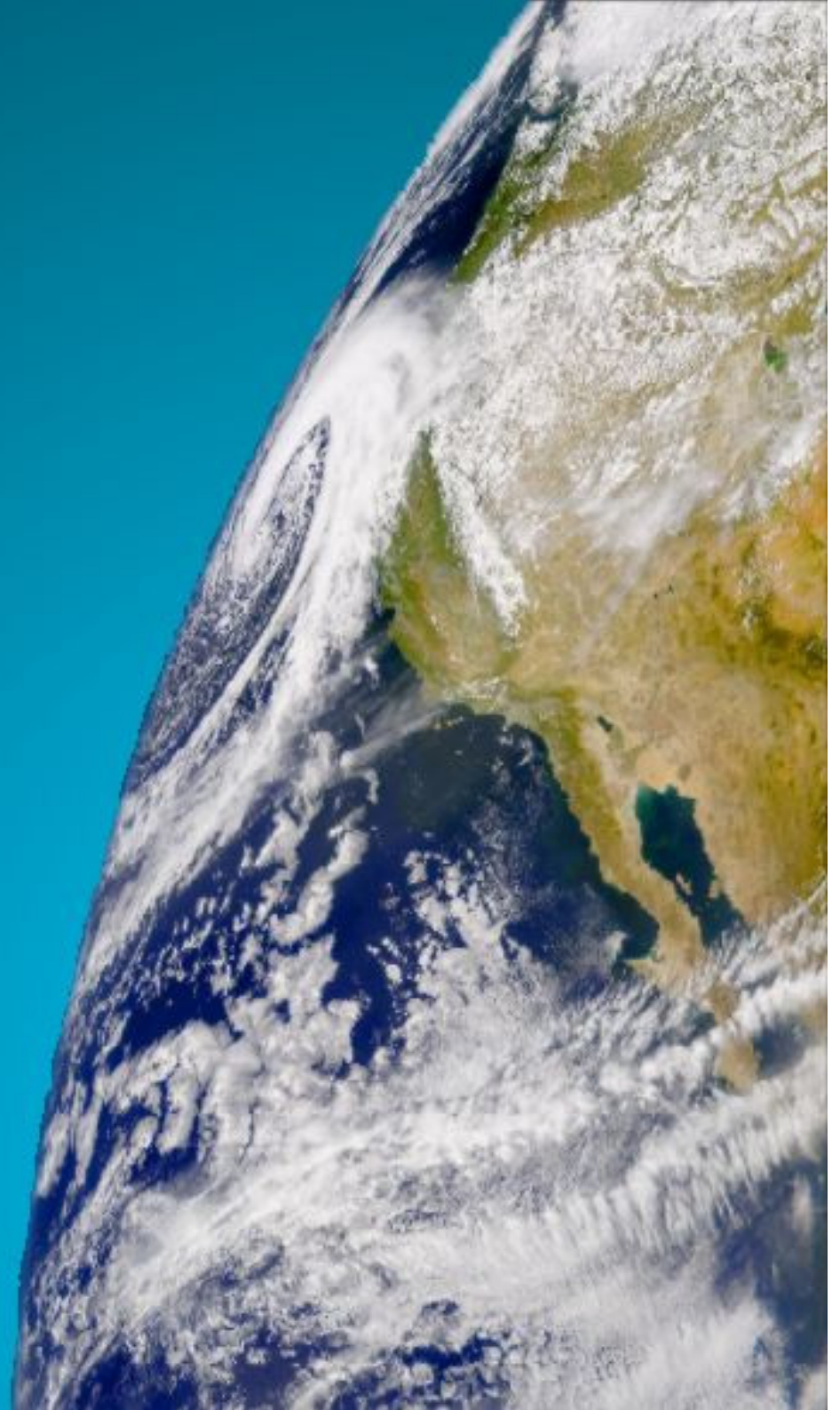


A levegő  
nem csak  
különböző  
gázok  
keveréke



# A LÉGKÖRI AEROSZOL

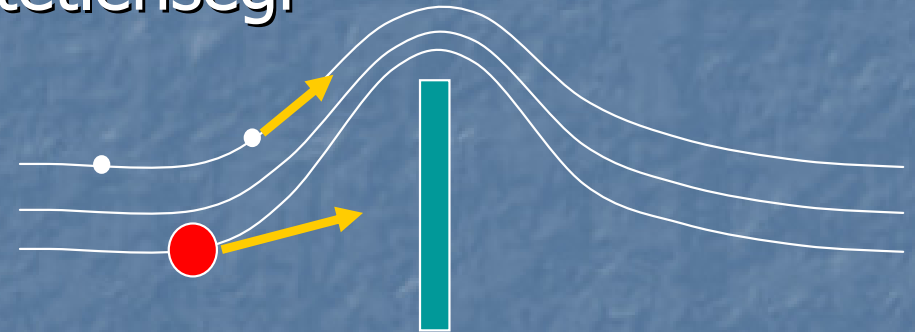
**Aeroszol:** gáznemű közeg és benne finoman diszpergált (eloszlott) szilárd vagy cseppfolyós részecskék együttes rendszere

gáznemű közeg: levegő

szilárd vagy cseppfolyós részecskék: aeroszol részecskék

## Az aeroszol részecskék jellemzői:

- 1) Gravitációs ülepedésük lassú (a turbulencia hosszú időn keresztül a levegőben tartja a részecskéket)
- 2) A részecske mozgását a tehetetlenségi erő helyett a viszkozitásból származó erő dominálja (a részecske közelítőleg az áramvonal mentén halad)
- 3) Jellemző mozgásformája a Brown-mozgás, amelyet a gázmolekulákkal való ütközés vált ki (impulzus átadás)
- 4) Felületi rétegének tömege nagy a teljes tömegben belül (felületi kémiai reakciók)



Aeroszol részecskékről csak vízgőzben telítetlen levegő esetén beszélünk. A köd-, felhő-, csapadékcseppet nem tekintjük aeroszol részecskének.

# Az aeroszol részecskék mennyiségének jellemzése:

- o darab-koncentráció  $db/cm^3, db/m^3$   $N$
- o felület-koncentráció  $\mu m^2/cm^3$   $4 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot N$
- o térfogat-koncentráció  $\mu m^3/cm^3$   $4/3 \cdot r^3 \cdot \pi \cdot N$
- o (tömeg-)koncentráció  $\mu g/m^3$   $4/3 \cdot r^3 \cdot \pi \cdot \rho \cdot N$

részecskeméret nagyon különböző lehet →  
→ méret szerinti eloszlás

$$\frac{dN}{dr} \quad \frac{dm}{dr}$$

hány darab/mennyi tömeg van  $r \pm dr$  mérettartományban

## Aeroszol részecskék mérete:

- legkisebb: molekulacsoport ( $\sim 1$  nm)
- legnagyobb:  $10$ - $20$   $\mu\text{m}$  (gravitációs ülepedés!)

max. esési sebesség: nehézségi erő = közegellenállás

$$\frac{4}{3} r^3 \rho g = 6 r \pi \mu v$$

$\left[ \frac{4}{3} r^3 \rho g \right] = \left[ 6 r \pi \mu v \right]$   
 $\left[ 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad \left[ 1,8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{ms}} \right]$   
 $\sim 13 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad \sim 1 \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$

$$10^3 r^2 = 10^{-5} v$$

**max. 10-20  $\mu\text{m}$**

$$r = 0,1 \mu\text{m} = 10^{-7} \text{ m} \rightarrow v = 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$r = 1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} \rightarrow v = 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$r = 10 \mu\text{m} = 10^{-5} \text{ m} \rightarrow v = 10^{-2} \text{ m/s} \\ = 1 \text{ cm/s !}$$

$$r = 100 \mu\text{m} = 10^{-4} \text{ m} \rightarrow v = 10^0 \text{ m/s} \\ = 1 \text{ m/s !!}$$

## Aeroszol részecskék kiülepedése:

- nedves ülepedés (mint a gázok)
- száraz ülepedés (mint a gázok)
- gravitációs ülepedés (szedimentáció, minél nagyobb egy részecske, annál gyorsabb)

**Minél nagyobb egy részecske, annál rövidebb a légköri tartózkodási ideje**

## Koaguláció (részecskék összetapadása):

aeroszol részecskék jellegzetes folyamata

koaguláció sebessége  $\sim 1/r$  → minél kisebb egy részecske, annál gyorsabban olvad össze egy másikká

**Minél kisebb egy részecske, annál rövidebb a légköri tartózkodási ideje**

## Aeroszol részecskék kiülepedése:

**Minél nagyobb egy részecske, annál rövidebb a légköri tartózkodási ideje**

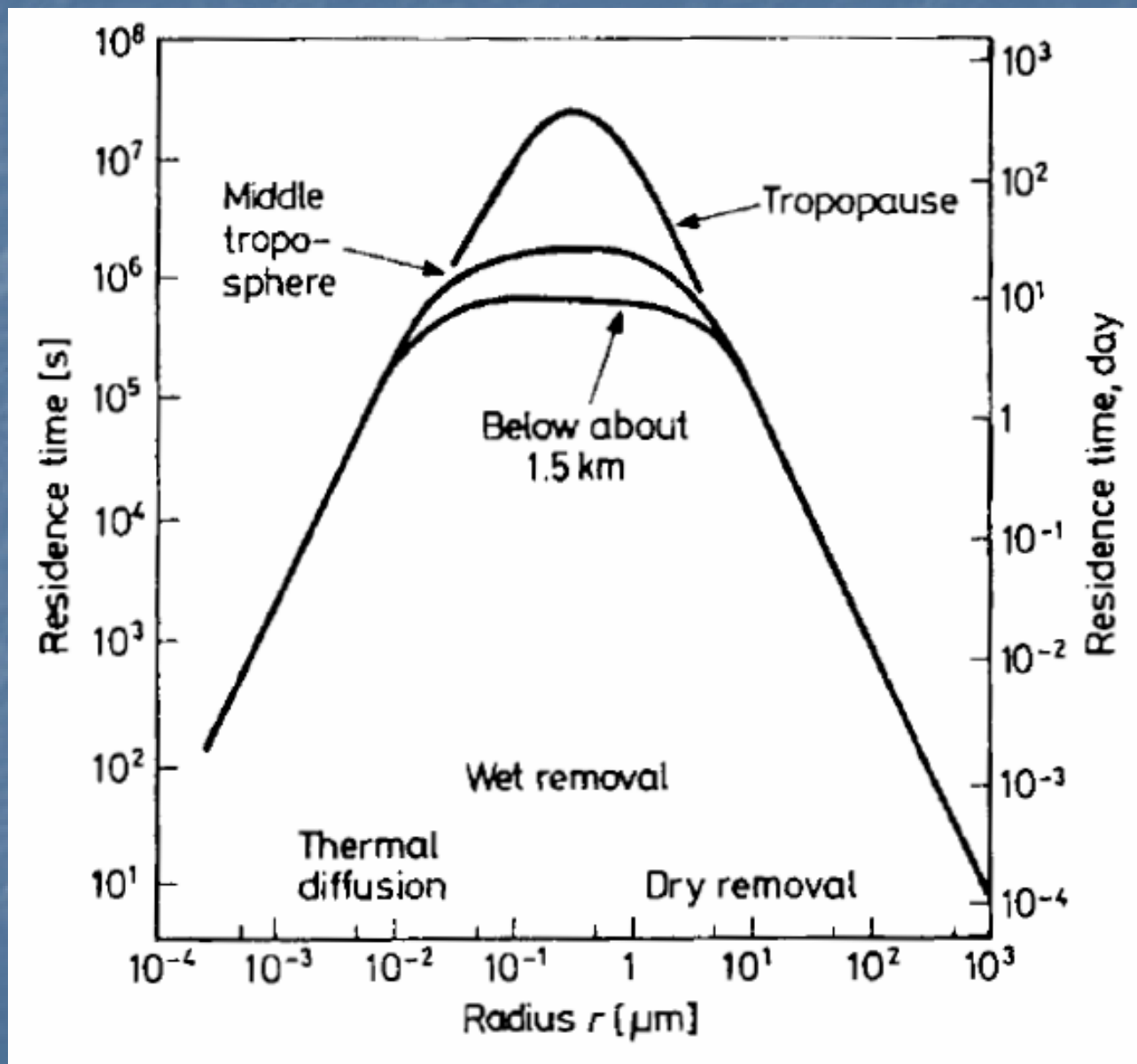
## Koaguláció:

**Minél kisebb egy részecske, annál rövidebb a légköri tartózkodási ideje**





# Aeroszol részecskék légköri tartózkodási idejének méretfüggése:

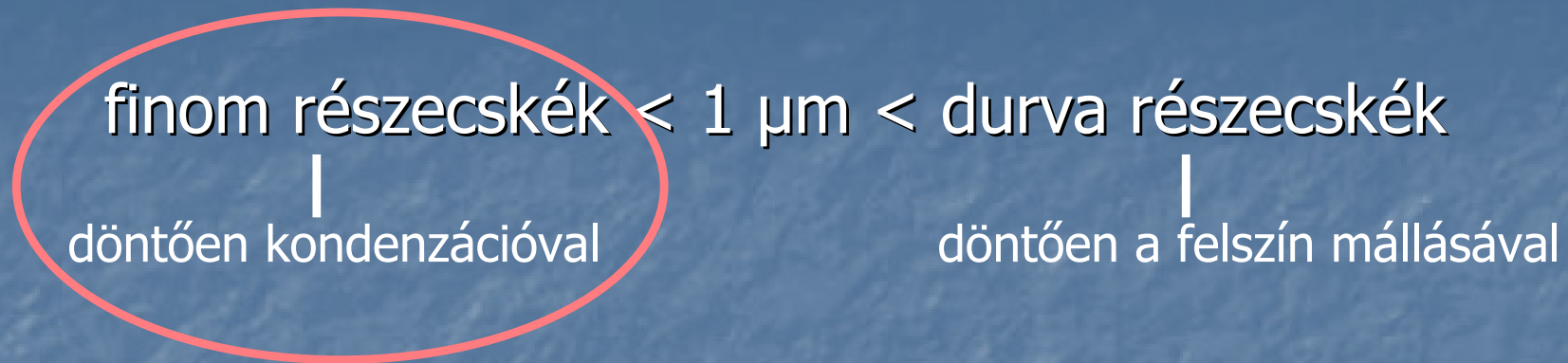


koaguláció

száras/nedves ülepedés

szedimentáció

# Aeroszol részecskék keletkezése: méretfüggő



**kondenzáció:** kondenzációra képes gőzökből  
(ált. légköri viszonyok között alacsony a telítési  
gőznyomásuk, kevésbé illékonyak)

kémiai reakcióval képződnek vagy közvetlenül  
kerülnek a légkörbe

**kondenzáció:** 1. lépés – nukleáció (gócképződés)

homogén nukleáció: csak gőzök vannak jelen

heterogén nukleáció: már meglévő részecske is részt vesz benne

## A nukleáció típusai:

- **homogén homomolekuláris:** egyetlen gőz (csak túltelített gőzben)
- **homogén heteromolekuláris:** több gőz egyidejűleg
- **heterogén homomolekuláris:** egy gőz részecske felületén
- **heterogén heteromolekuláris:** több gőz egyidejűleg részecske felületén

## A nukleáció folyamata:

- néhány molekula összetapad, de szét is esik
- telítettség növekedésével, túltelítettség kialakulásával:  
ütközés/összetapadás valószínűsége nő  
a molekulacsoport mérete elérheti a kritikus méretet:  
gyorsabban fogja be az új molekulákat, mint ahogy a  
már befogottakat elveszíti

**a nukleáció sebessége:** a kritikus méret feletti molekula-klaszterek  
keletkezési sebessége

# Nukleáció:

**Energetikailag:**  $\geq$  kritikus méret = labilis állapot  
további növekedés nem igényel energiát  
(nő, amíg van miből)

**Kritikus méret:** túltelítettség<sup>2</sup>től függ  
nagyobb túltelítettség<sup>2</sup>nél kisebb a kritikus sugár

**Más megközelítés:** görbült felszínre nagyobb a telítési gőznyomás



Minden befogott molekulával nő a sugár, csökken a telítési gőznyomás



nő a túltelítettség  $\rightarrow$  gyorsul a kondenzáció  
(amíg nem csökken a gőznyomás)

# Nukleáció:

**Homogén homomolekuláris nukleáció:** csak túltelített gőzben

**Homogén heteromolekuláris:** akkor is, ha az egyes gőzökre külön-külön a levegő nem túltelített

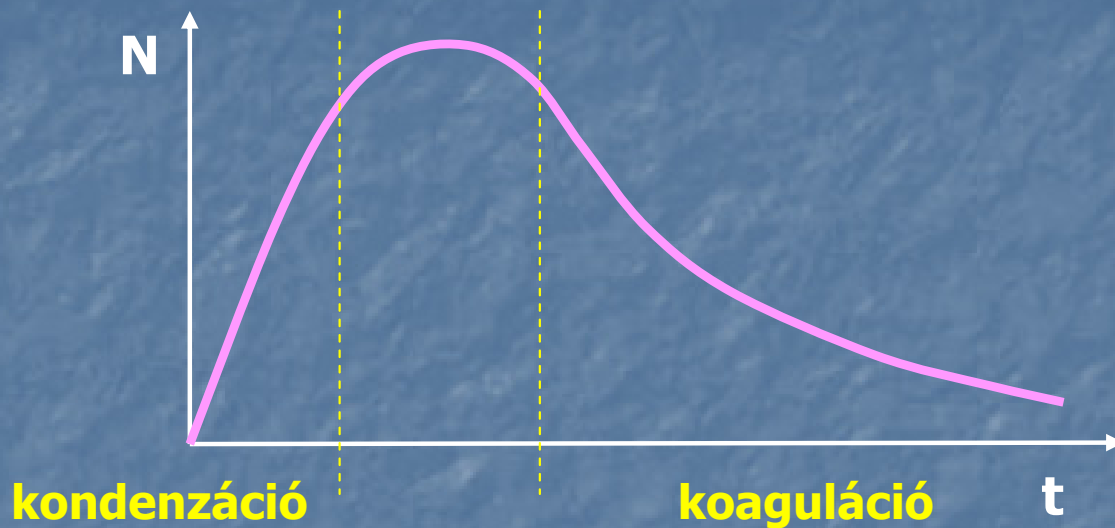
vízgőz mindig van → gyakori nukleációs mód a troposzférában  
(vegyes molekula-klaszterek jönnek létre)

(pl. a vízgőzre vonatkozó telítettségétől függően a  $\text{H}_2\text{SO}_4$  kondenzációhoz szükséges gőznyomás akár 3 nagyságrenddel alacsonyabb is lehet, mint a homogén homomolekuláris nukleációnál)

**Heterogén homomolekuláris nukleáció:** tipikusan a vízgőz  
(és a fémgőzök) kondenzációja

A levegő szinte sohasem túltelített vízgőzzel (homogén homomolekuláris nukleáció). Mindig vannak olyan részecskék (kondenzációs magok), amelyeken a kondenzáció a vízgőzre vonatkozó telítési gőznyomásnál alacsonyabb gőznyomáson megindul.

# A részecskék koncentrációjának változása:



zárt tér,  $t = 0$  túltelített gőz

$$\frac{dN}{dt} = \left( \frac{dN}{dt} \right)_{\text{kond}} - \left( \frac{dN}{dt} \right)_{\text{koag}}$$

- 1) gőz keletkezés – a kémiai reakciók sebességétől függ  
(kiindulási anyagok mennyisége, környezeti feltételek)
- 2) nukleáció – a gőznyomástól függ (gőzkeletkezés sebessége)
- 3) koaguláció – részecskék számától, méreteloszlásától függ

# Kondenzációra képes anyagok: kénsav ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )



telítési gőznyomása viszonylag alacsony,  $\sim 10^{-2}$  Pa

jellemzően homogén heteromolekuláris nukleáció (vízgőzzel)  
sztratoszférában homogén homomolekuláris nukleáció is lehet

$\text{H}_2\text{SO}_4$  más anyagokkal **szulfát** sókat képez (pl.  $\text{NH}_3 \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ )

tengerek felett:  $\text{DMS} \rightarrow \text{SO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$  **szulfát**

iparosított területek felett:  $\text{SO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$  **szulfát**

sztratoszférában:  $\text{COS} \rightarrow \text{SO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$  **szulfát**

korom felületén közvetlen  $\text{SO}_2 \rightarrow$  szulfát transzformáció

sztratoszférában: ha nincs elég  $\text{NH}_3 \rightarrow$  szabad  $\text{H}_2\text{SO}_4$  molekulák

## Kondenzációra képes anyagok: salétromsav (HNO<sub>3</sub>)



HNO<sub>3</sub> más anyagokkal **nitrát** sókat képez (pl. NH<sub>3</sub> → NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> )

viszonylag magas a telítési gőznyomása, csak részben kondenzálódik

jellemzően homogén heteromolekuláris nukleáció (vízgőzzel)

NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> elbomolhat → nyáron több HNO<sub>3</sub> gáz fázisban (évi menet)



# Kondenzációra képes anyagok: szerves anyagok

- nem rég óta ismertek, de az aeroszol részecskék jelentős részét alkotják
- C-atomszám növekedésével csökken a telítési gőznyomás (illékonyság), könnyebben kondenzálódnak
- Nagy C-atomszámú ( $>10$ ) alifás, policiklikus aromás, oxigént (esetleg mást is) tartalmazó policiklikus vegyületek
- egy részük vízben is oldódik, kondenzációs mag lehet

# Elsődleges és másodlagos aeroszol részecskék:

**Másodlagos aeroszol részecskék:** kémiai úton keletkeznek a légkörben (pl. szulfátok, nitrátok, számos szerves aeroszol részecske)

Van közvetlen szulfát bevitel is (pl. vulkáni tevékenység, tengeri só, stb.), de darabszámra nem jelentős. Tömegre igen (nagy részecskék)!

**Elsődleges aeroszol részecskék:** nem kémiai úton keletkeznek

Egy részük szintén kondenzációval képződik a közvetlenül kibocsátott gőzökből

# Elsődleges aeroszol részecskék:

## Természetes források:

- biomassza égés – biomasszából és a talajból szerves anyagok, elemi szén (korom), fémek lehűlés során homogén/heterogén kondenzáció
- lösz erózió – finom por ( $<1 \mu\text{m}$ )

# Elsődleges aeroszol részecskék:

## Antropogén források:

magas hőmérsékletű égés → fémgőzök →  
→ lehűlés, heterogén kondenzáció

- színesfém kohászat: Cu, Cd, Zn, Ni, V, Cr, Hg,...
- széntüzelés: As, Sb, Hg, elemi szén,...
- olajtüzelés: Ni, V, elemi szén,...
- hulladékégetés: Cd, Mn, Cu, Hg, szerves anyagok (PAH, Cl-tartalmúak)
- közlekedés: Pb, nehéz szénhidrogének, PAH, elemi szén,...

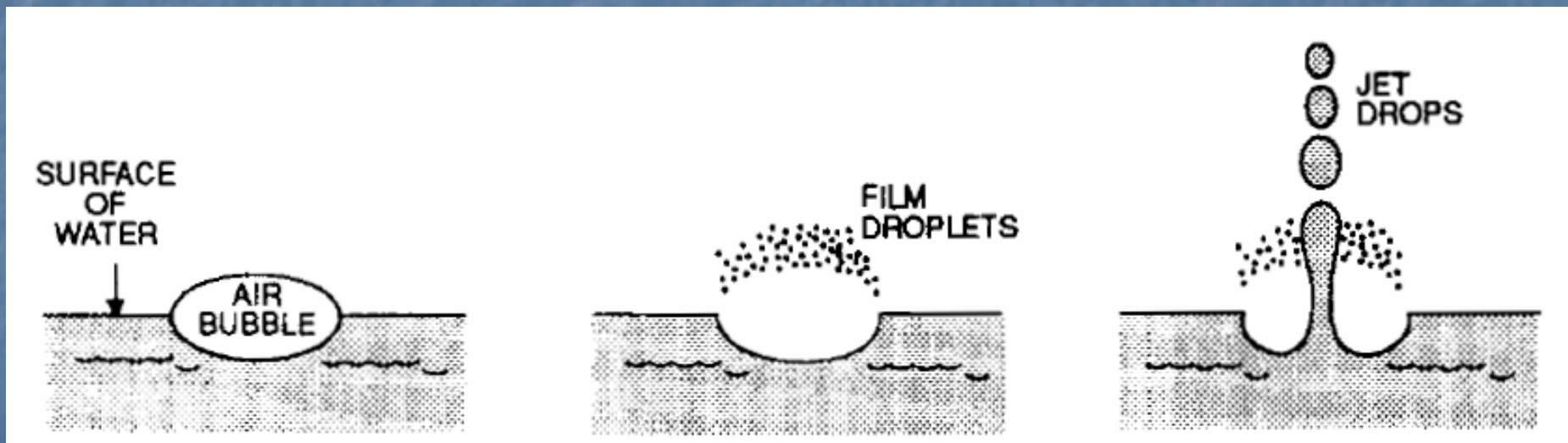
**Hg:** maradhat részben gáz halmazállapotban (illékony)

## Durva ( $>1 \mu\text{m}$ ) aeroszol részecskék:

általában közvetlenül kerülnek a légkörbe

- **Tengeri só:**  $\sim 85\%$  NaCl (+ MgCl, MgSO<sub>4</sub>, KCl, CaCl<sub>2</sub>, CaSO<sub>4</sub>,.....)

elsodort vízcsepp túl nagy, a felszínre érkező buborékok szétpattanása – buborékképződés  $\sim$  szélesebbég



## Durva ( $>1 \mu\text{m}$ ) aeroszol részecskék:

- **A felszín aprózódása** – szél erózió, talaj részecskék  
csak kevés részecske elég kicsi ahhoz, hogy tartósan a levegőben maradjon, de nagy az össztömegük
- **Kisebb források:** erdőtüzek  
vulkáni tevékenység  
biológiai eredet (baktériumok, spórák, pollenek, vírusok,...)  
meteorit por
- **Antropogén források:** ipari folyamatok (pl. cementgyártás)  
erózió (utakról, mezőgazd. területekről  
felvert por, gumimorzsalék, fékbetét  
(korábban azbeszt), stb...)  
építési folyamatok („por”)

# Aeroszol részecskék anyagmérlege:

	Természetes		Antropogén
kénvegyületek → szulfát	150	+	190 Mt/év
NO <sub>x</sub> → nitrát	30	+	50 Mt/év
VOC → szerves aeroszol	100-400	+	10 Mt/év
ipar, közlekedés			110 Mt/év
biomassza égetés			90 Mt/év
talajerózió	1500		Mt/év
tengeri só	1300		Mt/év
vulkáni por	30		Mt/év
biológiai anyag	50		Mt/év
meteorit por	1		Mt/év
<b>ÖSSZESEN</b>	<b>3100-3400</b>	<b>+</b>	<b>450 Mt/év</b>

# Aeroszol részecskék koncentrációja:

óceánok felett:	10-100 db/cm <sup>3</sup>
vidéki levegő, kontinentális háttér:	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup> db/cm <sup>3</sup>
városi levegő:	>10 <sup>5</sup> db/cm <sup>3</sup>

## **Lényeges a méret szerinti eloszlás!**

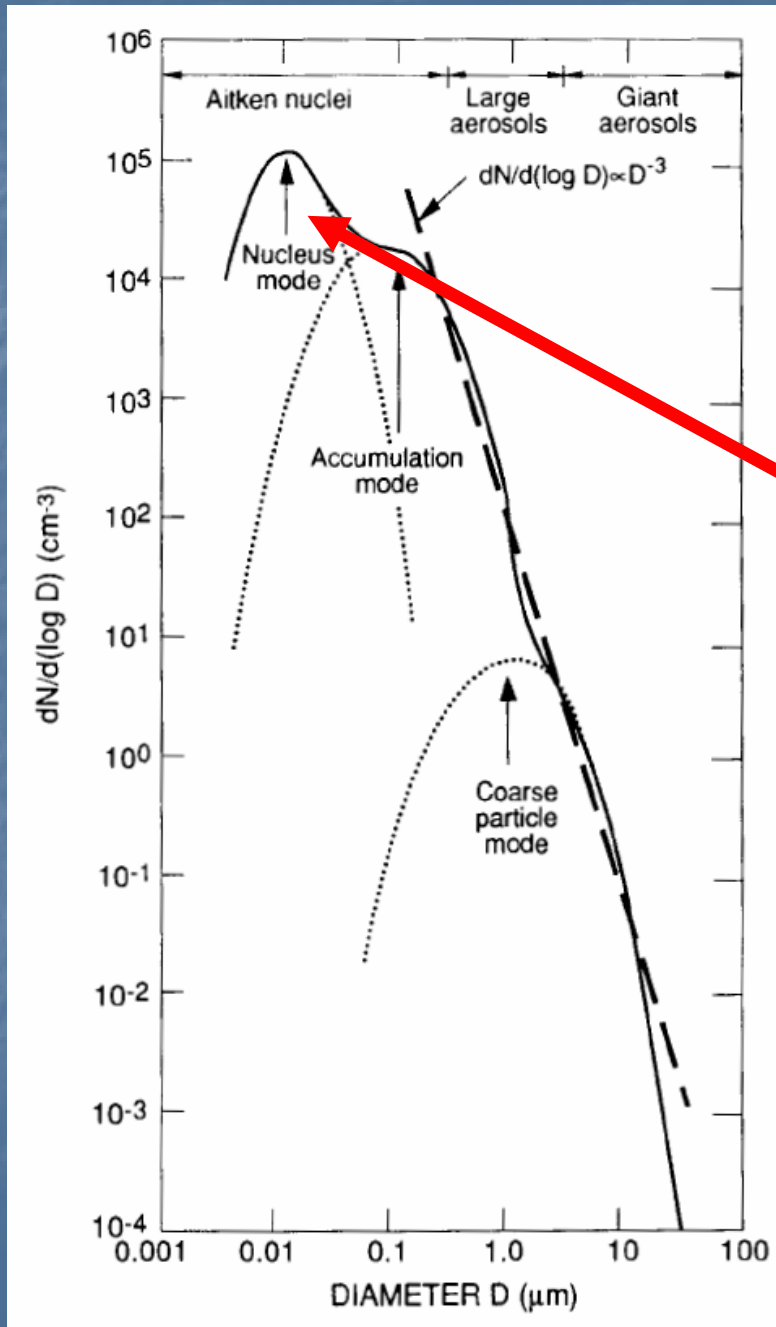
ettől függ a kondenzációban játszott szerepük

ettől függ a légköri optikában, energiaátvitelben játszott szerepük

ettől függ az egészségügyi hatásuk



# Aeroszol részecskék méreteloszlása:



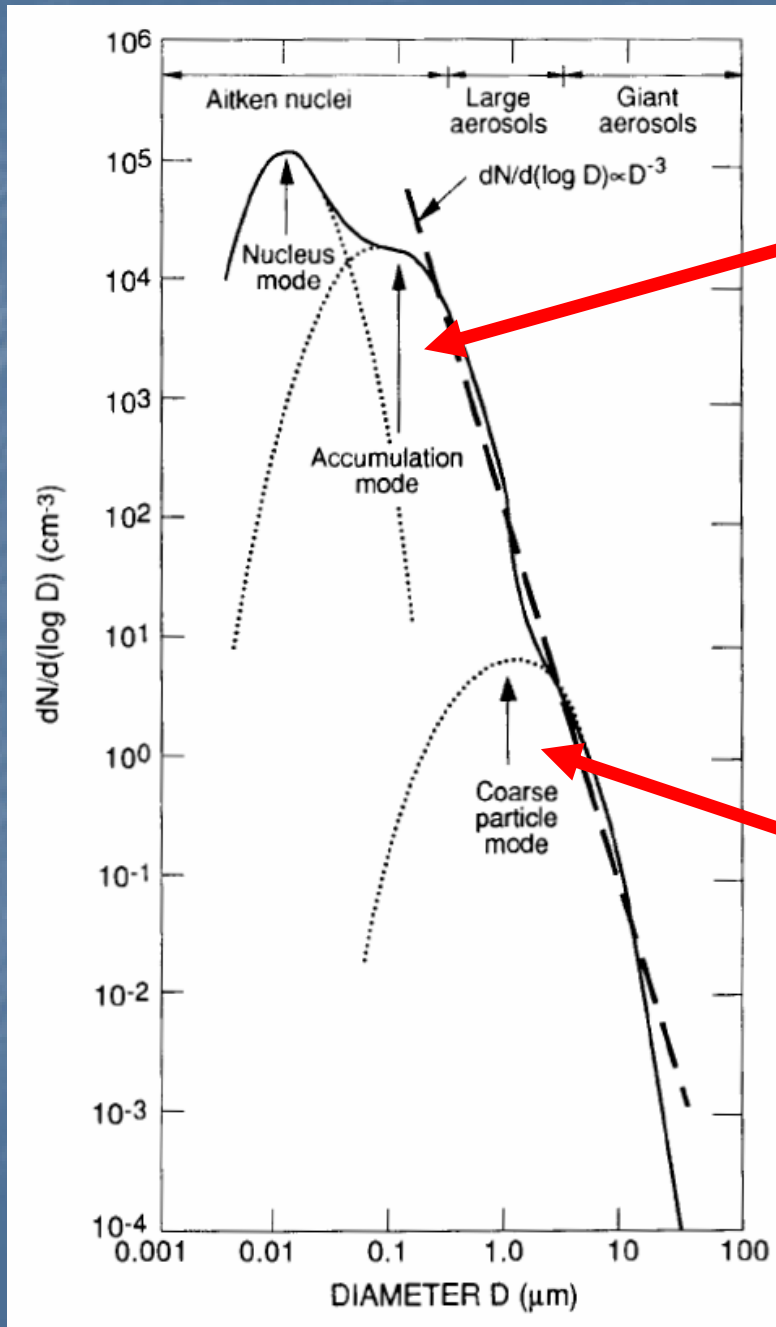
a méret szerinti eloszlás általában 3 lognormál eloszlás összege – arányuk helytől, időtől függ

**1. Nukleációs eloszlás:** nukleációval keletkező részecskék. A gőzforrás közelében jelentős. Gőzutánpótlás híján jelentősen csökken (koaguláció), a 0,1-1  $\mu\text{m}$  tartományba kerül át.

Gőzképződésben fontos a fotokémiai-  
lag keletkező OH (napi menete van).  
Éjjel csökken a bioszféra VOC  
kibocsátása (fény, T), lassulnak a  
reakciók.

**A méret szerinti eloszlásnak napi menete van**

# Aeroszol részecskék méreteloszlása:



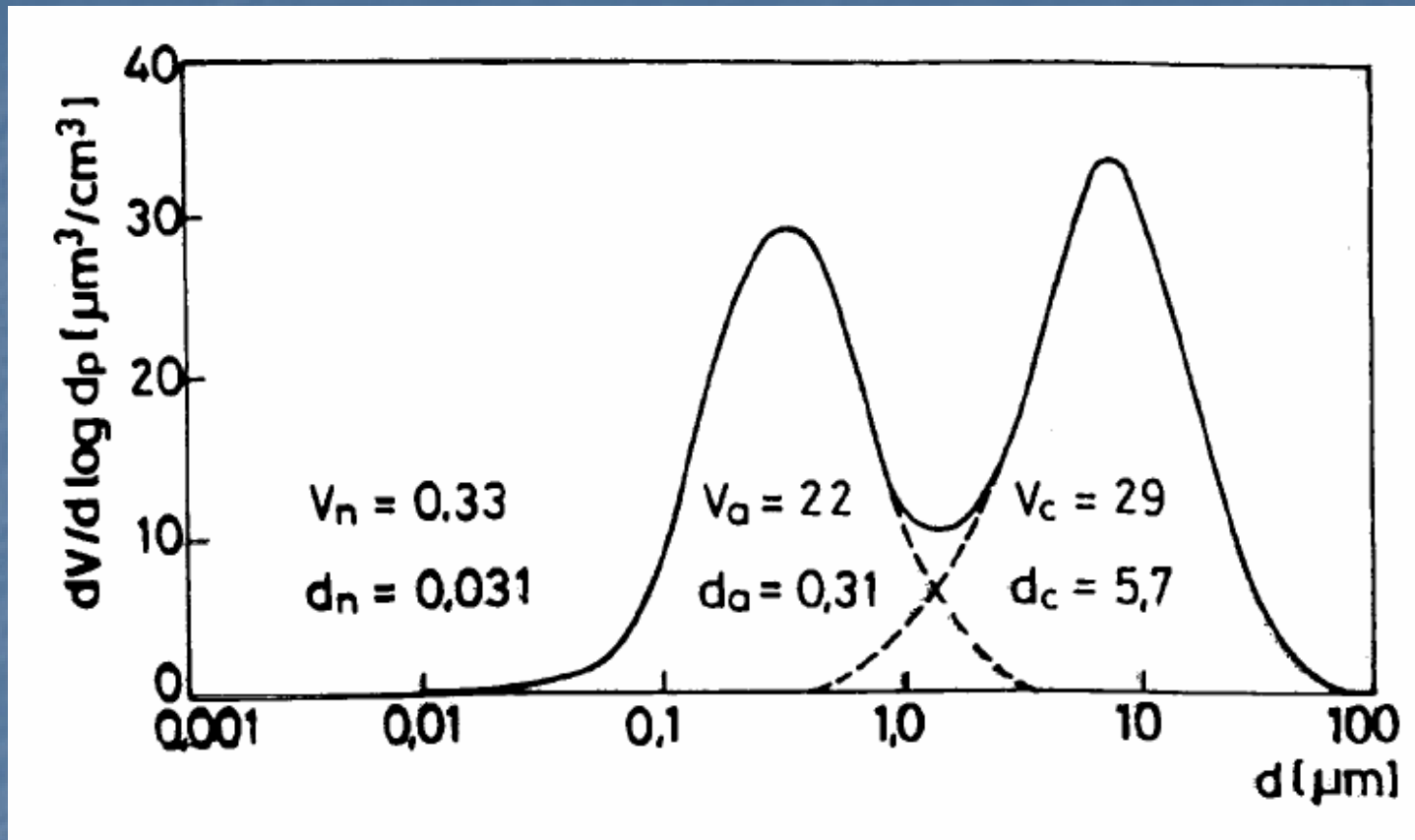
## 2. Akkumulációs eloszlás:

- a nukleációs eloszlásból „akkumulálódik” ide az anyag koagulációval

- ezekre a részecskékre kondenzálódik az anyag heterogén kondenzáció esetén.

## 3. Durva eloszlás: talaj és tengeri só részecskék

# Aeroszol részecskék méreteloszlása:

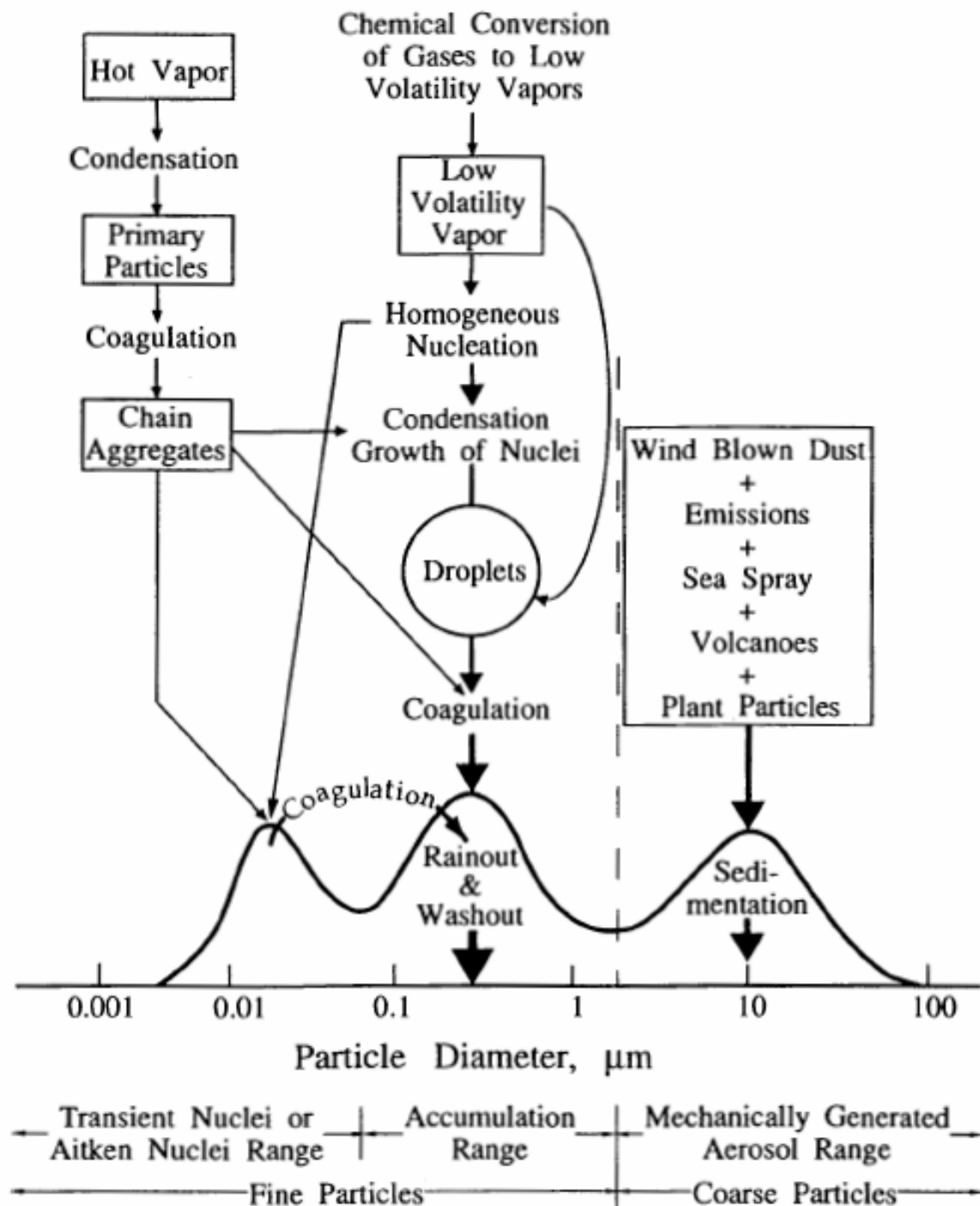


rengeteg kicsi, sok közepes, kevés nagy részecske,

**DE**

a tömeg/térfogat  $> 50\%$  a durva és csak  $< 1\%$  a nukleációs tartományban

$m \sim r^3$  -- 1 000 000 db 0,1  $\mu\text{m}$ -es részecske tömege = 1 db 10  $\mu\text{m}$ -es részecskéével



**FIGURE 2.15** Idealized schematic of the distribution of particle surface area of an atmospheric aerosol (Whitby and Cantrell, 1976). Principal modes, sources, and particle formation and removal mechanisms are indicated.

# Aeroszol részecskék kémiai összetétele:

- **Nukleációs tartományban:** a kondenzálódó gőzöknek megfelelő összetétel

Jelentős részben  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . Sok a részleteiben alig ismert szerves anyag + elemi szén. Iparosított területeken jelentős lehet az  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  mennyiség

- **Akkumulációs tartományban:** vegyes összetétel

Nukleációs tartományból koagulációval. Nem változik az összetétel, de vegyes részecskék jöhetnek létre. A részecskékre heterogén kondenzációval kerül anyag (pl. fémek). C, S, N tartalom jelentős

- **Durva tartományban:** ásványi anyagok a kontinensek felett, tengeri só az óceánok felett.

Talaj: Si, Al, Fe, Ca (oxidok)

Óceánok: Na, K, Ca, Mg (kloridok, szulfátok, stb.)

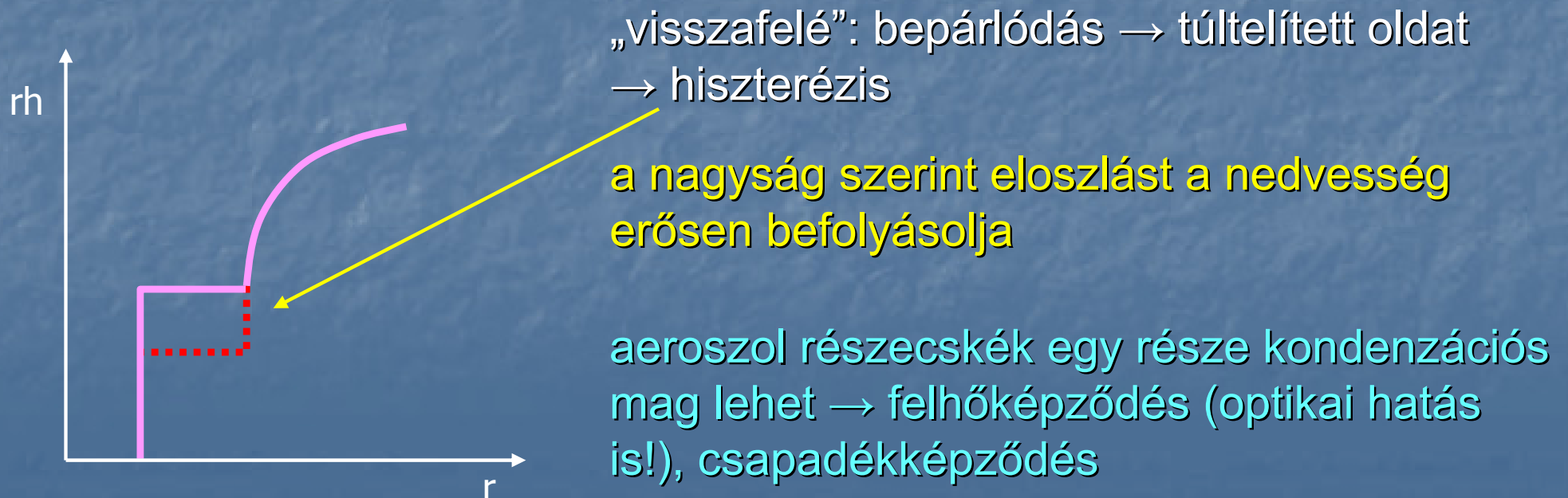
# Aeroszol részecskék kikerülése:

- **Száraz ülepedés:** felszíni adszorpció  
nagy részecskék – szedimentáció is  
(gravitációs ülepedés)
- **Nedves ülepedés:** vízben oldhatók kondenzációs magként  
kis részecskék - koagulációval a cseppekbe  
nagy részecskék - ütközéssel a hulló cseppekbe

# Aeroszol részecskék hatása:

**A) Légekörfizikai hatás:** sugárzásátvitel - visszaver  $\rightarrow$  hűt (pl. szulfát)  
- elnyel  $\rightarrow$  fűt (pl. korom)  
- látástávolság csökkentése

- vízben oldható, higroszkópos részecskéken 100% rel. nedvesség alatt megindul a vízgőz kondenzációja oldatcsepp keletkezik
- oldatcseppre a telítési gőznyomás alacsonyabb, mint a szilárd részecskére  $\rightarrow$  a relatív túltelítettség megnő  $\rightarrow$  a csepp (görbületi sugár) nő  $\rightarrow$  a relatív túltelítettség nő  $\rightarrow$  a csepp hígul  $\rightarrow$  a relatív túltelítettség csökken  $\rightarrow$  egyensúly



# Aeroszol részecskék hatása:

**B) Egészségügyi hatás:** belélegezve egészségkárosító hatásuk lehet (méret- és anyagfüggő)

- $> 10 \mu\text{m}$ : elakad a felső légutakban, viszonylag gyorsan kiürül
- $< 1 \mu\text{m}$ : a tüdő mélyére is lekerülhet, nehezen távozik, hosszan tartó hatás
- vízben oldhatók: elnyelődnek a felső légutakban, viszonylag gyorsan távoznak
- fémek: mérgezési tünetek
- PAH: rákkeltő hatás
- korom: más anyagok (pl.  $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{SO}_4$ /szulfát) hordozója lehet

**Mit mérjek?** Darab-koncentráció, tömeg-koncentráció, kémiai összetétel, méret szerinti eloszlás (+kémiai összetétel)?

**Mindent nem lehet (pénz!)**

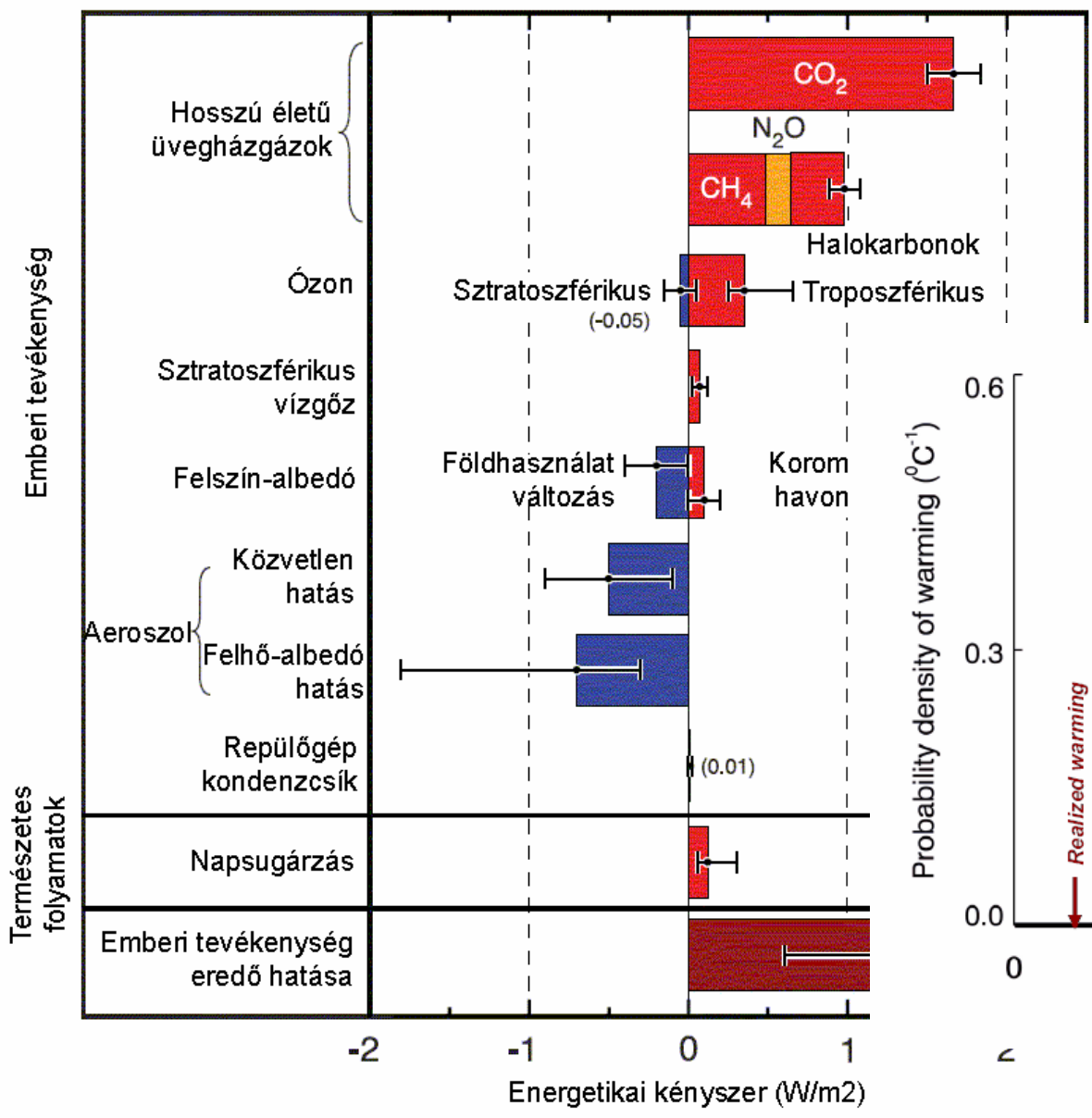
$\text{PM}_{10}$ :  $< 10 \mu\text{m}$  tömeg-koncentráció ( $\text{PM}_{2.5}$  és  $\text{PM}_{1.0}$  is kellene)  
kívánatos lenne a kémiai összetétel is



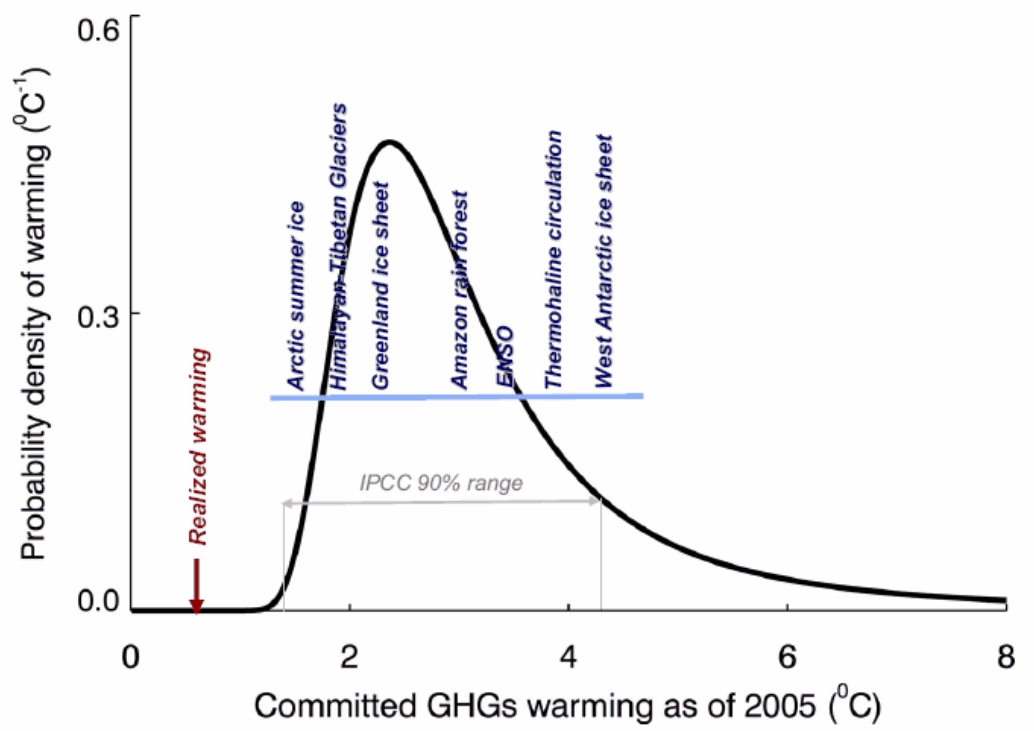
# Aeroszol részecskék hatása:

**C) Környezeti hatás:** az antropogén eredetű részecskék többlet terhelésként jelentkeznek

- szulfát, nitrát: savasodás – növény- és halpusztulás, korróziós károk
- nitrát, ammónium: eutrofizáció
- nehézfémek: oldható formában felszívódnak a vegetációban – mérgezés, beépülés a táplálékláncba
- elemi szén (korom): elősegíti a korróziót, esztétikai kár
- antropogén szerves anyagok: sok közöttük a karcinogén, mutagén, teratogén
  - PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons - policiklikus aromás szénhidrogének): sok rákkeltő
  - POP (Persistent Organic Compounds – lassan lebomló szerves anyagok): növényvédőszeres, klórtartalmú égési származékok és ipari melléktermékek – rákkeltő, mutagén, beépül a táplálékláncba (elsősorban a tengeri élővilágba)



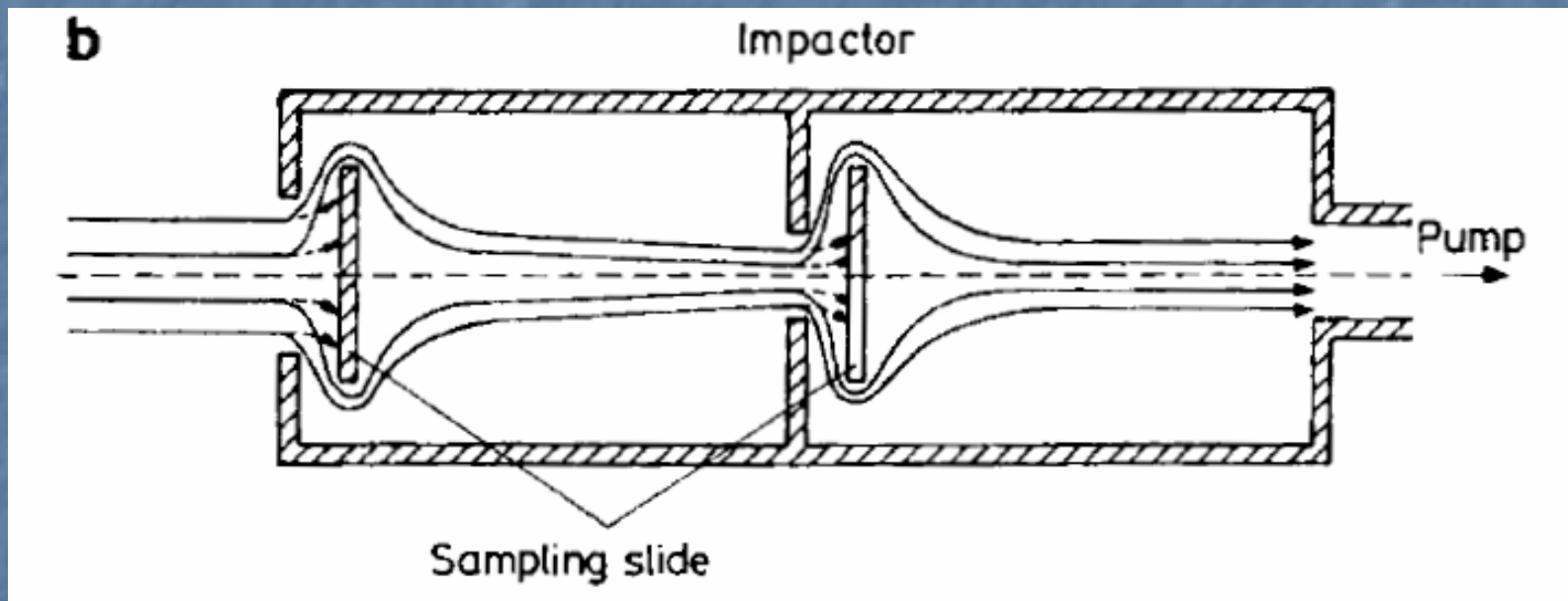
0,8°C → 2,4°C



# Aeroszol részecskék mérése:

**Mintavétel:** többnyire szűrőn (teflon, papír, üvegszál, stb.)

**Nagyság szerinti eloszlás:** (kaszád) impaktor



Szűrőkből: tömeg-koncentráció (aeroszol tömeg/átszívott légtérfogat)  
anyagösszetétel mérések

# Aeroszol részecskék mérése:

## Anyagi összetétel vizsgálata szűrőről:

- szűrőről leoldott anyag kémiai analízise (spektrofotometria, kromatográfia [GC, IC, HPLC])
- szűrő elégetve – → CO<sub>2</sub> analízis (elemi+szerves szén mennyiség)
- szűrő fényelnyelése – elemi szén (=korom)
- (elektron)mikroszkópos vizsgálat – morfológiai analízis (kristályok, spórák, stb.)
- nukleáris módszerek (PIXE, neutron aktiváció, röntgen-fluoreszcencia, stb.) – főleg fémek, ásványi anyagok kimutatása akár egyedi részecskeanalízis is lehetséges