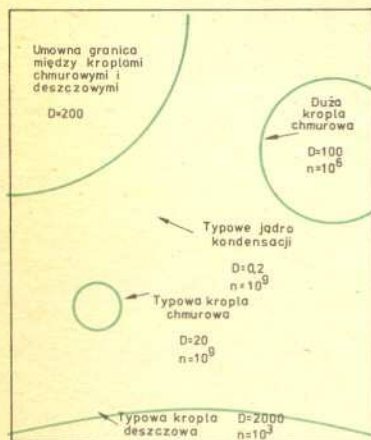


Wiele szczegółów na temat poruszony w tym artykule znajdzie Czytelnik w pasjonującej książeczce Duncana C. Blancharda „Od kropli deszczu do wulkanów” wydanej w serii „Omega”.

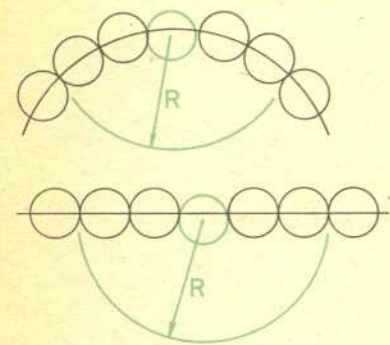
Deszcz

Prof. dr Krzysztof HAMAN



Porównanie średnic (D w μm) i koncentracji (n w m^{-3}) jąder kondensacji, kropli chmurowych i kropli deszczowych. Na uwagę zasługuje duża różnica wielkości typowej kropli chmurowej i deszczowej.

Wpływ napięcia powierzchniowego i substancji rozpuszczonych w wodzie na prężność pary nasyconej możemy sobie wyobrazić następująco. Stan nasyconia występuje wtedy gdy w jednostce czasu na jednostce powierzchni cieczy osadza się tyle samo molekuł wody, co ją opuszcza przechodząc do fazy gazowej. Molekuły opuszczające powierzchnię muszą pokonać siły przyciągania pochodzące od pozostałych molekuł wody (napięcie powierzchniowe). Z rysunku widać, że na powierzchni silnie zakrzywionej siły te będą mniejsze niż na powierzchni płaskiej, bo każda molekula jest w zasięgu działania (R) mniejszej liczby innych molekuł i łatwiej jest jej się „wyrywać” z tej powierzchni

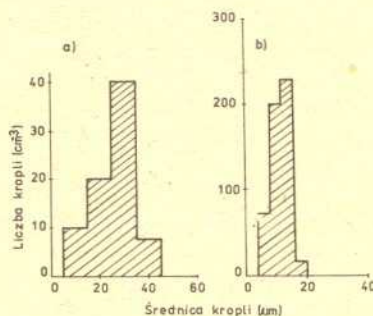


Osiągnięcie równowagi następuje więc przy większym strumieniu molekuł wody dochodzących do powierzchni od strony fazy gazowej, czyli przy większym ciśnieniu pary niż w przypadku powierzchni płaskiej. Z kolei jeżeli część powierzchni cieczy zajmują molekuły substancji rozpuszczonej, to efektywna powierzchnia parującej wody jest mniejsza niż powierzchnia całego roztworu, na której mogą się osadzać molekuły przychodzące od strony fazy gazowej. Oznacza to, że prężność pary, przy której nastąpi równowaga, musi być niższa niż w przypadku czystej wody. Uwagi te dotyczą oczywiście nie tylko wody, ale także wszystkich cieczy i roztworów.

Deszcz jest zjawiskiem tak pospolitym, że na ogół nie zwracamy na niego uwagi..., chyba że psuje nam plany turystyczne lub przeciwnie, gdy jego brak staje się kłeską suszy. Ot, para w powietrzu skrapla się i spada na ziemię. Tymczasem za tym pozornie banalnym zjawiskiem kryją się skomplikowane procesy fizyczne, poznane dokładniej dopiero w ostatnich dziesięcioleciach, a po części stanowiące wciąż zagadkę. Spróbujmy je tu prześledzić — oczywiście w ogromnym skrócie i bez wnikania w szczegóły. A więc po pierwsze, jeżeli ma padać deszcz, to muszą być najpierw chmury. Powstawanie chmur, tych skupisk mikroskopijnych kropelek wody lub kryształków lodu, następuje w wyniku kondensacji zawartej w powietrzu pary wodnej. Kondensacja może nastąpić wtedy, gdy pojawi się przesylenie, tj. ciśnienie pary wodnej przewyższy pewną wartość krytyczną zwaną prężnością pary nasyconej. Wartość tej prężności maleje z temperaturą, wobec czego oziębianie powietrza wraz z zawartą w nim parą powinno doprowadzić do kondensacji. I rzeczywiście tak jest. Przyczyną oziębiania jest najczęściej ruch wstępujący powietrza i związane z nim adiabatyiczne rozprężanie; rzadziej promieniowanie lub inne mechanizmy wymiany ciepła (np. mieszanie czy przewodnictwo). Już od ponad stu lat fizycy wiedzą, że prężność pary nasyconej zależy też od napięcia powierzchniowego i stężenia substancji rozpuszczonych w wodzie. W przypadku mniej niż nanometrowych kropelek, od powstawania których musiałaby się zaczynać kondensacja w atmosferze, wpływ napięcia powierzchniowego jest tak duży, że dopiero przy przesyleniu sięgającym kilkuset procent w stosunku do stanu nasyconia nad płaską powierzchnią wody mogłoby dojść do powstania chmury. Z pomocą przychodzą tu cząstki aerozolu atmosferycznego, a ściślej mówiąc ich rozpuszczalne w wodzie i na ogół higroskopijne części. Na tych tzw. jądrach kondensacji para zaczyna się skraplać czasem już przy 70% wilgotności względnej! Jednakże w miarę jak kropla rośnie stężenie roztworu substancji zawartej początkowo w jądrze kondensacji maleje i prężność pary nasyconej nad kroplą szybko się podnosi. Widać to wyraźnie ze wzoru

$$(1) \quad \delta = \varepsilon - \varepsilon_0 e^{-\frac{L\mu}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) + \frac{2\sigma}{r} \left(1 - \frac{A}{r^3} \right)}$$

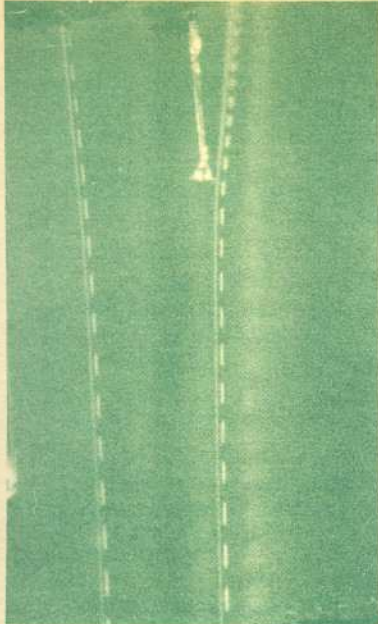
wiązającego z dobrym przybliżeniem przesylenia δ (prędkość kondensacji jest proporcjonalna do przesylenia) z prężnością pary ε , temperaturą absolutną T i promieniem kropli r . ε_0 to prężność pary nasyconej w standardowej temperaturze T_0 , a wielkości R , μ , L , σ i A to odpowiednio: stała gazowa, ciężar cząsteczkowy wody, ciepło utajone parowania, współczynnik napięcia powierzchniowego i stała charakteryzująca wielkość i naturę początkowego jądra kondensacji. Jeżeli wilgotność względna nie różni się zbytnio od 100%, to dla każdego jądra istnieje taki promień kropli r , przy którym $\delta = 0$. W takiej sytuacji kropla znajduje się w równowadze; ani nie rośnie, ani nie maleje. Znacząc liczbę i własności jąder kondensacji oraz wartości ε i T możemy ze wzoru (1) wyznaczyć widmo wielkości kropli w stanie równowagi.



Widmo wielkości kropli to funkcja mówiąca, jak zależy ilość kropli w jednostce objętości od ich średnicy.

Typowe widmo kropli w chmurach: (a) morskich (mała liczba dużych jąder kondensacji), (b) kontynentalnych (duża liczba małych jąder kondensacji)

Niestety, w naturalnych chmurach nie tylko widmo zależy od ε i T , ale i na odwrót, widmo wpływając na przebieg kondensacji samo wpływa na te parametry. Ponieważ wpływają na nie także czynniki dynamiczne (ciśnienie, mieszanie itp.) zależne w pewnym stopniu od ciepła utajonego wydzielanego przy kondensacji, pojawia się tu cały łańcuch zależności i sprzężeń, który jest dość trudno rozplątać. Podjęto jednak taką próbę uzyskując interesujący rezultat; w zwykłych warunkach atmosferycznych

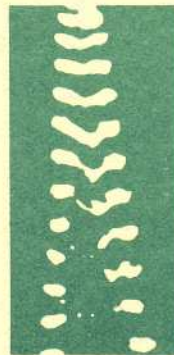


Fot. dr R. Balcer

Małe swobodnie spadające krople o średnicach poniżej $40\ \mu\text{m}$ mają trudności ze zderzaniem się, ponieważ siły aerodynamiczne pomiędzy nimi działają silnie odpychająco. Przy większych rozmiarach kropli efekt ten jest słabszy, a nawet może zmienić znak. Na zdjęciu: tor kropelki o średnicy ok. $20\ \mu\text{m}$ opływającej zawieszoną na cienkim druciku kropelkę o średnicy ok. $85\ \mu\text{m}$. Zdjęcie wykonano przy oświetleniu dwoma źródłami światła, z których jedno działa pulsacyjnie z częstotliwością $1000\ \text{Hz}$. W rezultacie tor kropelki ma postać dwu równoległych linii, z których jedna jest przerywana. Odległość między liniami jest miarą średnicy kropelki, zaś długość przerwy jest odwrotnie proporcjonalna do prędkości.

nie można się spodziewać, by w wyniku kondensacji pojawiły się kropelki o średnicach przekraczających $30\ \mu\text{m}$. Pomiarzy przeprowadzone w chmurach w przeważającej części przypadków (ale nie wszystkich!) potwierdziły ten wniosek. Dalszy wzrost kropelek do rozmiarów kropli deszczowych musi polegać na ich zderzeniu i łączeniu się z sobą. Okazuje się jednak, że tak małe kropelki praktycznie się nie zderzają i powstawanie z nich deszczu trwałoby kilkadziesiąt godzin lub dłużej. A tymczasem zdarza się, że deszcz pada już w kilkanaście minut po rozpoczęciu kondensacji... Fakt ten można by wytłumaczyć, gdyby przyjąć, że istnieją w chmurze krople o średnicy większej niż $40\text{--}50\ \mu\text{m}$. Taka kropla dość łatwo zderza się z typowymi kropelkami chmurowymi i szybko rośnie ich kosztem. W dostatecznie gęstej i grubej chmurze w ciągu paru minut kropla taka może wyrosnąć do średnicy kilku milimetrów. Tak duże krople łatwo się rozpadają na kilka mniejszych, które z kolei same rosną szybko dalej. Uzyskujemy więc typową reakcję łańcuchową. Wystarczy na początek kilka takich większych kropelek na milion „zwyčajnych”, by w ciągu kilku minut spowodować całkiem intensywny deszcz.

Spadające swobodnie krople rozpadają się, jeżeli siły aerodynamiczne (rosnące proporcjonalnie do kwadratu prędkości spadania) stają się większe od sił napięcia powierzchniowego utrzymujących spójność kropli. W przypadku wody następuje to dla kropli o średnicy $5\text{--}7\ \text{mm}$. Mniejsze krople ($2\text{--}3\ \text{mm}$) mogą się rozpaść w wyniku zderzenia z inną kroplą o podobnych rozmiarach. Natomiast bardzo małe krople przy zderzeniu na ogół łączą się ze sobą tworząc krople większych rozmiarów. Proces taki nosi nazwę koalescencji.



Na rysunku (wykonanym na podstawie zdjęcia z tunelu aerodynamicznego) widoczny jest rozpad ogromnej kropli wody (średnica kuli o tej samej objętości co kropla wynosi $9,4\ \text{mm}$) na dwie duże i trzy małe.

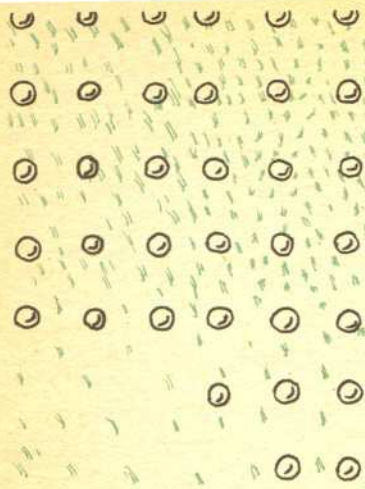
Skąd się jednak mogą brać takie większe krople? Już dość dawno zaczęto podejrzewać, że ich powstawanie może mieć coś wspólnego z zamarzaniem. Jak wiadomo, temperatura w atmosferze spada z wysokością i nawet w lecie na wysokości $3\text{--}4\ \text{km}$ jest niższa od 0°C . Kropelki chmurowe nie zamarzają jednak od razu po przekroczeniu tej temperatury. Na to, żeby zaczął powstawać lód, potrzebne jest najpierw przekroczenie bariery, jaką jest powstanie pierwszych elementów siatki krystalicznej lodu. Jest to na ogół wynik przypadkowego ustawienia się cząsteczek wody w dogodnej konfiguracji, lecz w mikroskopijnej kropelce na takie losowe zdarzenie trzeba bardzo długo czekać, chyba że temperatura jest bardzo niska (w temperaturze -40°C nawet najmniejsze kropelki chmurowe zamarzają niemal natychmiast). Najczęściej proces zamarzania zaczyna się dopiero od kontaktu kropli z tzw. jądrem zamarzania. Jądrami zamarzania bywają unoszące się w powietrzu okruchy różnych minerałów, cząstki organiczne albo po prostu wcześniej powstałe kryształki lodowe. Różne jądra stają się aktywne w różnych temperaturach. Zazwyczaj jednak przy -10° , -20°C znaczna część kropelek chmurowych zamarza.

Wzór (1) jest prawdziwy również dla lodu. Prężność pary wodnej nad lodem jest niższa niż nad przechłodzoną wodą, ponieważ L dla lodu jest o blisko $250\ \text{J/g}$ większe niż dla wody. Lód, przechłodzona woda i para wodna nie mogą być równocześnie w stanie równowagi i kryształki lodu zaczynają szybko rosnać. Proces ten najefektywniej przebiega w temperaturze -10 , -15°C , toteż jeżeli wierzchołek chmury dosięgnie tej temperatury, pojawiające się w nim kryształki lodowe szybko rosną do rozmiarów tak dużych, że łatwo mogą zapoczątkować powstanie opadu. Zostawiając na inną okazję rozważania nad mechanizmem powstawania różnych form gwiazdek śniegowych i ziarenek gradowych oraz różnych form opadu stwierdzimy tu tylko, że tak powstający opad dochodzi do ziemi w postaci śniegu czy gradu lub deszczu w zależności od tego, czy zdoła stopnieć po drodze, czy nie.

Opisany tu mechanizm dominujący w opadach umiarkowanych szerokości geograficznych został ostatecznie rozszyfrowany przez szwedzkiego fizyka atmosfery Tora Bergerona w roku 1933. Szybko się jednak okazało, że nie jest to mechanizm jedyny. W latach drugiej wojny światowej w czasie lotów w chmurach zaobserwowano intensywne deszcze z chmur tropikalnych, których wierzchołki na pewno nie osiągały temperatury 0°C .

W licznych przypadkach udało się stwierdzić, że początek takim opadom dają wyjątkowo wielkie kropelki powstające na tzw. jądrach gigantach o nieprzeciętnie dużej stałej A . Jądra takie powstają z soli morskich w wyniku parowania kropelek pochodzących ze wzburzonych fal morskich. Czasem początek kroplom deszczowym mogą dawać duże cząstki mineralne lub organiczne unoszone z powierzchni ziemi przez wiatr i wciągane do chmur (był przypadek znalezienia w środku gradziny komara). Wiele innych przypadków budzi jednak kontrowersje i wątpliwości. Czy zawodzi nasza teoria kondensacji w chmurach, czy może teoria koalescencji czyli łączenia się kropelek? Stosowane przez nas teorie matematyczne zawierają wiele założeń upraszczających, dotyczących ruchów powietrza, własności

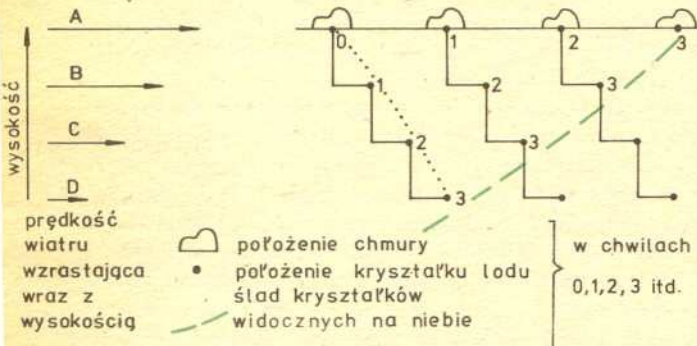
Rozwiązanie zadania astrologa. Najmniejsza liczba N o własnościach podanych w zadaniu ma oczywiście postać $N = 2^k \cdot 3^l \cdot 5^m$. Ponieważ $N/2$ jest kwadratem, to k jest nieparzyste, m , l — parzyste. Ponieważ $N/3$ jest sześcianem, więc k , m dzielą się przez 3, a l daje resztę 1. Ponieważ $N/5$ jest piątą potęgą, więc k , l dzielą się przez 5, a m daje z takiego dzielenia resztę 1. Najmniejsze z takich liczb k , l , m to 15, 10, 6, a zatem najmniejszą liczbą spełniającą warunki króla jest $N = 2^{15} \cdot 3^{10} \cdot 5^6 = 30233088000000$.



statystycznych zbiorów kropelek itp. co może być źródłem błędów. Z drugiej strony pomimo tych uproszczeń otrzymywane równania są bardzo trudne do rozwiązania, nawet czysto numerycznego. W rezultacie na wiele istotnych pytań ilościowych, a nawet jakościowych wciąż nie umiemy odpowiedzieć i co kilka lat pojawiają się próby przedstawienia w tych sprawach nowych hipotez lub teorii. A rzecz ma bardzo istotny aspekt praktyczny. Już ponad 30 lat temu zauważono, że wprowadzając do chmury sztuczne jądra zamrażania można sprowokować wypadanie deszczu z chmur, które skądinąd wcale się do tego nie kwapiły. Natychmiast podjęto próby spożytkowania tego odkrycia do walki z posuchą i gradobiciami i co jakiś czas prasa codzienna przynosi sensacyjne wiadomości o rzekomych sukcesach w tej dziedzinie. Rzecz jednak w tym, że choć sam zabieg „zasiania” chmury nie jest specjalnie skomplikowany, wciąż nie umiemy ustalić, gdzie i kiedy go przeprowadzić, by deszcz spadł tam, gdzie chcemy i w potrzebnej ilości. A trzeba przy tym pamiętać, że np. „przedawkowanie” jąder zamrażania lub ich wprowadzenie w niewłaściwym momencie może dać skutek wręcz przeciwny do zamierzonego; chmura „utrwali się” jako chmura lodowa lub dla odmiany da zwiększony opad gradu. Z drugiej strony coraz obficie wprowadzane do atmosfery zanieczyszczenia przemysłowe zawierają wielkie ilości cząstek aktywnych jako jądra kondensacji i zamrażania. I nikt nie wie, czy i jak może się to odbić na opadach w skali globalnej, a co za tym idzie, na światowej produkcji żywności. Nic więc dziwnego, że badania fizyki chmur i opadów budzą wciąż rosnące zainteresowanie.



Czy zauważyliście, że niektóre chmury mają włosy? Czasem obserwuje się cienkie kosmyki wysokich chmur nazywanych przez meteorologów chmurami *cirrus* (łacińska nazwa *cirrus* = włosy). Kosmyki te są złożone z kryształków lodu (bo chmura jest wysoko i temperatura jest poniżej 0°C), które spadają w powietrzu poruszającym się z prędkością różną od prędkości chmury. Przypatrzcie się rysunkowi.



Chmura poruszając się na poziomie A tworzy w sposób ciągły kryształki lodu, które spadają w dół w obszary, gdzie prędkość wiatru jest mniejsza (poziomy B, C i D). Pojedynczy kryształ będzie się poruszał po trajektorii łączącej punkty 0, 1, 2 i 3 (linia z kropek), natomiast to, co zaobserwujemy w danej chwili na niebie, czyli wszystkie kryształki razem, tworzy linię (w hydrodynamice nazywa się to linią wysnutą) oznaczoną na rysunku kreskami. Patrząc na wysokie chmury *cirrus* możemy wyznaczyć prędkość wiatru na danym poziomie, a z kształtu haczykowatych, lodowych pasemek włosów możemy znaleźć zmiany prędkości wiatrów górnych wraz z wysokością.

— Wzywałeś mnie, Najjaśniejszy Panie?
 — A tak, tak. Przyszło mi do głowy, mój nadworny astrologu, że być może nie zasługujesz na ten chleb, który masz u mnie. Horoskopy ci ostatnio nie wychodzą, o wczorajszym trzęsieniu ziemi też mnie nie powiadomiłeś, ale dam ci jeszcze szansę. Znasz arytmetykę?
 — Nie ma dla mnie tajemnic, o najlaskawszy!
 — No to podaj mi przykład liczby, której połówka jest kwadratem.
 — Królu i panie, to zadanie mi uwłacza.
 — Takis bezzcelny? A zeby jeszcze jej jedna trzecia była szescianem? A widzisz? Co mówisz? Już wiesz? Nie ciesz się, jeszcze twój dalszy chleb na mym dworze nie jest pewny. Na dodatek i jedna piąta tej samej liczby ma być piątą potęgą! No i co powiesz?
 — Daj mi trochę czasu do namysłu, przeswietny władco!
 — Ha, ha, ha, strach ci obleciał, darmożjadzie. No dobrze, wiedz, zem laskawy. Daję ci czas do jutra rana. Albo przyniesiesz tę liczbę, albo ruszaj precz, a i psami poszczuję. Pomozecie, Czytelnicy?

