wieloma wadami, z czego jedną z ważniejszych jest bardzo duża dyspersja numeryczna.

W podejściu, które tu prezentujemy faza skondensowana jest opisywana w sposób lagrange’owski, który umożliwia śledzenie pojedynczych cząstek w całej domenie obliczeniowej. Jest to *metoda superkropelek*, która w fizyce chmur została zdefiniowana po raz pierwszy w 2009 roku w pracy [7]. Jedną z niewielu grup na świecie, która z sukcesem rozwija i stosuje lagrange’owską metodę superkropelek (ang. *superdroplets*) do opisu mikrofizyki chmur jest zespół badawczy Mikrofizyka chmur w Instytucie Geofizyki na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (www.igf.fuw.edu.pl/pl/projects/research-groups/mikrofizyka-chmur/).

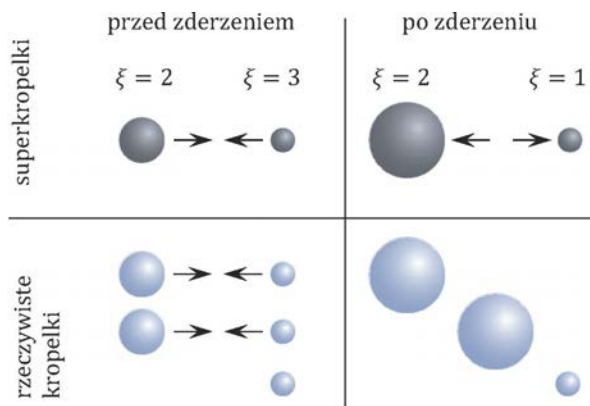
Stworzony przez nas model UWLCM (University of Warsaw Lagrangian Cloud Model) łączy eulerowski opis przepływu powietrza metodą dużych wirów (LES) z lagrange’owskim opisem fazy skondensowanej. W każdym oczku siatki obliczeniowej parametry termodyna-

miczne (ciśnienie, temperatura, zawartość pary wodnej) oraz dynamiczne (prędkość, czyli pole przepływu) zmieniają się w odpowiedzi na procesy zachodzące w danym oczku oraz adwekcję czyli przenoszenie informacji z sąsiednich oczek siatki domeny obliczeniowej. Zawieszone w powietrzu aerozole i krople opisywane są w sposób lagrange’owski. W idealnym przypadku mogłoby to oznaczać, że będziemy śledzić ruch oraz parametry każdej pojedynczej kropli, tzn. jej położenie i prędkość oraz promień suchy jądra kondensacji r_d , parametr higroskopijności κ i aktualny promień r (często używa się określenia *promień mokry*). Zważywszy na ogromną liczbę cząstek oraz liczbę parametrów charakteryzujących cząstkę podejście takie jest niewykonalne. Stąd koncepcja stworzenia *obiektów numerycznych*, które nazywamy superkropełkami. Każda superkropełka opisuje wiele rzeczywistych cząstek charakteryzujących się takimi samymi własnościami (r_d , κ , r). To ile rzeczywistych kropelek chmurowych reprezentuje dana superkropełka opisywane jest parametrem zwanym krotnością ξ . Scharakteryzowana takimi parametrami superkropełka porusza się w domenie obliczeniowej, czyli w każdej chwili czasu znane jest jej położenie i prędkość. Lagrange’owski sposób opisu mikrofizyki w języku superkropełek ma wiele zalet. Koszt obliczeniowy jest dużo mniejszy niż w opisie typu 2-D *bin*. Parametry kropełek mogą się zmieniać w sposób ciągły, zamiast być przypisane do określonej klasy o pewnej zadanej szerokości.

Aby zrozumieć, jak działa mikrofizyczny model superkropełek pokażemy krok po kroku, jak się odbywa inicjacja fazy skondensowanej i w jaki sposób następuje ewolucja na skutek procesu kondensacji oraz zderzeń.

- Ustalamy liczbę superkropełek. Realistyczna jest liczba 100-1000 superkropełek.
- Zaczynamy od rozkładu suchych promieni jąder kondensacji. Najczęściej taki rozkład opisywany jest rozkładem logarytmiczno-normalnym, w którym występuje jeden mod lub dwa mody. Cały zakres rozmiarów (typowo 0,01-1 μm) w skali logarytmicznej dzieli się na liczbę przedziałów równą liczbie superkropełek. W każdym przedziale wybiera się losowo wartość promienia suchego $r_{d,i}$, który będzie reprezentował daną superkropełkę.
- W każdym przedziale określa się krotność superkropełki. Krotność ξ_i jest liczbą jąder kondensacji, które mają rozmiary zawarte wewnątrz danego przedziału.
- W każdym oczku siatki modelu, superkropełki rozmieszczane są losowo i przypisywane jest im położenie x_i .
- Każda z superkropełek otrzymuje taką wartość promienia mokrego r_i , żeby kropelki pozostawały w stanie równowagi z otaczającym powietrzem, które w chwili początkowej w całej domenie jest nienasycone.

- Rozpoczyna się symulacja numeryczna i zmienia się wartość nasycenia w różnych oczkach siatki modelu. Superkropelki reagują na zmieniające się warunki zwiększając swój rozmiar przez kondensację, jeśli nasycenie w otoczeniu jest większe od nasycenia równowagowego dla danej superkropelki, lub zmniejszając swój rozmiar w przeciwnym przypadku. Każda superkropelka zachowuje się dokładnie tak samo jak rzeczywiste kropelki, zatem opisywana jest równaniami (2) i (7).
- Równolegle modelowane są zderzenia między superkropelkami. Każda superkropelka reprezentuje pewną krotność rzeczywistych kropelek i to one, a nie obiekty numeryczne, zderzają się.



Ryc. 12. Schematyczny obraz zderzeń dwóch superkropelki. Dwie superkropelki o krotnościach 2 i 3 zderzają się (lewy górny rysunek). Jest to równoważne zderzeniu dwóch par rzeczywistych kropelek (lewy dolny rysunek). W wyniku zderzenia superkropelka o krotności 2 staje się większa, a krotność drugiej superkropelki maleje z 3 do 1 (prawy górny rysunek). [7]

Przepis na realizację procesu zderzeń i łączenia kropelek jest zasadniczym elementem prezentowanej metody [7]. Tutaj przedstawimy mocno uproszczony przepis, który oddaje jednak jej sedno. Podstawowym założeniem jest, że kropelki w oczku siatki obliczeniowej rozłożone są równomiernie. Najczęściej stosowany scenariusz zderzeń nosi nazwę wszystko albo nic (ang. *all-or-nothing*). W wyniku zderzenia liczba superkropelki nie ulega zmianie. Zmieniają się wyłącznie ich atrybuty (ryc. 12). Jeśli zderzają się dwie superkropelki o promieniach r_i i r_j i krotnościach ξ_i i ξ_j , przy czym $\xi_i > \xi_j$, wtedy ξ_j rzeczywistych kropelek z obu superkropelki zderzy się ze sobą. W rezultacie parametry superkropelki po zderzeniu będą wynosić

$$\begin{aligned} \xi'_j &= \xi_j, & \xi'_i &= \xi_i - \xi_j, \\ r'_j &= (r_i^3 + r_j^3)^{1/3}, & r'_i &= r_i, \end{aligned} \quad (13)$$

gdzie znak *prim* dotyczy parametrów superkropelki po zderzeniu. Podobnie określa się inne parametry, w szczególności wartości promieni suchych.

Prawdopodobieństwo, że dwie rzeczywiste kropelki o promieniach r_i i r_j znajdujące się w objętości V zderzą się w jednostce czasu wynosi $P(r_i, r_j) = K(r_i, r_j)\Delta t/V$, gdzie K jest jądrem zderzeniowym (10). Każda superkropelka reprezentuje pewną krotność rzeczywistych kropelek. Dlatego prawdopodobieństwo zderzeń określa się mnożąc $P(r_i, r_j)$ przez mniejszą krotność wybranych dwóch superkropelki. Jeśli $\xi_i > \xi_j$ wówczas prawdopodobieństwo zderzenia superkropelki o promieniach r_i i r_j wynosi $P^{SK}(r_i, r_j) = \xi_j P(r_i, r_j)$. W każdym kroku czasowym modelu prawdopodobieństwo $P^{SK}(r_i, r_j)$ porównuje się z losowo wybraną liczbą z przedziału $(0, 1)$. Jeśli prawdopodobieństwo jest większe od wylosowanej liczby realizowane jest zderzenie pomiędzy wybranymi superkropelkami i ich nowe atrybuty przyjmują wartości określone w równaniach (13).

Metoda superkropelki jest aktualnie najbardziej kompleksowym opisem mikrofizyki chmur [1, 2].

- Pozwala na opisanie wszystkich etapów tworzenia i ewolucji chmury oraz opadu, a także powiązanie z aerozolami (jądrami kondensacji) obecnymi w atmosferze (ryc. 3).
- Metoda nie wymaga podziału na jądra kondensacji, kropelki, kropleki chmurowe czy krople opadu. Wszystkie cząstki są traktowane w ten sam sposób. Analizując wyniki można poszczególne cząstki przypisać do klasy np. kropelek opadu na podstawie kryterium rozmiaru.
- Przypisując superkropelkom kolejne atrybuty można opisywać i modelować wiele procesów nieomawianych w tym artykule. Przykładami są: reakcje chemiczne zachodzące w kropelkach, tworzenie i ewolucja różnych form lodu, własności elektryczne chmur.
- Precyzja uzyskanych wyników w dużym stopniu zależy od liczby superkropelki, które będą reprezentowały rzeczywiste środowisko, przy czym ta liczba jest ograniczona mocami obliczeniowymi.
- Lagrange'owski charakter metody ułatwia połączenie z różnymi metodami opisu turbulencji, czyli niejednorodności pól termodynamicznych i dynamicznych w pojedynczych oczkach siatki modelu.
- Lagrange'owski opis kropelek pozwala na prowadzenie obliczeń na kartach graficznych, co w istotny sposób wpływa na efektywność obliczeń.

Obecnie nie można jeszcze wykorzystywać lagrange'owskiego opisu mikrofizyki chmur w języku superkropelki w modelach większej skali, jak choćby w modelach prognozujących pogodę w skali regionalnej. Jednak jest on z powodzeniem stosowany w badaniach podstawowych, których wyniki będą pozwalały na znaczny postęp w uproszczonym często opisie ważnych procesów w modelach dużej skali.

Na pytanie postawione w tytule pracy [1] *Modeling of cloud microphysics*. Can we do better? odpowiedź brzmi: aktualnie opis mikrofizyki chmur w języku superkropelek jest tym, co potrafimy robić najlepiej.

Literatura

- [1] Grabowski, W. W., Morrison, H., Shima, S. I., Abade, G. C., Dziekan, P., Pawłowska, H.: Modeling of cloud microphysics: Can we do better?, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100, 655–672, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0005.1>, 2019.
- [2] Morrison, H., van Lier-Walqui, M., Fridlind, A. M., Grabowski, W. W., Harrington, J. Y., Hoose, C., Korolev, A., Kumjian, M. R., Milbrandt, J. A., Pawłowska, H., Posselt, D. J., Prat, O. P., Reimel, K. J., Shima, S.-I., van Diedenhoven, B., and Xue, L.: Confronting the Challenge of Modeling Cloud and Precipitation Microphysics, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, e2019MS001689, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2019MS001689>, e2019MS001689 2019MS001689, 2020.
- [3] Petters, M. D., Kreidenweis, S. M.: A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, <https://doi.org/10.5194/acp-7-1961-2007>, 2007.
- [4] Pruppacher, H. R., Klett, J. D.: *Microstructure of Atmospheric Clouds and Precipitation*, https://doi.org/10.1007/978-94-009-9905-3_2, 1978.
- [5] Rogers, R., Yau, M.: *Zarys Fizyki Chmur*, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, przekład trzeciego wydania anglojęzycznego z 1989 r.
- [6] Rogers, R., Yau, M.: *A Short Course in Cloud Physics*, Elsevier Science, URL <https://books.google.pl/books?id=ClKbCgAAQBAJ>, 1996.
- [7] Shima, S., Kusano, K., Kawano, A., Sugiyama, T., 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, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 135, 1307–1320, <https://doi.org/10.1002/qj.441>, 2009.