



**UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE**

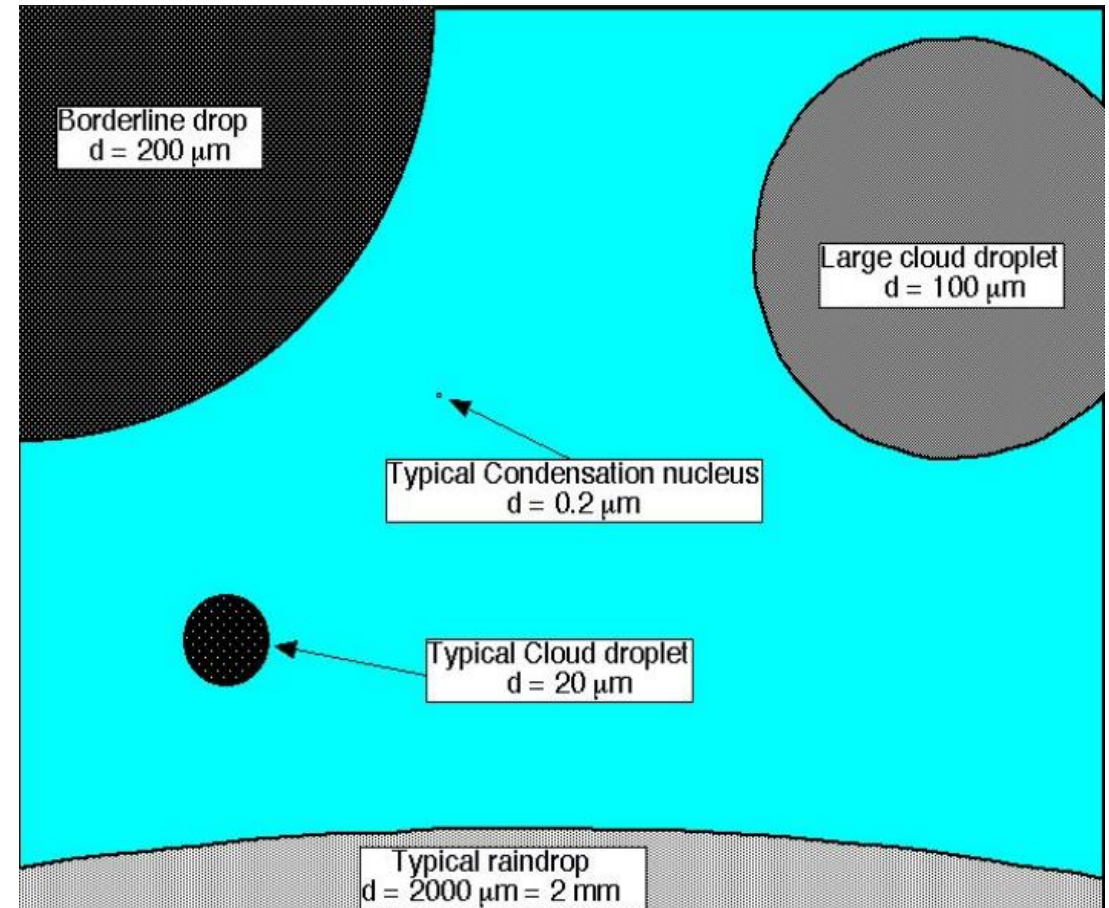
# MICROFISICA DELLE NUBI E PRECIPITAZIONI

Corso di Fisica dell'atmosfera  
Termodinamica e processi alla mesoscala

Dott. Francesco Sioni

# Nubi

- Le **nuvole (nubi)** si formano quando l'aria diventa sovrassatura rispetto all'acqua liquida (o, in alcuni casi, rispetto al ghiaccio) e la condensazione è favorita
- Il meccanismo più comune attraverso il quale si produce la sovrassaturazione nell'atmosfera è il sollevamento di masse d'aria che provocano l'espansione dell'aria e il raffreddamento adiabatico (*per meccanismi di sollevamento vedi slide trigger convezione*)
- In queste condizioni, il vapore acqueo condensa una nuvola di piccole goccioline d'acqua o particelle di ghiaccio.
- Ma come si passa dal semplice vapore a una prima gocciolina di  $0.5 \mu\text{m}$  fino a una goccia di pioggia che arriva a terra di 1-2 mm?



[NASA](#)

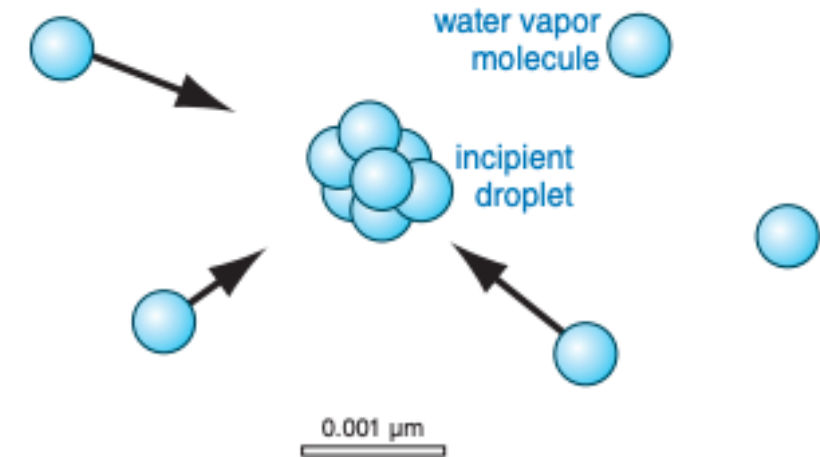
# Nucleazione omogenea

- Si consideri la formazione di una gocciolina d'acqua attraverso la condensazione di aria supersatura pura (aria perfettamente pulita senza alcun tipo di particelle)
- Chiameremo questo processo **nucleazione omogenea**
- Si supponga che una piccola goccia di volume  $V$  e area  $A$  si formi da vapore supersaturo a pressione e temperatura costanti
- Siano  $\mu_l$  e  $\mu_v$  le energie libere di Gibbs (per molecola) in fase liquida e di vapore e  $n$  il numero di molecole d'acqua per unità di volume
- Il decremento nell'energia libera del sistema dovuto alla condensazione sarà  $nV(\mu_v - \mu_l)$
- Per «costruire» la superficie della goccia devo fare lavoro che può essere scritto come  $A\sigma$  dove  $\sigma$  è il lavoro (per unità di area) necessario per creare l'interfaccia liquido-vapore (tensione superficiale)
- La decrescita nell'energia del sistema dovuta alla formazione delle gocce allora sarà

$$\Delta E = A\sigma - nV(\mu_v - \mu_l)$$

- Le minuscole goccioline presentano un rapporto superficie/volume estremamente elevato, pertanto questo costo risulta molto alto per i piccoli agglomerati

a) Homogeneous nucleation



Stull, 2015

# Nucleazione omogenea

- Si può riscrivere uno dei termini con  $e$

$$\mu_v - \mu_l = kT \ln \frac{e}{e_s}$$

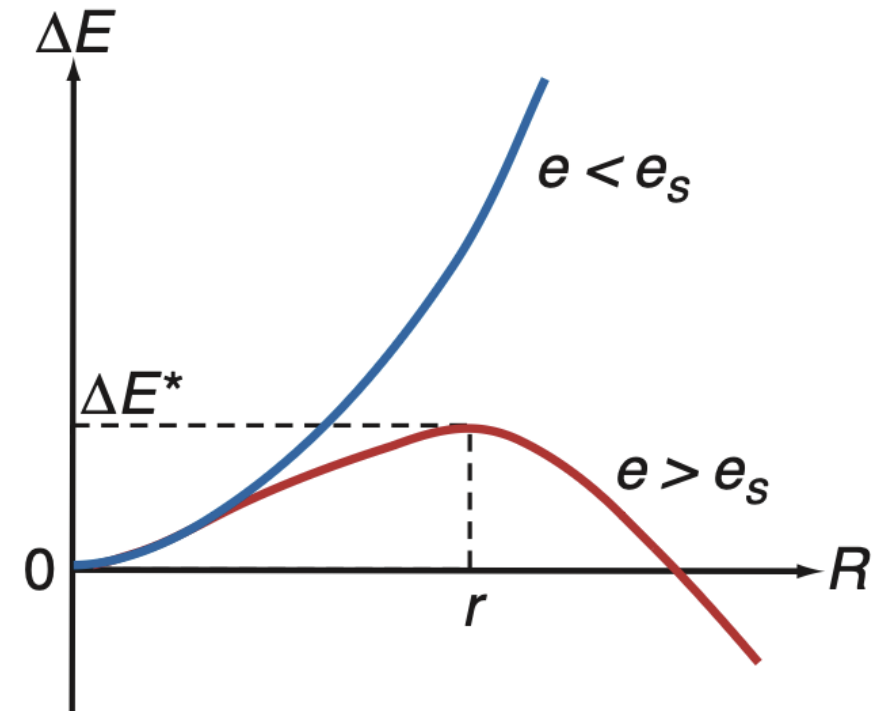
con  $k$  costante di Boltzmann

- $\Delta E = A\sigma - nV(\mu_v - \mu_l) = A\sigma - nVkT \ln \frac{e}{e_s}$

- Per una goccia di raggio  $R$

$$\Delta E = 4\pi R^2 \sigma - \frac{4}{3}\pi R^3 nkT \ln \frac{e}{e_s}$$

- In generale il sistema tenderà a raggiungere un minimo di  $\Delta E$  (processo spontaneo)
- Se non ci sono condizioni di saturazione  $e < e_s$  allora  $\Delta E$  è sempre positivo e aumenta con  $R$
- Se c'è supersaturazione  $\Delta E$  può essere positivo o negativo a seconda di  $R$
- Goccioline in stato embrionale con  $R < r$  tenderanno a evaporare
- Goccioline in stato embrionale che tramite collisioni riescono a raggiungere  $R > r$  cresceranno spontaneamente per condensazione dalla fase di vapore → la gocciolina è attivata



Wallace and Hobbs, 2006

# Nucleazione omogenea

- Si può trovare facilmente (*equazione di Kelvin*) tramite  $\frac{d\Delta E}{dR} = 0$  che

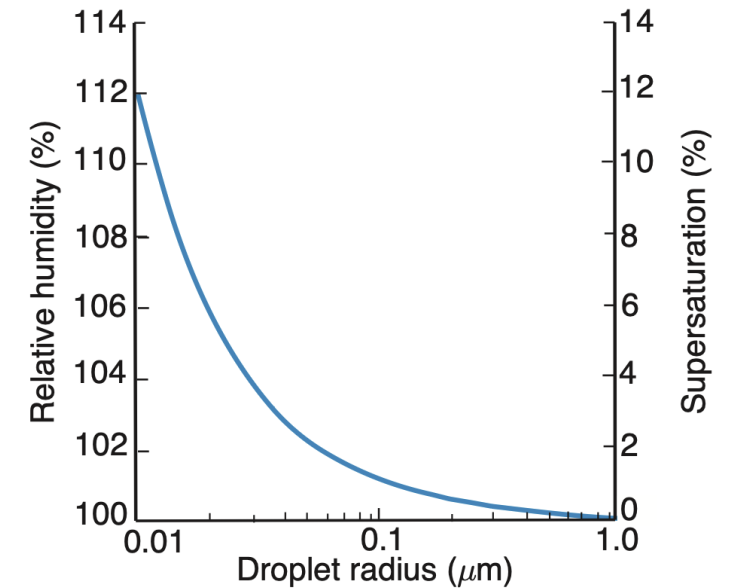
$$r = \frac{2\sigma}{nkT \ln \frac{e}{e_s}}$$

- $\frac{e}{e_s} = \exp\left(\frac{2\sigma}{nkTr}\right)$

- Quest'equazione mi dice che quando una gocciolina si rimpicciolisce la sua pressione di vapor saturo all'equilibrio aumenta

- **Spiegazione intuitiva** (Bohren Albrecht, 1998) :

- $e_s$  sappiamo aumentare con il rate di evaporazione
- Consideriamo una molecola d'acqua sulla superficie di una piccola gocciolina vs. una molecola d'acqua su una superficie d'acqua
- Una molecola d'acqua su una gocciolina avrà minori legami con il liquido e quindi l'evaporazione sarà facilitata
- Ci aspettiamo quindi che il rate di evaporazione aumenti al diminuire della dimensione della gocciolina



**Fig. 6.2** The relative humidity and supersaturation (both with respect to a plane surface of water) at which pure water droplets are in (unstable) equilibrium at 5 °C.

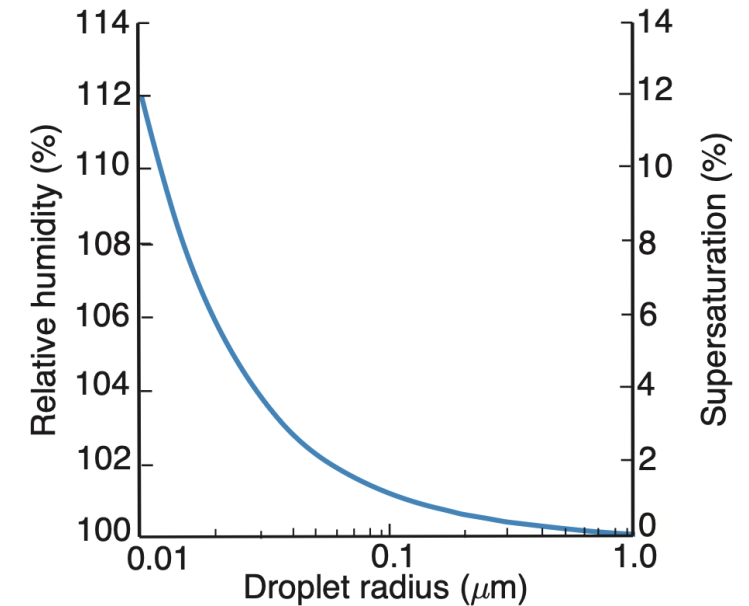
Wallace and Hobbs, 2006

# Nucleazione omogenea

- Si può trovare facilmente (*equazione di Kelvin*) tramite  $\frac{d\Delta E}{dR} = 0$  che

$$r = \frac{2\sigma}{nkT \ln \frac{e}{e_s}}$$

- Quest'equazione ci permette di determinare la pressione di vapore e ( $e > e_s$ ) su una goccia di raggio  $r$  (considero solo  $r > 0$ )
- Con quest'ultimo approccio posso costruire una curva come quella in misura
  - per una goccia di  $1\mu\text{m}$  a  $5^\circ\text{C}$  ho bisogno di una supersaturazione del 0.12%!
  - per una goccia di  $0.01\mu\text{m}$  a  $5^\circ\text{C}$  ho bisogno di una supersaturazione del 12%! → **le goccioline di nube non si formano naturalmente per nucleazione omogenea di acqua pura!**



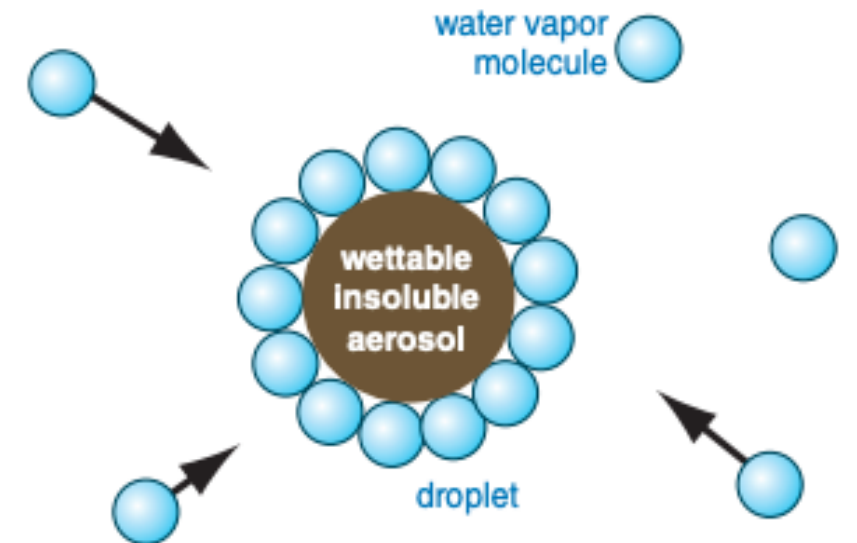
**Fig. 6.2** The relative humidity and supersaturation (both with respect to a plane surface of water) at which pure water droplets are in (unstable) equilibrium at  $5^\circ\text{C}$ .

Wallace and Hobbs, 2006

# Nucleazione eterogenea

- Infatti le goccioline di nube si formano tramite **nucleazione eterogenea** che richiede aerosol atmosferico
- L'atmosfera contiene alcune particelle con dimensioni e forme variabili che hanno la proprietà di essere «wetable» (idrofile/igroscopiche)
- Una superficie è detta idrofila se permette che l'acqua si distribuisca su di essa in un sottile pellicola orizzontale. Idrofoba se l'acqua forma gocce sferiche sulla sua superficie.
- Le particelle con superfici idrofile sono chiamati **nuclei di condensazione** (Cloud Condensation Nuclei CCN)
- Le goccioline possono formarsi e crescere sui CCN a supersaturazioni molto minori che nel caso omogeneo
- Se sufficiente vapore condensa su un CCN di dimensione  $0.3\mu\text{m}$  allora la pellicola d'acqua sarà in equilibrio instabile con aria a supersaturazione di solo 0.4% (vedi figura slide precedente)
- Oltretutto molti CCN sono solubili in acqua. Di conseguenza si sciolgono (del tutto o parzialmente) quando l'acqua condensa su essi → si forma una soluzione (non ho più acqua pura)
- Valutiamo analiticamente gli effetti della soluzione

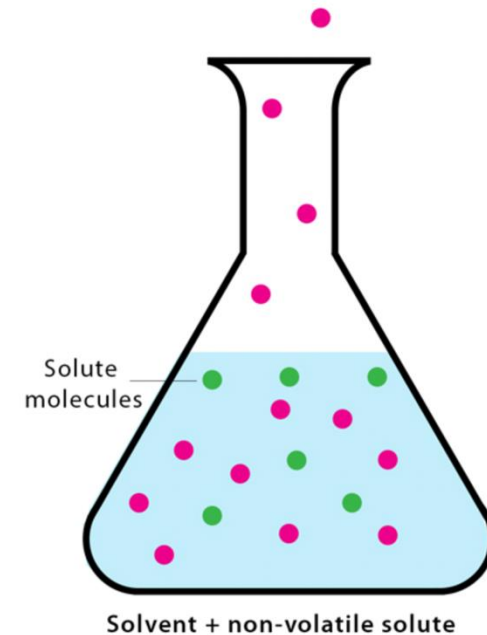
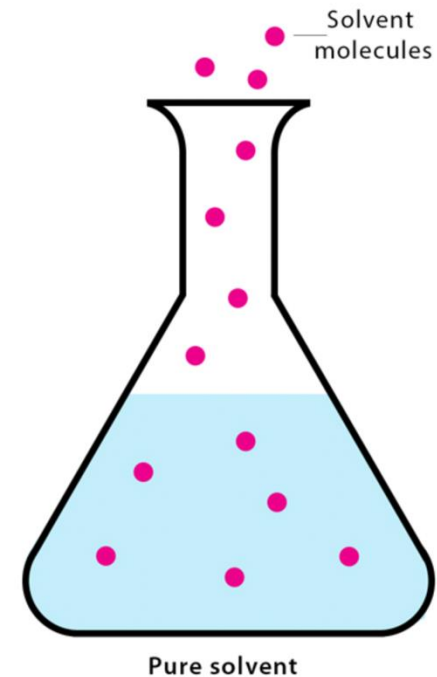
b) Heterogeneous nucleation



Stull, 2015

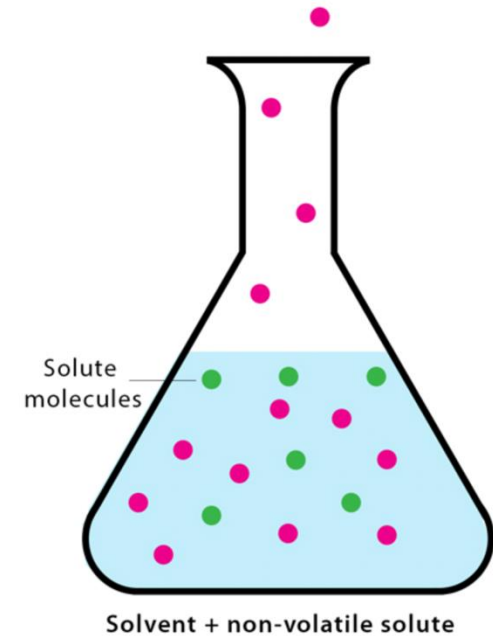
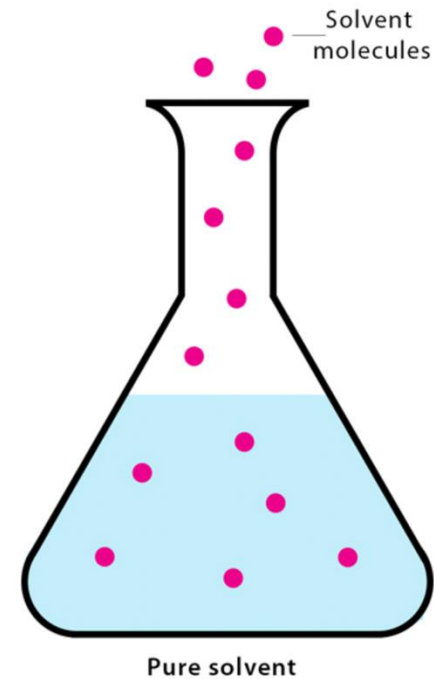
# Legge di Raoult

- Dissolvere un soluto in acqua abbassa la sua pressione di vapor saturo (a T fissata)
- In un sistema chiuso a medesima T con due recipienti, uno con liquido puro e l'altro con una soluzione (che utilizza lo stesso liquido come solvente), si potrà osservare il graduale aumento del volume di liquido puro e della diminuzione del volume della soluzione
- **Spiegazione intuitiva** (Bohren Albrecht, 1998) :
  - La pressione di vapor saturo aumenta con l'aumento del flusso (rate) di evaporazione
  - Dissolvendo in soluto in acqua la concentrazione di molecole d'acqua decresce e quindi anche il flusso di evaporazione deve diminuire



# Legge di Raoult

- Si consideri una soluzione ideale composta da due componenti A e B con frazioni molari  $x_A = \frac{N_A}{N_A+N_B}$  e  $x_B = \frac{N_B}{N_A+N_B}$  e  $x_A + x_B = 1$
- La pressione di vapor saturo per A sarà  $p_A = p_A(T, x_B)$  lo stesso per  $p_B = p_B(T, x_A)$  tale che  $p = p_A + p_B$
- $\frac{\partial p}{\partial x_B} = \frac{\partial p_A}{\partial x_B} + \frac{\partial p_B}{\partial x_B} = \frac{\partial p_A}{\partial x_B} + \frac{\partial p_B}{\partial x_A} \frac{\partial x_A}{\partial x_B} = 0 \rightarrow \frac{\partial p_A}{\partial x_B} = -\frac{\partial p_B}{\partial x_A}$
- Devono essere soddisfatte le condizioni al contorno
  - $p_A(T, 0) = p_{A0} = p$  ;  $p_B(T, 0) = p_{B0} = p$   
dove  $p_{A0}$  è la pressione di vapor saturo per una pura soluzione di A
  - $p_A(T, 1) = 0$  ;  $p_B(T, 1) = 0$
- Le seguenti funzioni soddisfano le condizioni
  - $p_A = p_{A0}(1-x_B)$  ;  $p_B = p_{B0}x_A$
- Allora troviamo che  $p_A = p_{A0}x_A = p_{A0} \frac{N_A}{N_A+N_B}$  che è la legge di Raoult



# Curve di Kohler

- Considero una goccia di raggio  $r$  con disciolta una massa  $m$  di soluto a massa molare  $M_s$
- Se ciascuna molecola libera  $i$  ioni in acqua allora il numero di moli di materiale in una goccia è  $i \frac{m}{M_s}$
- Se la densità della soluzione è  $\rho'$  e la massa molare dell'acqua è  $M_w$  il numero di moli di pura acqua nella goccia è  $n_w = \frac{m_w}{M_w} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho' - m}{M_w}$
- Da cui la frazione molare dell'acqua nella goccia è

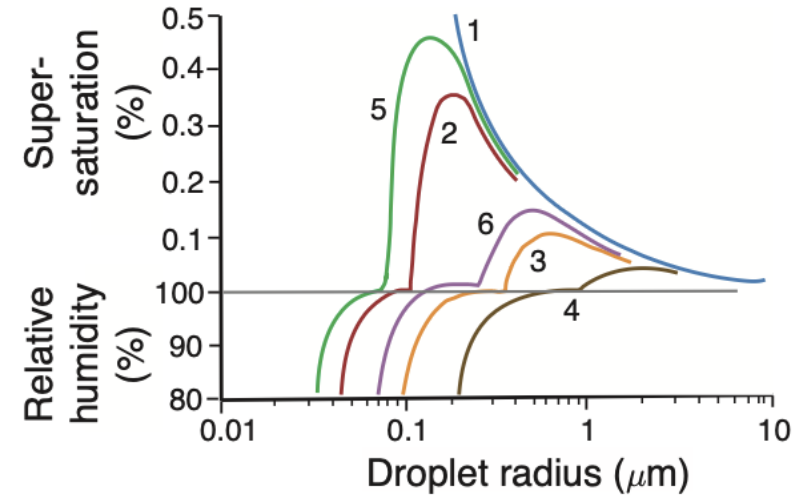
$$x_w = \frac{n_{water}}{n_{solution}} = \frac{\frac{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho' - m}{M_w}}{\frac{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho' - m}{M_w} + i \frac{m}{M_s}} = \left[ 1 + \frac{imM_w}{M_s \left( \frac{4}{3}\pi r^3 \rho' - m \right)} \right]^{-1}$$

- Da  $r = \frac{2\sigma}{nkT \ln \frac{e}{e_s}}$  ho che  $\frac{e}{e_s} = \exp\left(\frac{2\sigma}{nkTr}\right)$
- Usando  $'$  per indicare la soluzione allora posso scrivere un'espressione per la pressione di vapore saturo  $e'$  vicino a una gocciolina di raggio  $r$  con presenza di soluto (usando la legge di Raoult)

$$\frac{e'}{e_s} = \frac{e'}{e} \frac{e}{e_s} = x_w \frac{e}{e_s} = \exp\left(\frac{2\sigma'}{n'kTr}\right) \left[ 1 + \frac{imM_w}{M_s \left( \frac{4}{3}\pi r^3 \rho' - m \right)} \right]^{-1}$$

# Curve di Kohler

- $\frac{e'}{e_s} = \exp\left(\frac{2\sigma'}{n'kTr}\right) \left[1 + \frac{imM_w}{M_s\left(\frac{4}{3}\pi r^3 \rho' - m\right)}\right]^{-1}$
- Il grafico della variazione dell'umidità relativa (o supersaturazione) in funzione del raggio è chiamata *curva di Kohler*
- La curva di Kohler tiene quindi conto di due fattori:
  - Effetto Kelvin → dovuto alla curvatura della goccia :  $e_s$  diminuisce con  $r$
  - Effetto Raoult → dovuto alla soluzione :  $e_s$  diminuisce all'aumentare della concentrazione della soluzione ( $e_s$  aumenta con  $r$ )
- Sotto un certo  $r$  domina Raoult: l'RH adiacente alla goccia con soluto (RH') è minore di quella in equilibrio con una goccia di pura acqua
- All'aumentare di  $r$  domina Kelvin: la soluzione diventa più diluita (la massa di soluto è costante sulla curva) l'RH dell'aria adiacente alla goccia con soluto (RH') diventa sostanzialmente uguale a quella con una goccia di pura acqua

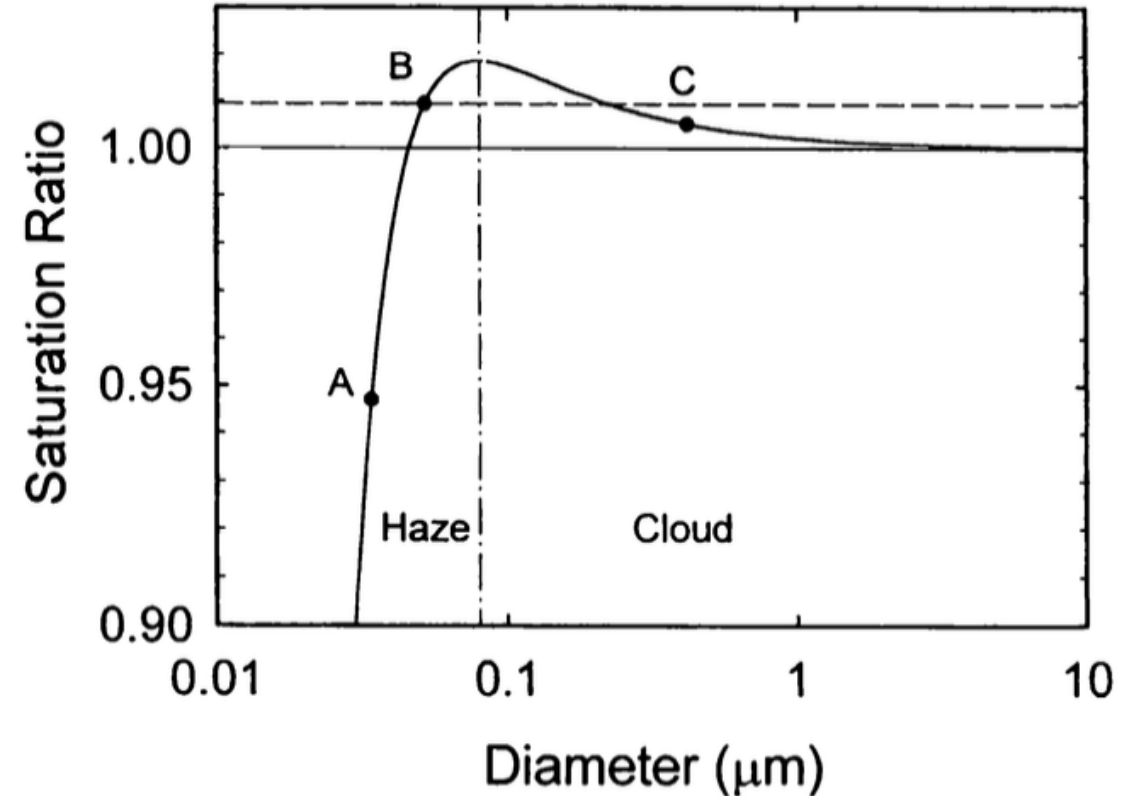


**Fig. 6.3** Variations of the relative humidity and supersaturation adjacent to droplets of (1) pure water (blue) and adjacent to solution droplets containing the following fixed masses of salt: (2)  $10^{-19}$  kg of NaCl, (3)  $10^{-18}$  kg of NaCl, (4)  $10^{-17}$  kg of NaCl, (5)  $10^{-19}$  kg of  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , and (6)  $10^{-18}$  kg of  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . Note the discontinuity in the ordinate at 100% relative humidity. [Adapted from H. R. Pruppacher, “The role

# Interpretazione curve di Kohler

- Supponiamo che una gocciolina con soluto sia in equilibrio nel suo ambiente (**punto A**)
- Spostiamo tale gocciolina improvvisamente in un ambiente a sovrasaturazione pari a quella indicata dalla linea tratteggiata
- Ricordiamo ancora che il rate di evaporazione dipende da  $e_s$
- Il disequilibrio determina la crescita della gocciolina per l'aumento del rate di condensazione (RH è maggiore)
- Ma anche il rate di evaporazione *aumenta* ( $e_s$  aumenta con  $r$ )
- In B c'è un nuovo equilibrio **STABILE** → formazione di foschia (*haze*)
- Se la gocciolina crescesse ancora il rate di evaporazione sarebbe superiore ( $e_s$  aumenta con  $r$ ), mentre quello di condensazione rimarrebbe uguale (RH ambientale sempre uguale) e tornerei verso la dimensione  $r$  originale di equilibrio

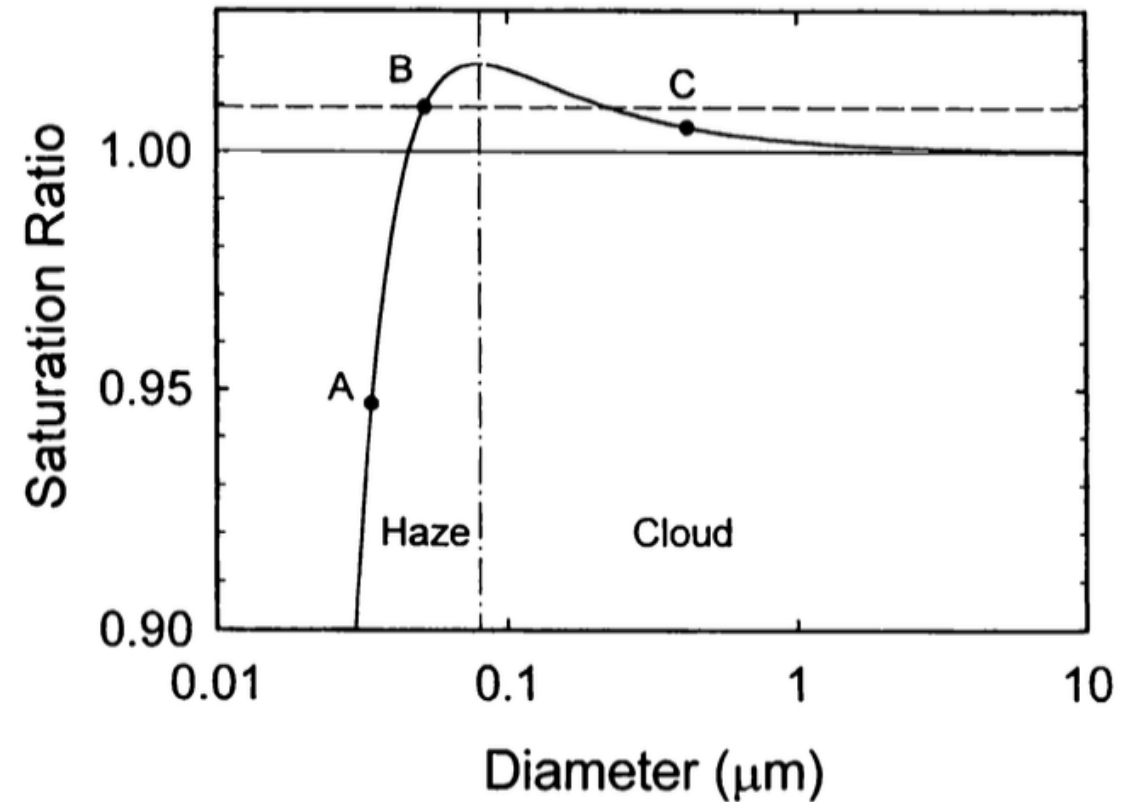
Bohren and Albrecht, 1998



# Interpretazione curve di Kohler

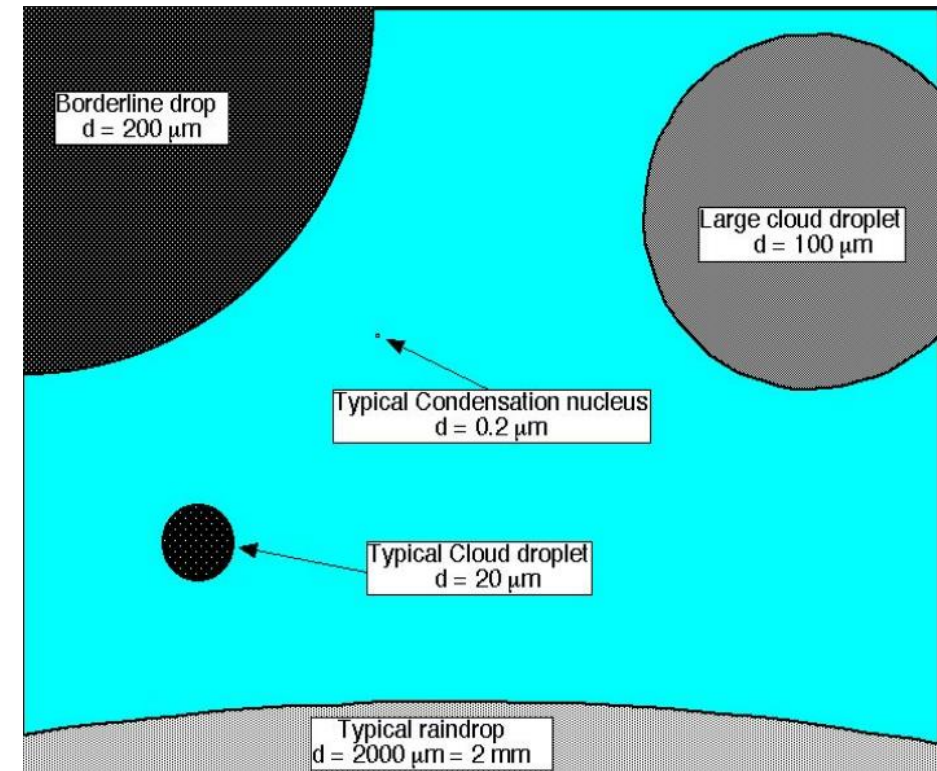
- Supponiamo che una gocciolina con soluto sia in equilibrio nel suo ambiente (**punto C**)
- Spostiamo tale gocciolina improvvisamente in un ambiente a sovrasaturazione pari a quella indicata dalla linea tratteggiata
- Il disequilibrio determina la crescita della gocciolina per l'aumento del rate di condensazione (RH è maggiore)
- il rate di evaporazione invece *diminuisce* ( $e_s$  diminuisce con  $r$ ) → equilibrio INSTABILE → formazione delle goccioline di nube
- La gocciolina continua a crescere indefinitamente
- Una gocciolina che ha passato il picco della curva di Kohler è detta *attivata*

Bohren and Albrecht, 1998



# Cloud Condensation Nuclei

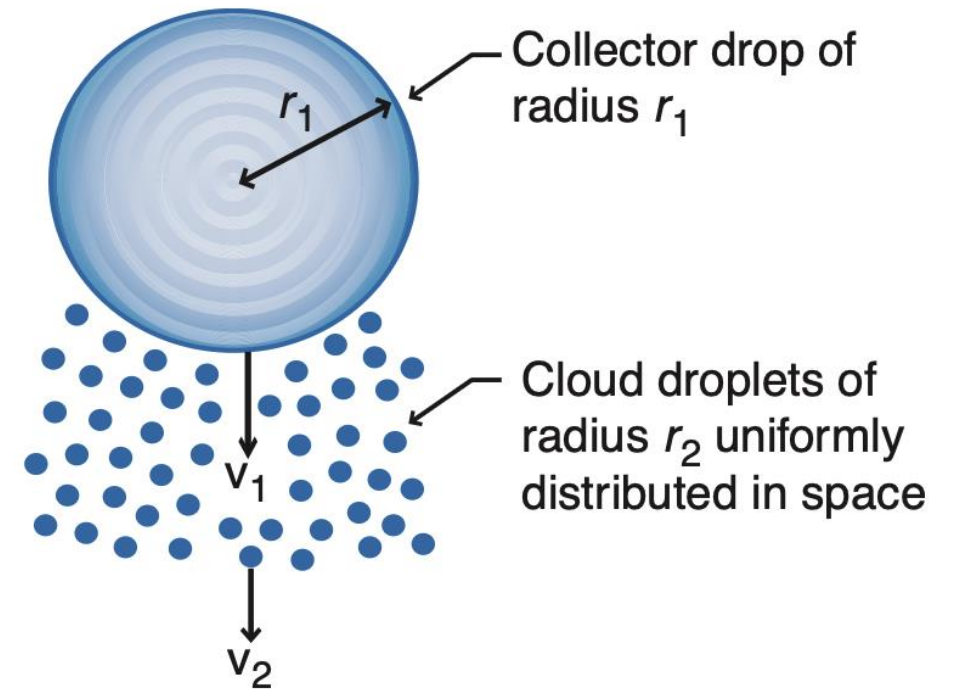
- L'aerosol atmosferico (*particolato*) è composto da particelle e corpuscoli in sospensione all'interno dell'atmosfera con diametri tra  $1\mu\text{m}$  e  $1\text{nm}$
- Solo un piccolo sottogruppo (CCN) può agire come particelle su cui il vapore può condensare per formare le goccioline di nube che sono poi attivate e crescono per condensazione per formare le nubi
- Maggiore è il diametro più facilmente la superficie sarà igroscopica
- Maggiore è la solubilità più bassa sarà la supersaturazione necessaria per attivare il CCN
- Esempi di CCN
  - i. Aerosol marini come spray sulla cresta delle onde oceaniche
  - ii. Polveri soprattutto desertiche
  - iii. Particelle carboniose derivate dagli incendi delle foreste
  - iv. Particelle di origine vulcanica
  - v. Particelle prodotte dalla combustione di varia natura
- Produzione annuale di 25000-45000 teragrammi ad anno



NASA

# Crescita in nubi calde

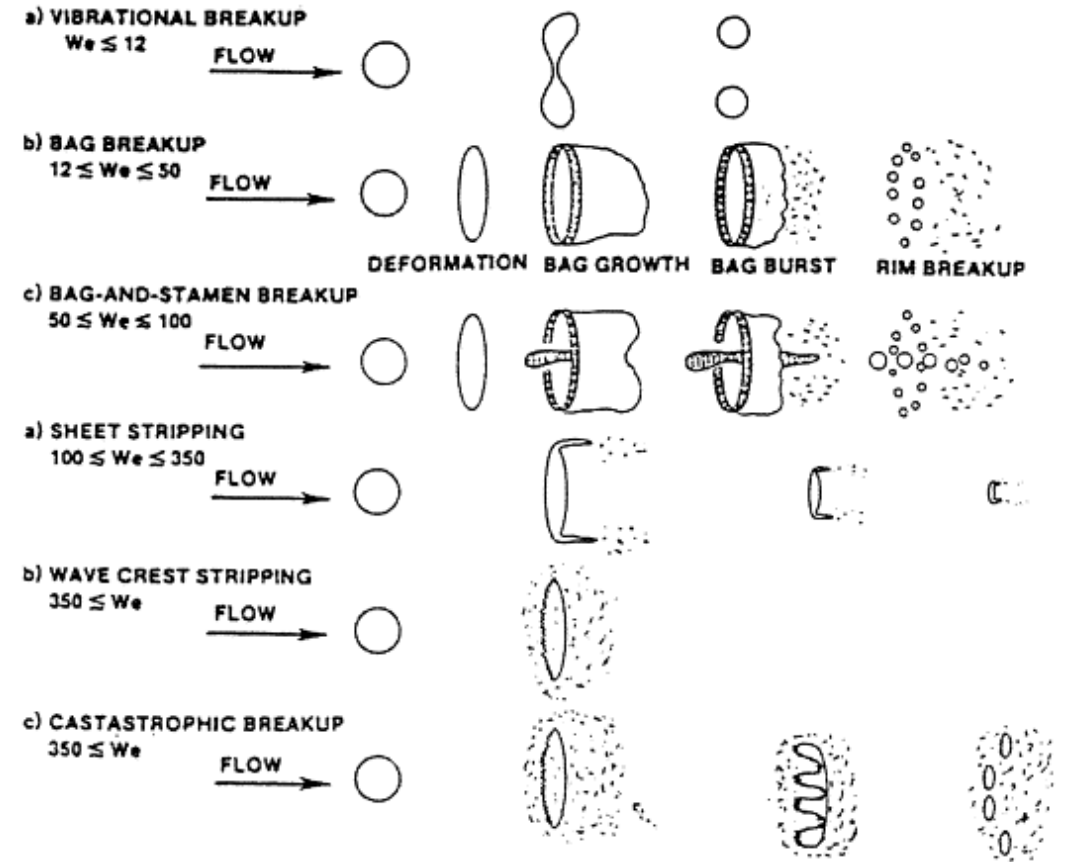
- Nubi che contengono acqua solo in forma liquida vengono chiamate **nubi calde**
- Le goccioline che hanno raggiunto dimensioni critiche sono immerse in una massa d'aria sovrassatura in ascesa → **crescita diffusiva**
- La diffusione è un processo lento e dipendente da  $q$  e  $RH$  in ascesa
- I processi favorevoli per la crescita veloce delle goccioline di nube sono la **collisione** e la **coalescenza**
- Grazie al grandissimo numero di goccioline presente, le droplet con diametro maggiore entrano in contatto con le goccioline più piccole (la velocità di caduta è diversa): si uniscono in gocce di diametro maggiore
- Il processo è molto veloce ed efficiente



Wallace and Hobbs, 2006

# Breakup e caduta

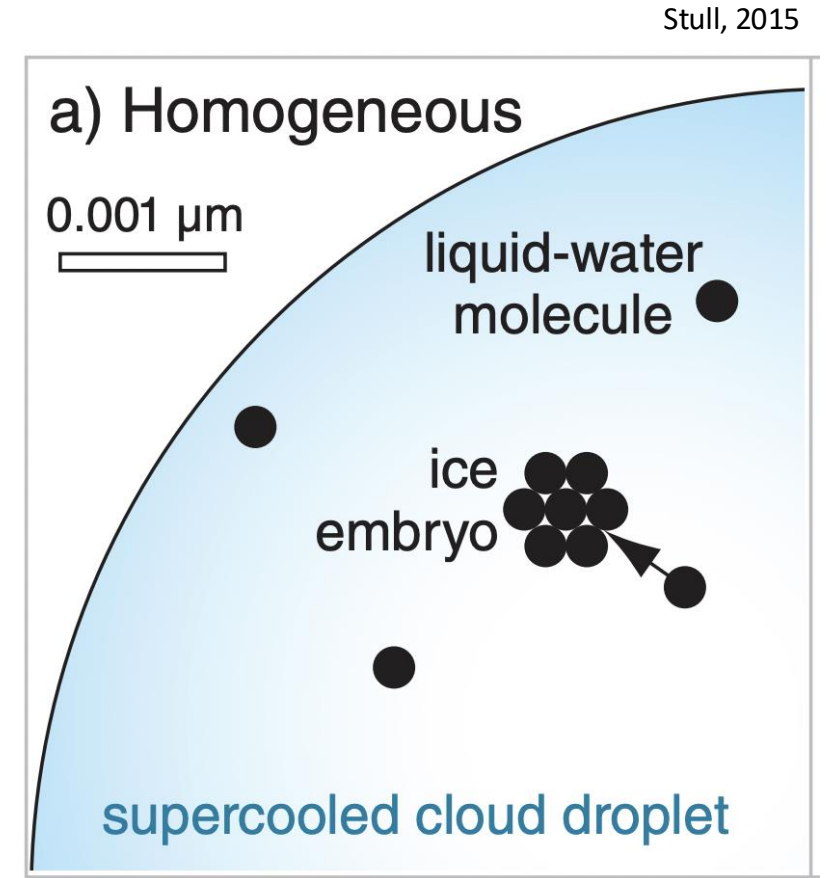
- Fino a quando le gocce continuano a crescere?
- La gocciolina è tenuta insieme dalla tensione superficiale che è efficiente per un'area piccola.
- Quando la goccia diventa grande è sottoposta a turbolenze e deformazioni nel flusso d'aria e perde la simmetria sferica appiattendosi
- La deformazione è tale da portare alla rottura delle gocce o **breakup**
- La goccia/precipitazione rimane in aria fino a che la turbolenza e le correnti ascensionali riescono a sollevarla/sostenerla, poi precipita



Joseph et al., 1999

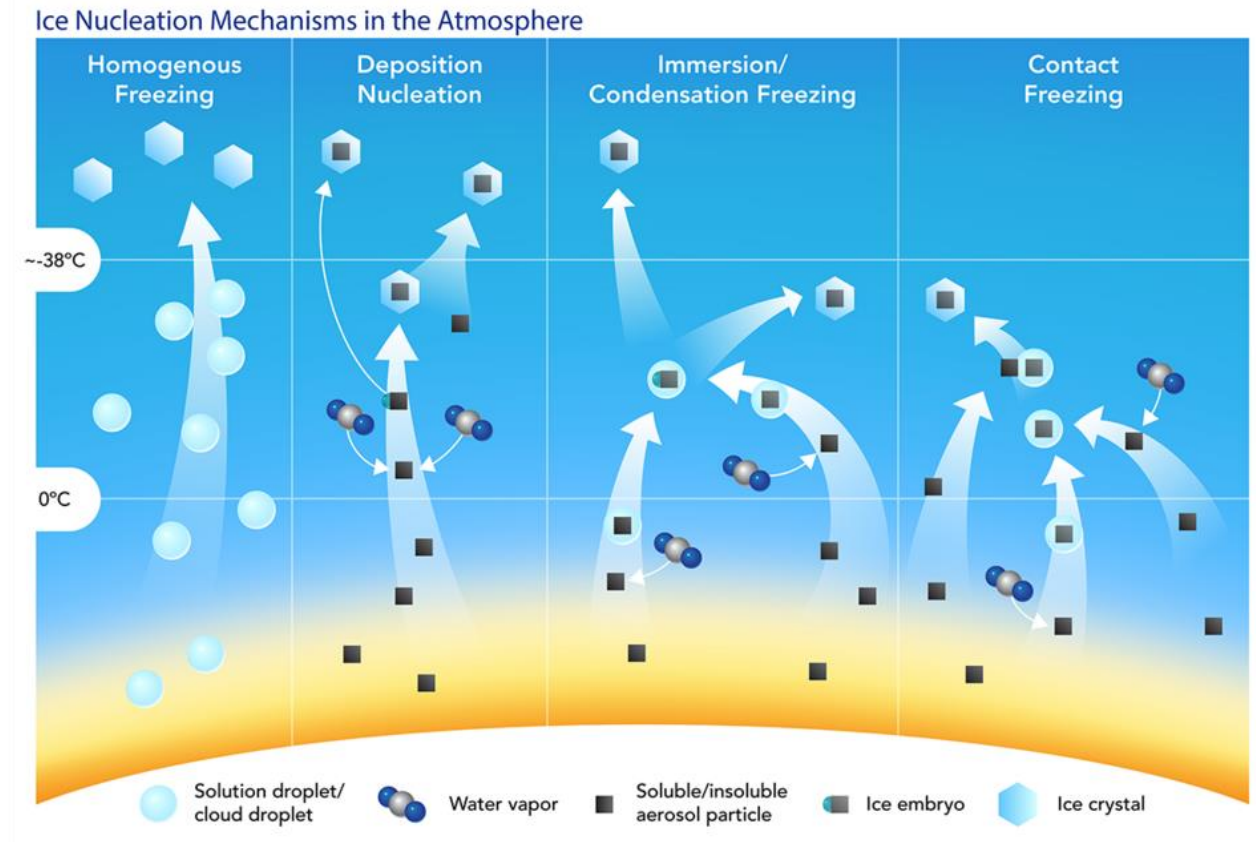
# Nubi fredde

- Quando una nube si estende oltre lo zero termico è chiamata **nube fredda**
- Come avviene il ghiacciamento?
- Se la gocciolina non presenta impurità può ghiacciare solo per *nucleazione omogenea di congelamento* (homogeneous freezing nucleation)
- Ricordiamo che l'acqua può esistere in stato liquido anche al di sotto dei 0°C (acqua sopraffusa)
- La nucleazione omogenea avviene solo tra -35° e -40°C quindi solo nelle nubi molto alte e fredde
- Gli embrioni di ghiaccio si formano casualmente quando gruppi di molecole d'acqua si uniscono con gli orientamenti corretti
- A -40°C il gruppo di molecole necessario può essere di circa 250
- A temperature leggermente più elevate, la dimensione critica dell'embrione è molto maggiore, e quindi la probabilità che si formi è minore



# Nucleazione eterogenea in nubi fredde

- Anche il processo di ghiacciamento è favorito da particelle di aerosol
- Gli aerosol in questo caso si chiamano **nuclei di ghiacciamento (IN)** e coincidono raramente con CCN
- Caratteristica degli IN è di avere una struttura (disposizione cristallografica) simile a quella del ghiaccio
- Gli IN più efficaci sono insolubili nell'acqua
- IN comuni sono:
  - Polvere (silicati e silice) da degradazione dei suoli (specie argille)
  - Batteri provenienti dalla vegetazione
  - Cellulosa
- I metodi di nucleazione eterogenea di ghiacciamento tramite IN sono numerosi

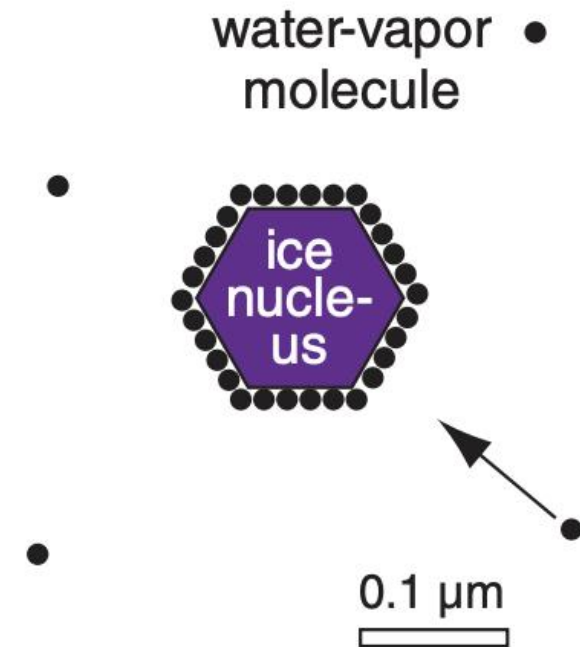


[Wikipedia](#)

# Nucleazione eterogenea in nubi fredde

- La **nucleazione per deposizione** si verifica quando il vapore acqueo si deposita direttamente sull'IN (in questo caso chiamato deposition nucleus)
- Sebbene l'effetto del soluto fosse importante per la nucleazione delle goccioline liquide, esso non si applica alla nucleazione del ghiaccio poiché i sali vengono esclusi dal reticolo cristallino del ghiaccio durante il congelamento dell'acqua
- Nella nucleazione per deposizione non si passa per la fase liquida
- Temperature più basse e una maggiore sovrasaturazione aumentano la nucleazione per deposizione

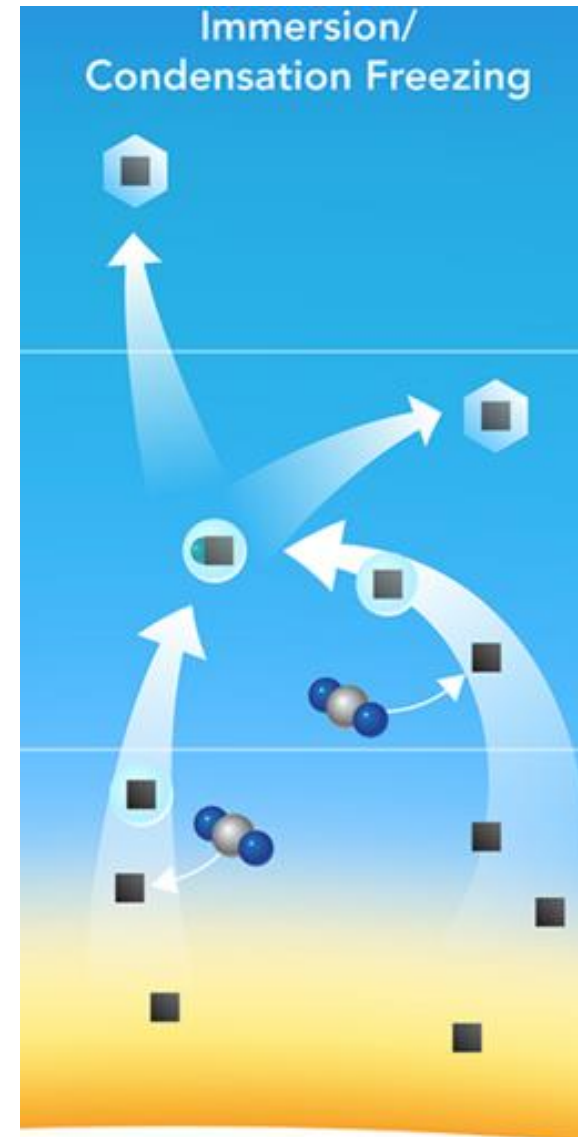
## b) Deposition



Stull, 2015

# Nucleazione eterogenea in nubi fredde

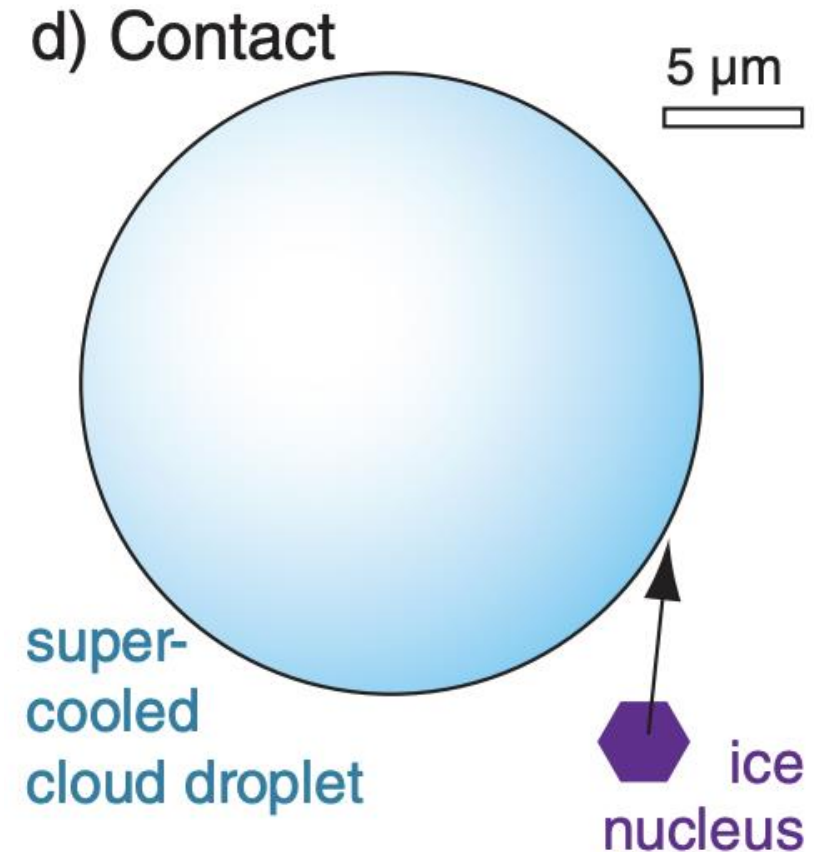
- La **nucleazione per immersione** (freezing nucleation) si verifica per quelle goccioline liquide che contengono già un IN all'interno non disciolto (in questo caso chiamato freezing nucleus)
- Le molecole d'acqua nella goccia si raccolgono sulla superficie dell'IN formando una struttura simil-ghiaccio (ice-like)
- Dato che la formazione della struttura di ghiaccio è assistita dall'IN l'embrione comincia a formarsi già dalla dimensione dell'IN → la nucleazione eterogenea avviene a temperature maggiori della nucleazione omogenea



[Wikipedia](#)

# Nucleazione eterogenea in nubi fredde

- La particella che permette il ghiacciamento potrebbe tuttavia non essere già presente nella goccia.
- È possibile infatti la **nucleazione da contatto** ovvero il caso in cui una particella (contact nucleus) determina il ghiacciamento di una gocciolina quando entra in contatto con questa
- Se la gocciolina è più fredda della temperatura critica dell'IN il ghiacciamento avviene istantaneamente

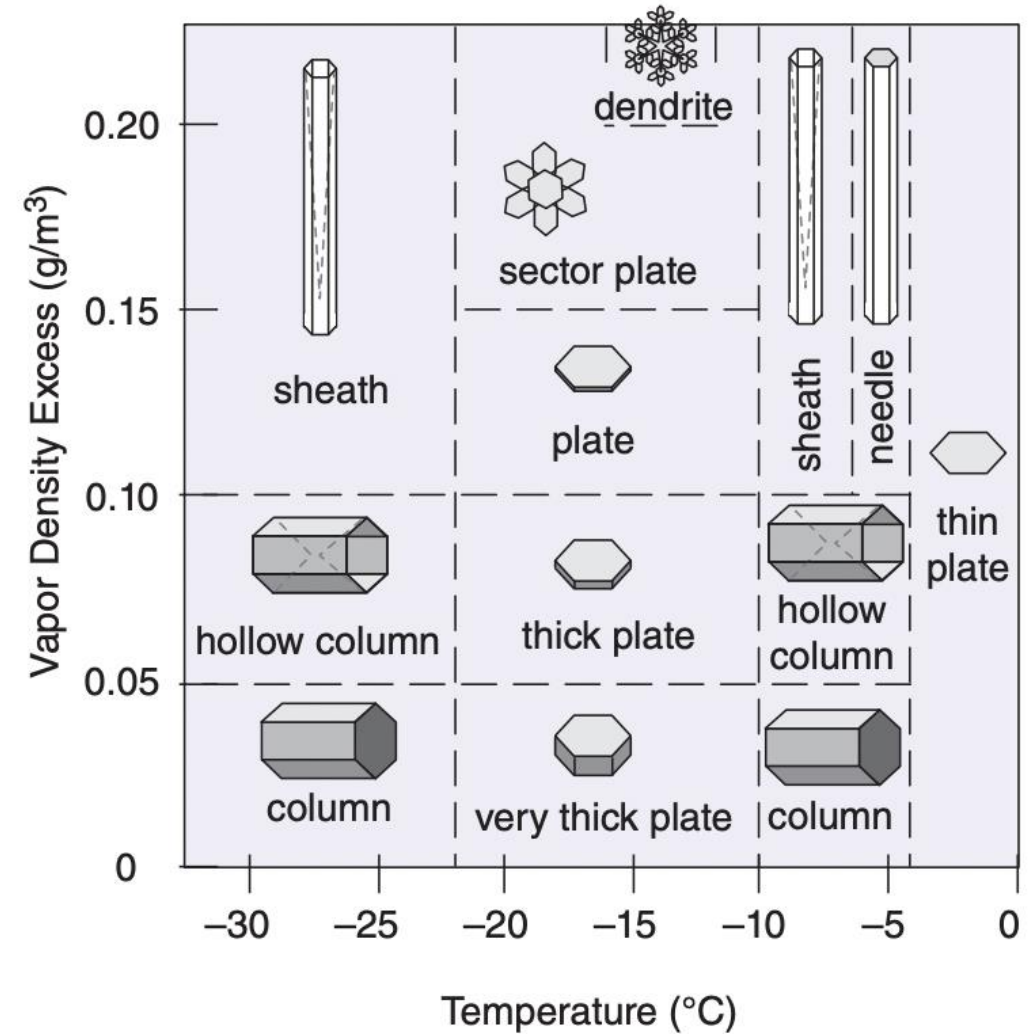


Stull, 2015

# Crescita di ghiaccio nelle nubi

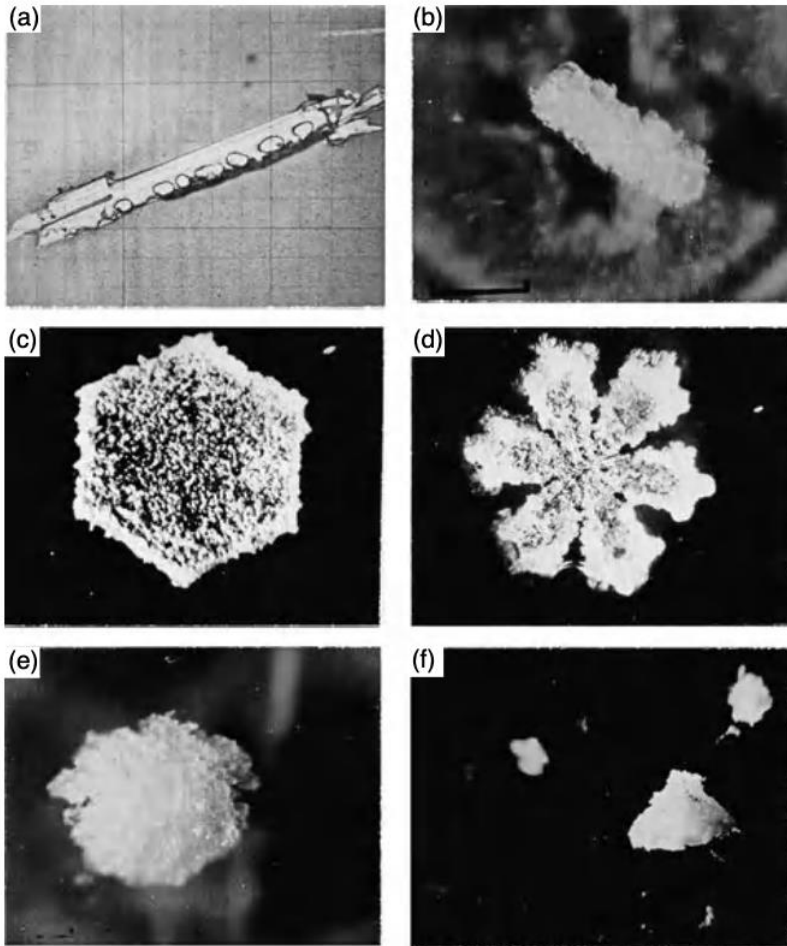
- La crescita dei cristalli di ghiaccio nelle nubi può avvenire per **crescita dalla fase di vapore**
- In una nube mista dominata da gocce sopraffuse l'aria vicina alla saturazione rispetto all'acqua è soprassatura rispetto al ghiaccio
- I cristalli di ghiaccio cresceranno quindi molto più velocemente dalla fase di vapore rispetto alle goccioline
- Processo di Bergeron-Findeisen
- La crescita dalla fase di vapore determina la formazione dei cristalli di ghiaccio secondo particolari forme (dendritiche, ad ago, piatte) a seconda della temperatura e della soprassaturazione in cui si trovano

Stull, 2015



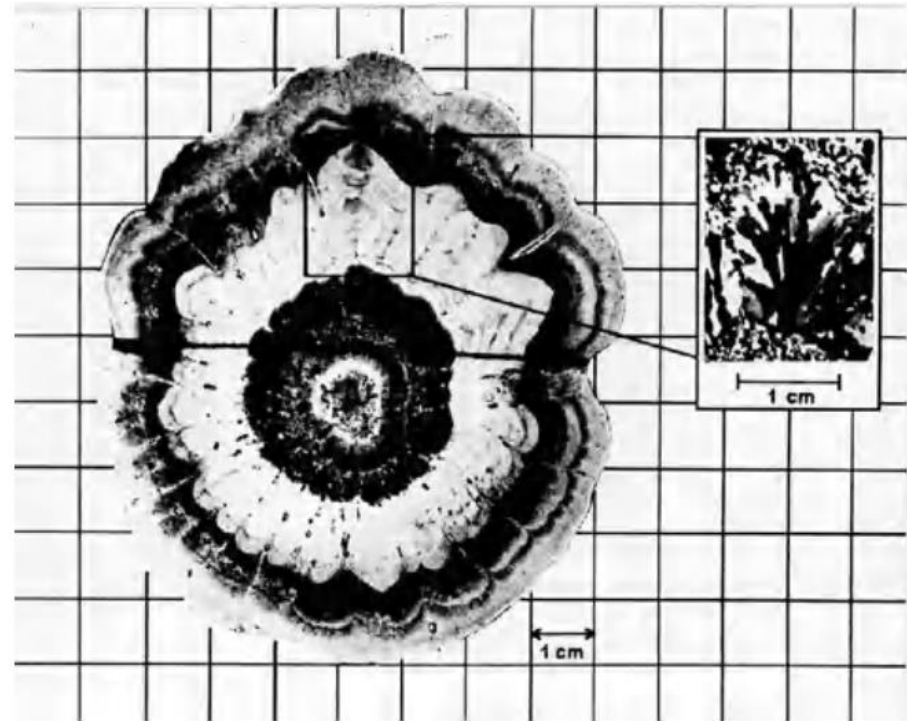
# Crescita di ghiaccio nelle nubi

Wallace and Hobbs, 2006



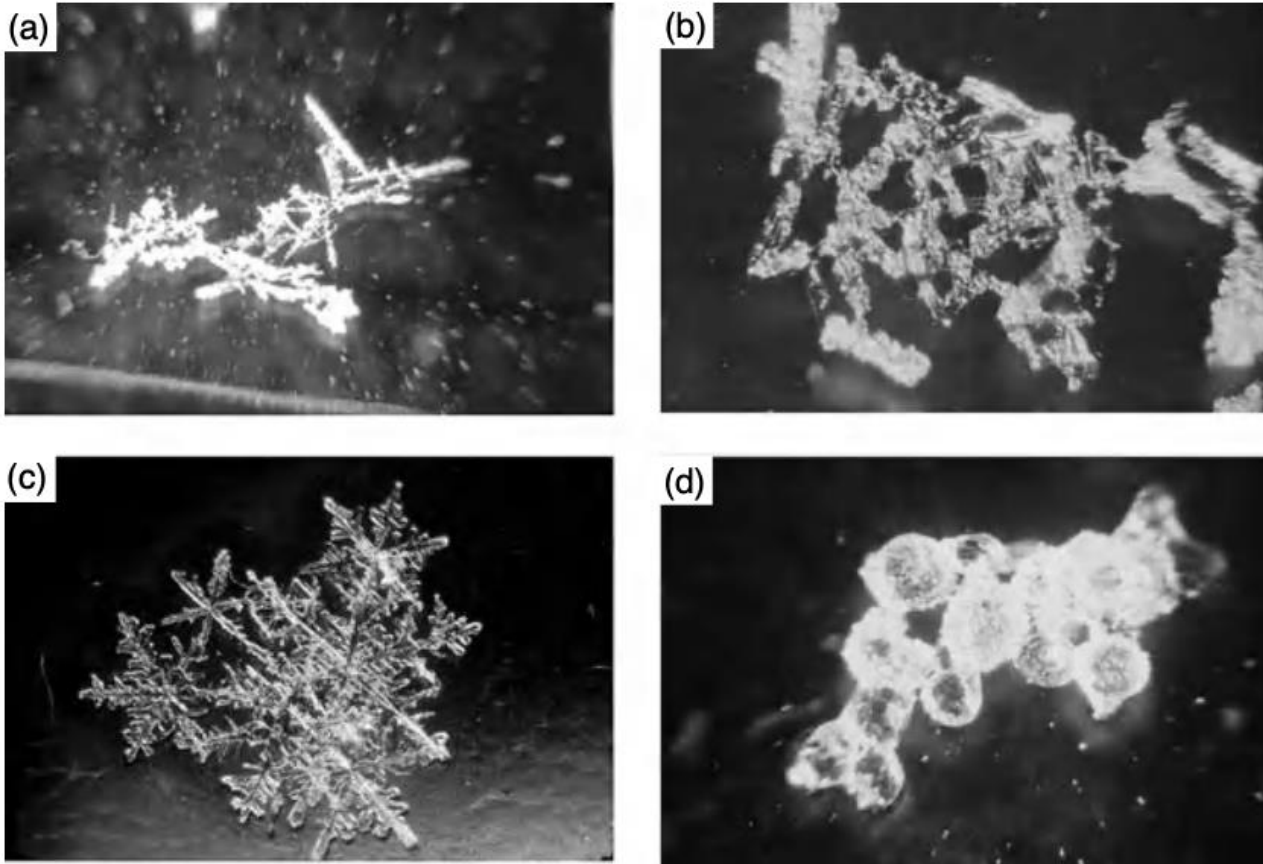
**Fig. 6.41** (a) Lightly rimed needle; (b) rimed column; (c) rimed plate; (d) rimed stellar; (e) spherical graupel; and (f) conical graupel. [Photographs courtesy of Cloud and Aerosol Research Group, University of Washington.]

- Il secondo tipo di crescita è tramite **riming**
- In una nube mista i cristalli di ghiaccio possono aumentare in massa collidendo con goccioline sopraffuse che ghiacciano sul cristallo
- La grandine è un caso estremo della crescita tramite riming



Wallace and Hobbs, 2006

# Crescita di ghiaccio nelle nubi



Wallace and Hobbs, 2006

- Il terzo tipo di crescita è tramite **aggregazione**
- I cristalli di ghiaccio possono collidere tra loro e aggregarsi formando un unico cristallo di ghiaccio
- Può avvenire solo se la velocità di caduta tra cristalli è diversa
- L'efficacia dipende fortemente dal tipo di cristallo e dalla temperatura

# Precipitazioni/Idrometeore

p. atmosferica = una delle fasi del ciclo dell'acqua nell'atmosfera terrestre, e precisamente quella corrispondente al passaggio dell'acqua dall'atmosfera al suolo.



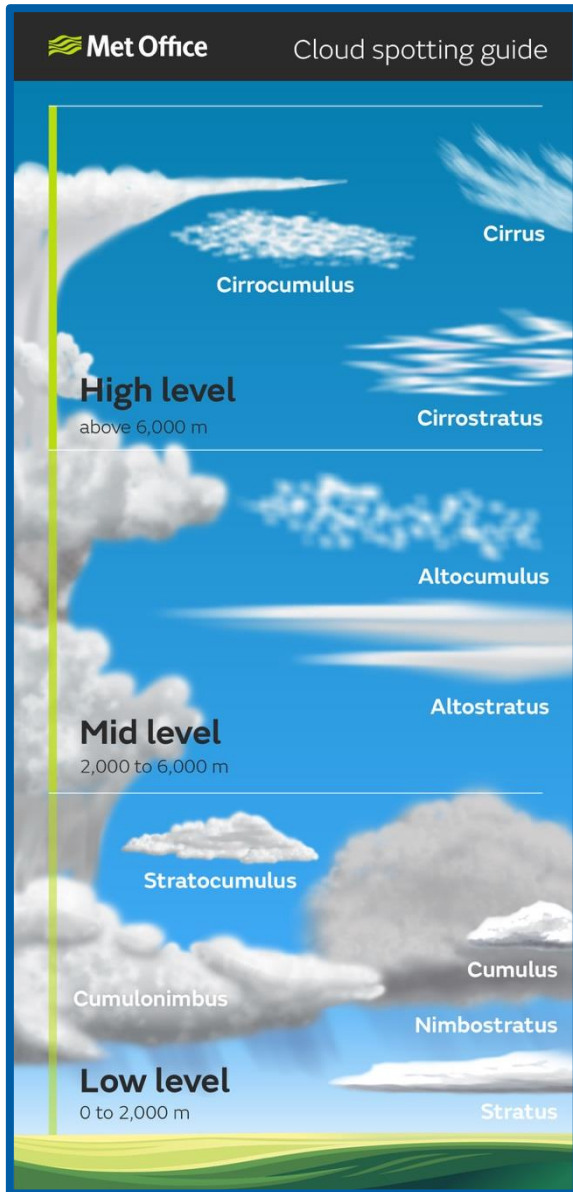
# Tipi di precipitazioni invernali



[NWS](#)



# La classificazione delle nuvole



- Luke Howard (1772-1864) introduce la classificazione delle nuvole prendendo ispirazione da Linneo ovvero secondo: genere-specie-varietà
- I generi possono essere classificati unendo due criteri

## i) PER ALTEZZA

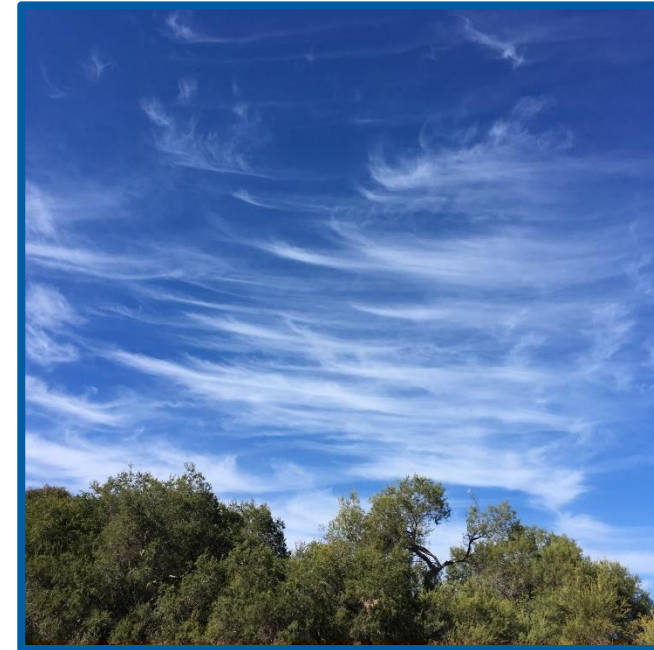
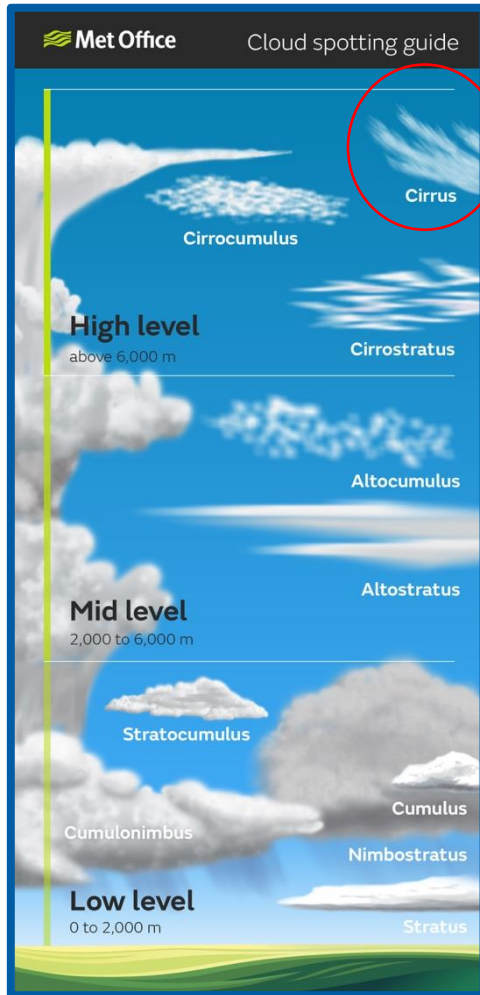
Inserire prefisso a seconda dell'altezza

1. nubi ALTE ( $h > 6$  km) : **CIRRO-**
2. nubi MEDIE ( $2 \text{ km} < h < 6 \text{ km}$ ) : **ALTO-**
3. nubi BASSE ( $h < 2$  km): **CUMULO-**

## ii) PER SVILUPPO VERTICALE

1. nubi SPESSE VERTICALMENTE (convettive): **CUMULO**
2. nubi SOTTILI VERTICALMENTE (stratiformi): **STRATO**

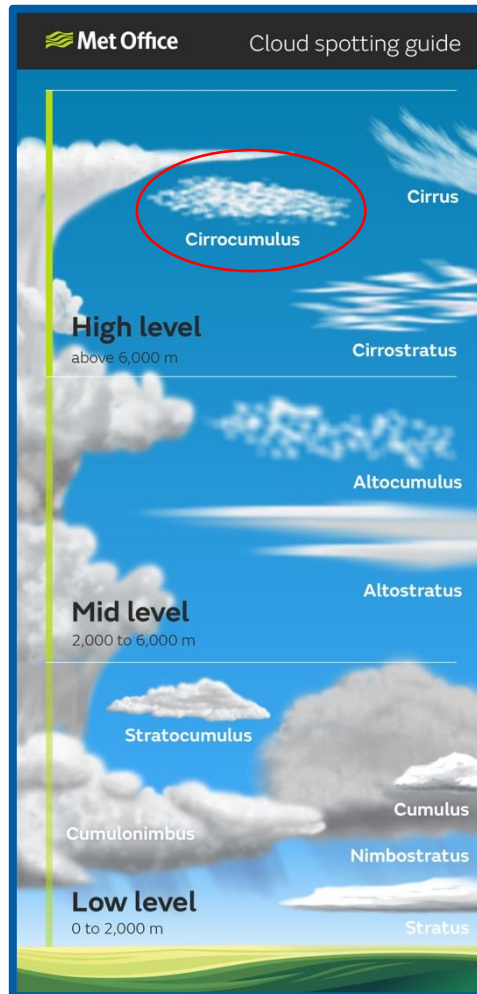
# Nubi alte: CIRRI



**ALTEZZA:** nubi alte  
**PRECIPITAZIONE:** no

- composte solo da cristalli di ghiaccio
- filamentosi
- sembrano capelli/fibre

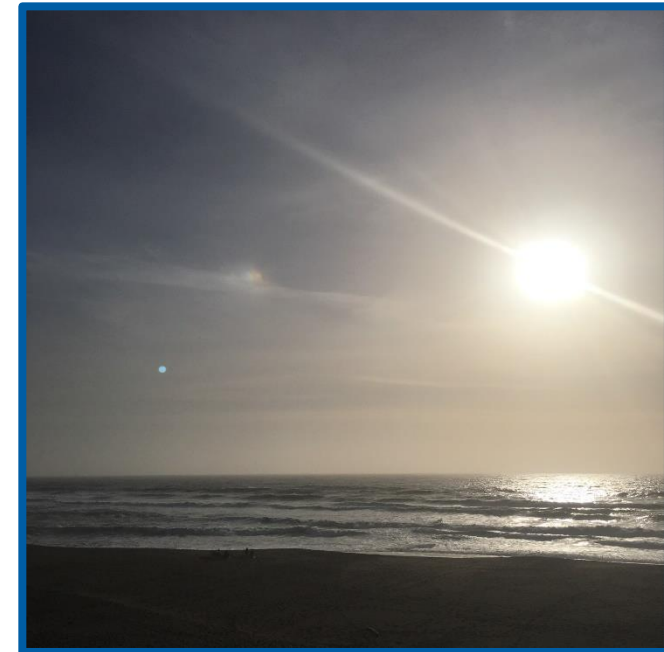
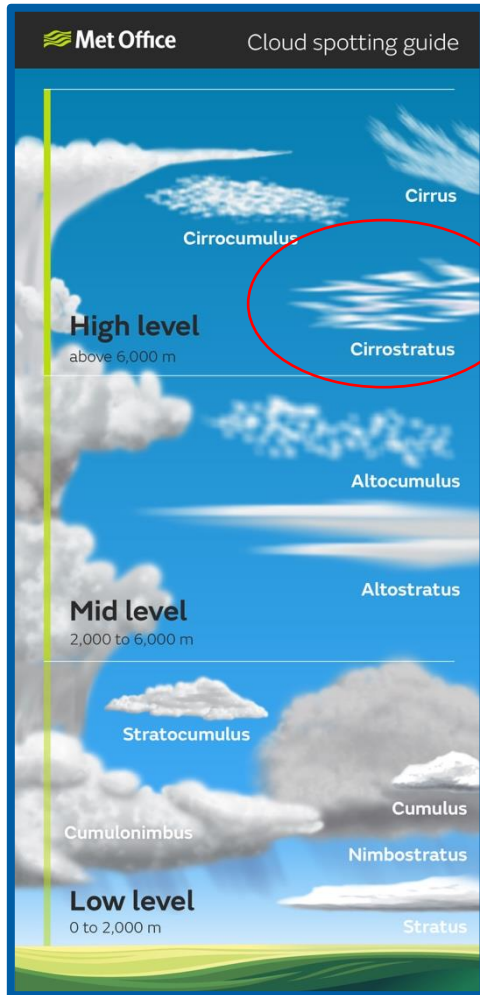
# Nubi alte: CIRROCUMULI



**ALTEZZA:** nubi alte  
**PRECIPITAZIONE:** no

- componenti grumose
- piccole formazioni
- nubi più rare: necessitano di correnti verticali in alto
- se distendo il braccio risultano più piccoli della grandezza di un dito

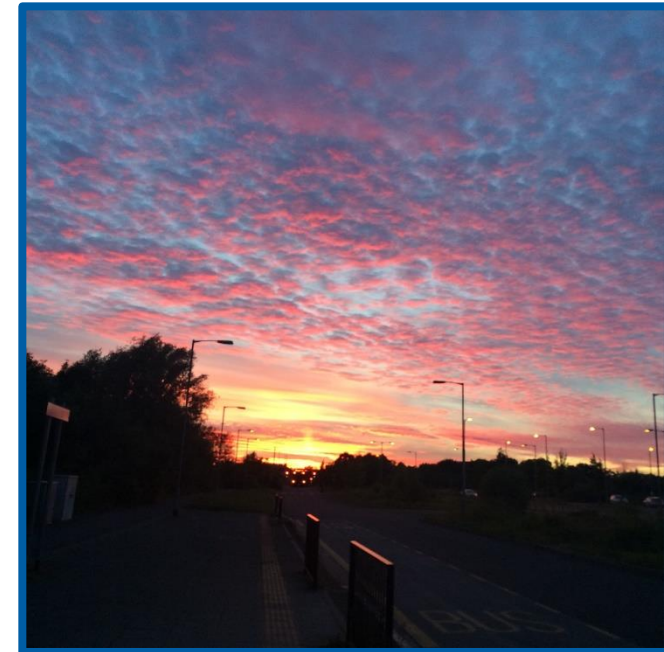
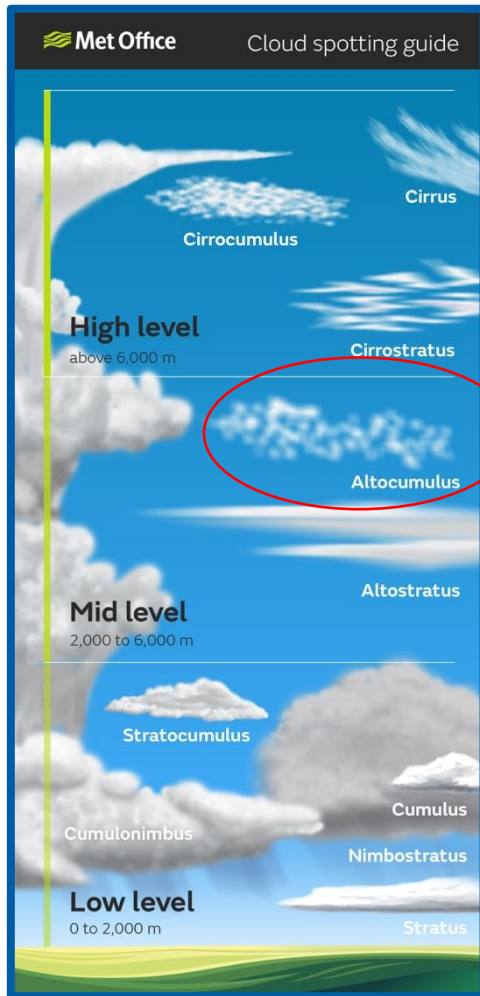
# Nubi alte: CIRROSTRATI



**ALTEZZA:** nubi alte  
**PRECIPITAZIONE:** no

- composte solo da cristalli di ghiaccio
- velo esteso
- quasi trasparente
- si distinguono chiaramente il sole o la luna

# Nubi medie: ALTOCUMULI

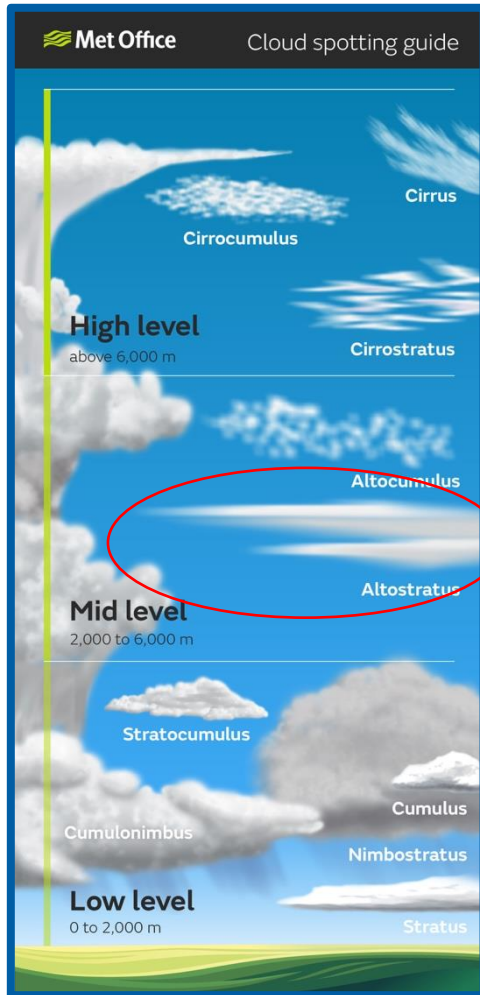


**ALTEZZA:** nubi medie

**PRECIPITAZIONE:** no

- hanno aspetto di agglomerati
- tipicamente bianchi o grigi
- mostrano ombra dal lato in cui non li illumina il sole
- se distendo il braccio risultano più grandi di 1-3 dita

# Nubi medie: ALTOSTRATI

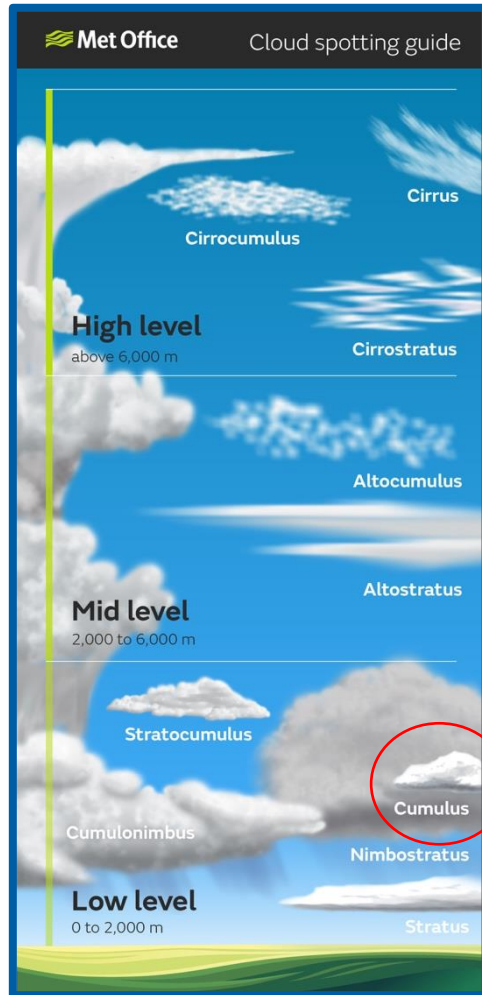


**ALTEZZA:** nubi medie

**PRECIPITAZIONE:** pioviggini

- aspetto stratificato
- piatti e uniformi
- grigi

# Nubi basse: CUMULI

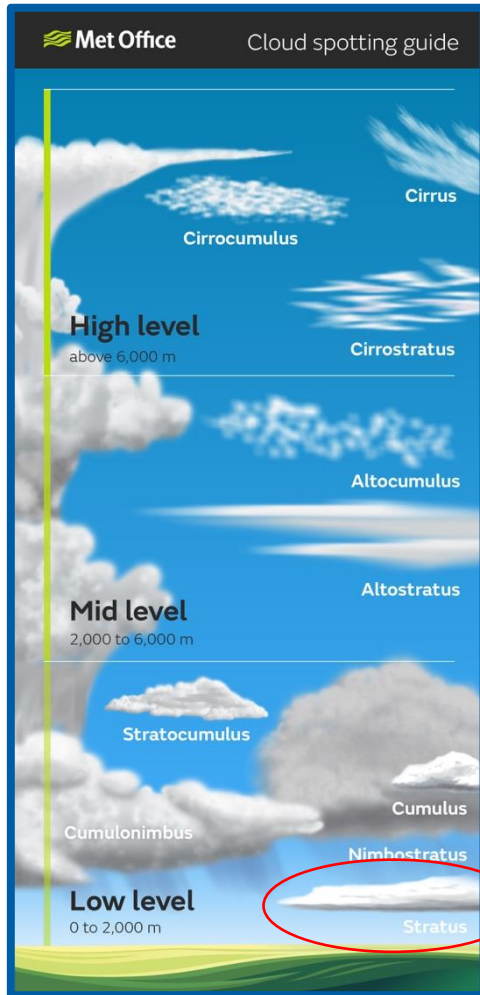


**ALTEZZA:** nubi basse

**PRECIPITAZIONE:** rovesci solo se in forma di *cumulus congestus* o *castellanus*

- nubi bianche e paffute → «cielo a pecorelle»
- nubi del bel tempo
- natura cellulare
- crescono verticalmente

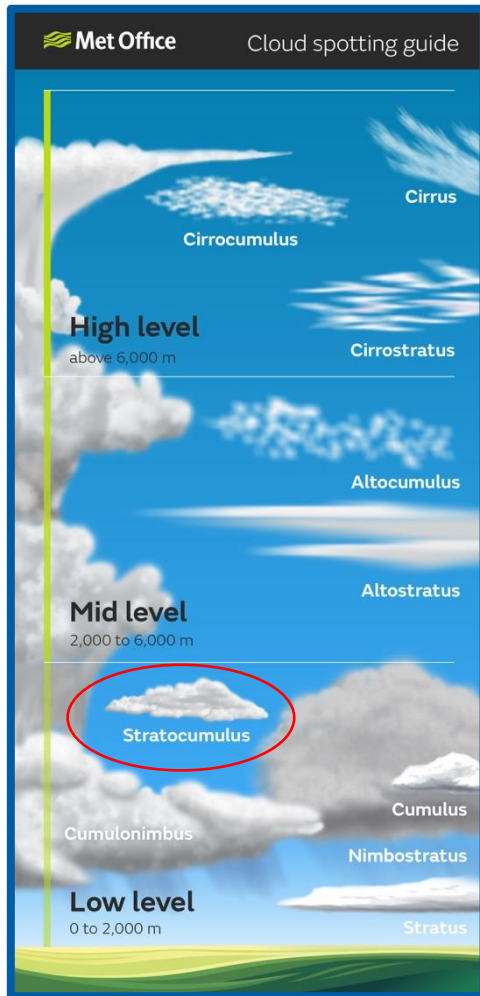
# Nubi basse: STRATI



**ALTEZZA:** nubi basse  
**PRECIPITAZIONE:** no

- le nubi generalmente più basse a formarsi
- non toccano terra!
- grigie e rendono il cielo uniforme

# Nubi basse: STRATOCUMULI

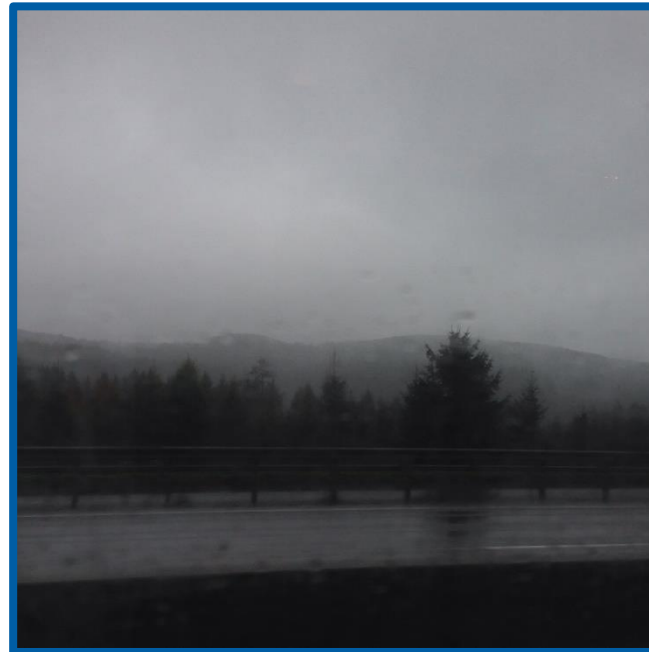
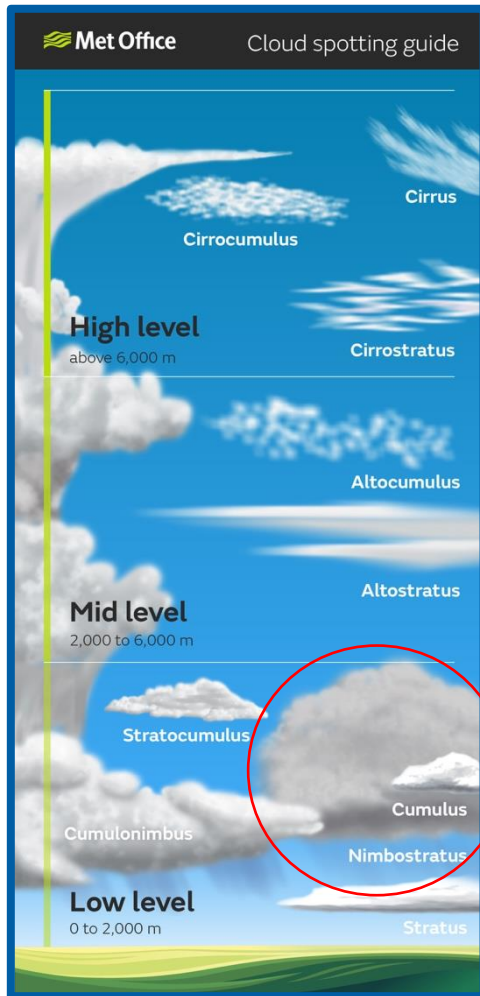


**ALTEZZA:** nubi basse

**PRECIPITAZIONE:** no

- misto tra cumuli e strati
- elementi individuali di nube in una distribuzione continua
- strato di nubi con aree spesse e aree sottili

# Nubi basse: NEMBOSTRATI

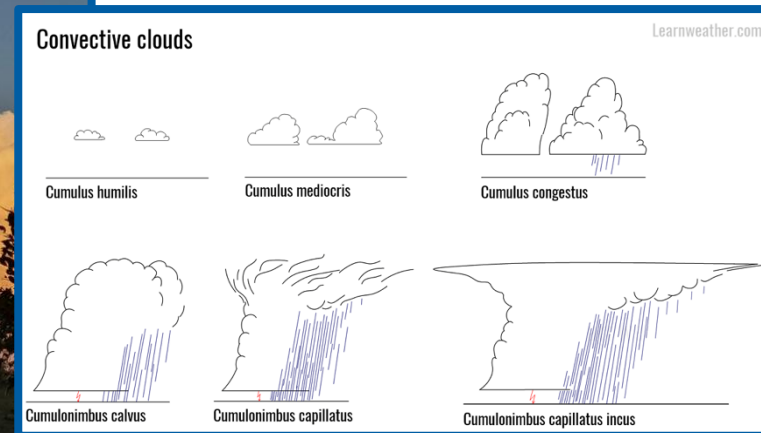
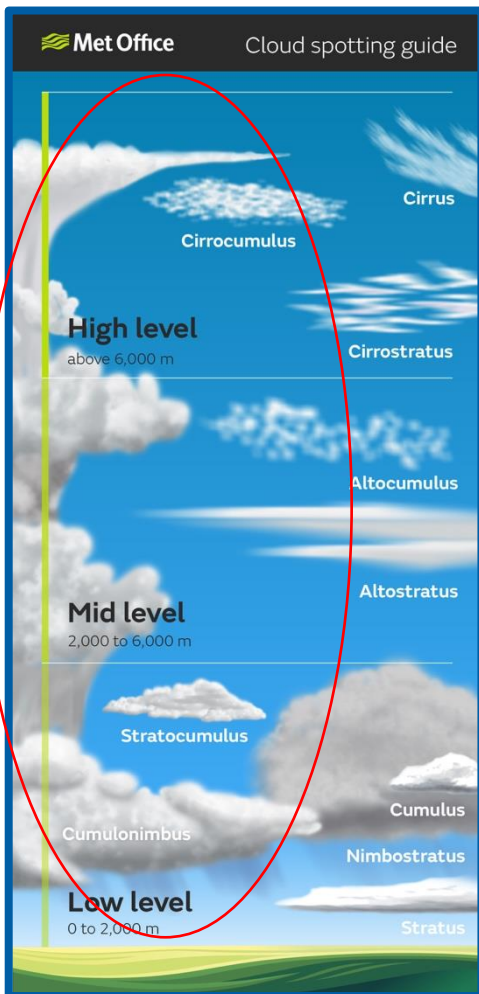


**ALTEZZA:** nubi basse

**PRECIPITAZIONE:** si, piogge o neviccate deboli e continue

- causano la maggior parte delle piogge invernali
- strati ma con piogge o neve

# nubi verticali: CUMULONEMBI

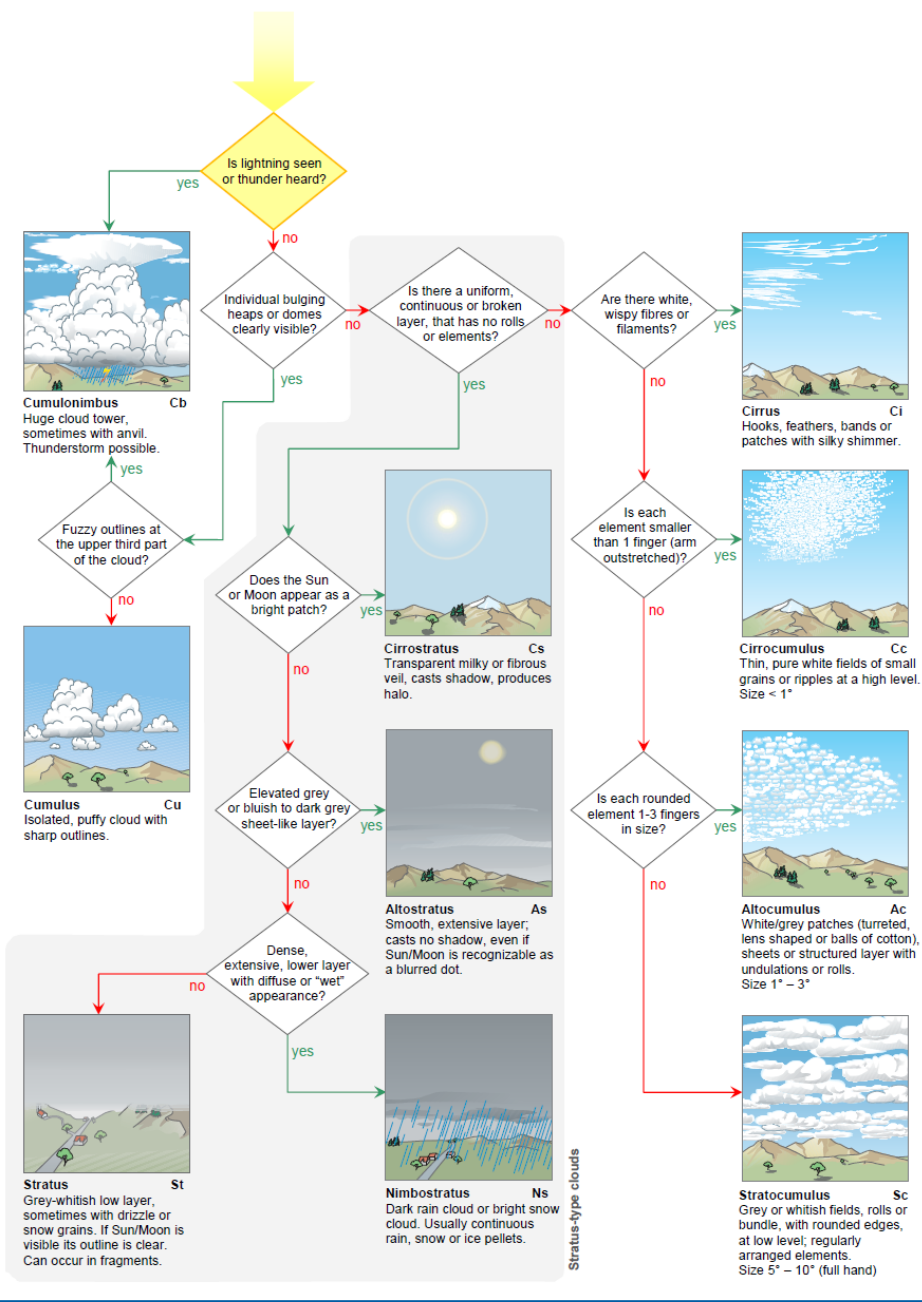


**ALTEZZA:** nubi basse

**PRECIPITAZIONE:** si, rovesci e fulmini

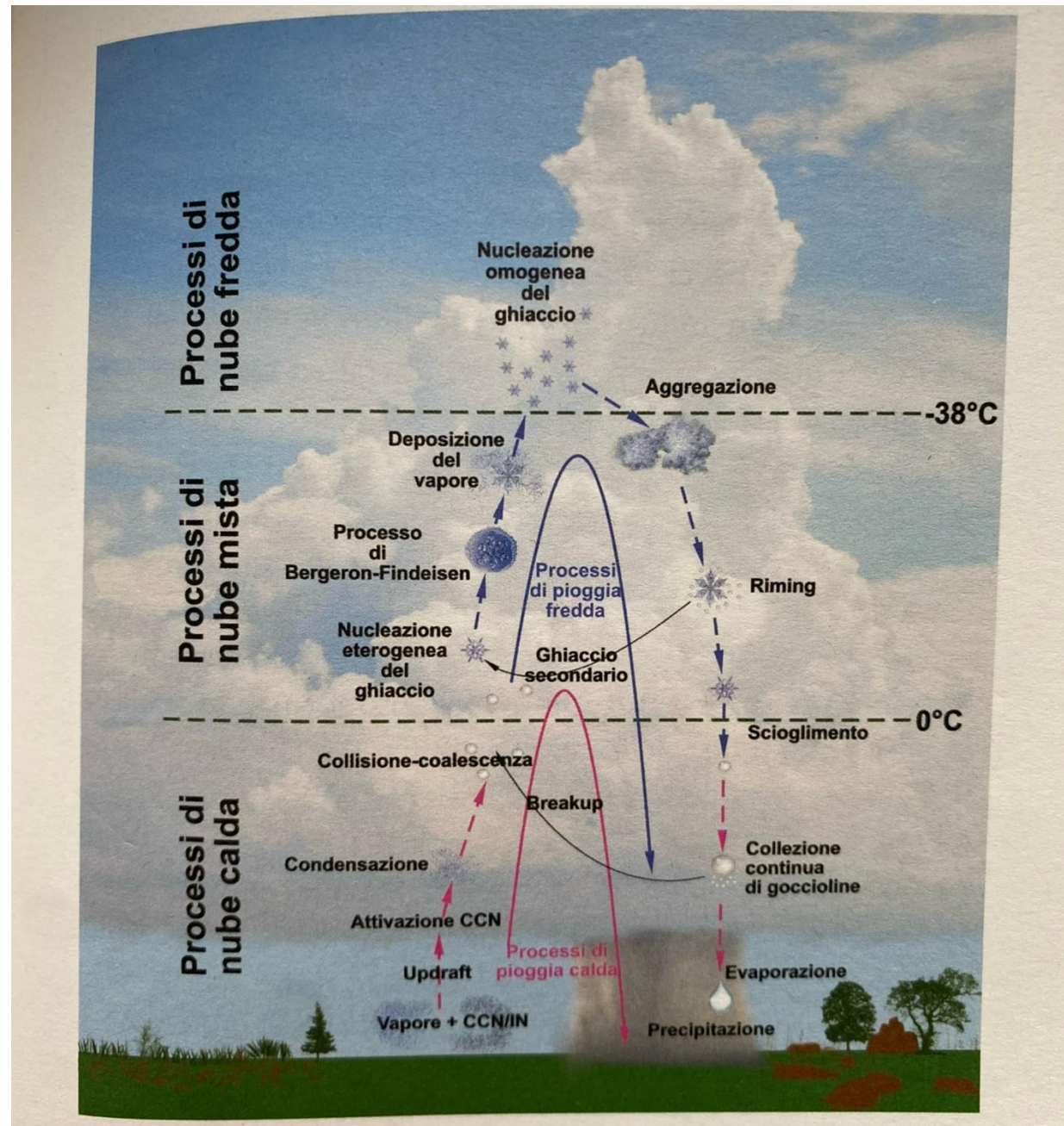
- si sviluppano verticalmente
- portano piogge intense e fulmini

# Cloud identification guide



WMO  
Guida all'identificazione delle nuvole

<https://cloudatlas.wmo.int/en/cloud-identification-guide.html>



Riassunto dei processi in nube

Levizzani, 2021

# Bibliografia

- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey* (Vol. 92). Elsevier.
- Levizzani, V. (2021). *Il libro delle nuvole: manuale pratico e teorico per leggere il cielo*. Il Saggiatore.
- Stull, R. (2015). *Practical meteorology: an algebra-based survey of atmospheric science*. University of British Columbia.
- Bohren, C., & Albrecht, B. (1998). *Atmospheric thermodynamics*. Oxford University Press.
  
- Rochetin, Nicolas & Hohenegger, Cathy & Touzé-Peiffer, Ludovic & Villefranque, Najda. (2021). A Physically Based Definition of Convectively Generated Density Currents: Detection and Characterization in Convection-Permitting Simulations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 13. 10.1029/2020MS002402.
- D.D. Joseph, J. Belanger, G.S. Beavers, Breakup of a liquid drop suddenly exposed to a high-speed airstream, *International Journal of Multiphase Flow*, Volume 25, Issues 6–7, 1999
- Micheletti S., Salvador M., *Appunti di meteorologia per il Friuli Venezia Giulia* (2010)

# Sitografia

- [Glossario meteorologia American Meteorological Society](#)
- [Metoffice – Cloud Types for Observers](#)
- [WMO Cloud Atlas](#)
- [Cloud Appreciation Society – Cloud Library](#)