

Chemie životního prostředí II – Znečištění složek prostředí

Atmosféra

(02)

Aerosoly

Ivan Holoubek

RECETOX, Masaryk University, Brno, CR

holoubek@recetox.muni.cz; <http://recetox.muni.cz>



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Atmosférické aerosoly

Termín aerosol byl poprvé použit v roce 1920 v odborné meteorologické literatuře a je obdobou termínu hydrosol, označující suspenzi pevné hmoty v kapalině.

Atmosférický aerosol je obecně definován jako soubor tuhých, kapalných nebo směsných částic o velikosti v rozsahu 1 nm - 100 μm , suspendovaných v atmosféře minimálně po dobu umožňující jejich detekci.

Atmosférický aerosol je všudypřítomnou složkou atmosféry Země.

Významně se podílí na důležitých atmosférických dějích jako je vznik srážek a teplotní bilance Země.

Atmosférické aerosoly

Zároveň jsou koncentrace aerosolu v atmosféře, velikostní distribuce částic a případně množství na ně vázaných toxických látek předmětem sledování z důvodu působení na vegetaci, živočichy, lidské výtvořy a lidské zdraví.

Jedním z nejdůležitějších parametrů ovlivňujících chování aerosolu v atmosféře je velikost jeho částic.

Aerosolové částice s největší hustotou pravděpodobnosti výskytu v atmosféře mají velikost kolem $0.3 \mu\text{m}$, jsou tedy prostým okem nerozlišitelné (nejmenší jednoduše viditelné částice mají velikost větší než $50 \mu\text{m}$).

Soubory takových částic jsou naopak velmi známé a dobře viditelné jevy v atmosféře.

Atmosférické aerosoly

Vzroste-li koncentrace částic v souboru do té míry, že hustota vzniklého aerosolu je **větší než 1% hustoty vzduchu** ($\rho_{\text{vzduchu}} = 1.205 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), pak se soubor jeví jako **mrak nebo oblak**.

Má zřetelně definované hranice a jeho objemové vlastnosti se velmi liší od zředěnějšího aerosolu.

Atmosférické aerosoly

Mechanicky - $> 100 \mu\text{m}$

Spalování, exhalace - $< 10 \mu\text{m}$

Reakce v atmosféře – 50 až 10 000 molekul (voda + produkty oxidace)

Aerosol – pevné nebo kapalně částice $< 100 \text{ nm}$

Kondenzační aerosol – vzniká kondenzací páry nebo chemickými reakcemi

Disperzní aerosol – vzniká dělením větších částic (prachových, kapalných)

Zamlžení – velký počet kapiček vody

Opar – snížená viditelnost v důsledku velkého počtu částic

Mlha – kapalně částice

Kouř – částice vznikající při spalování

Aerosol – několik molekul síranu amonného až 10 000 molekul H_2SO_4 při 30% relativní vlhkosti – $0,01 \mu\text{m}$

Atmosférické aerosoly

O mlze lze hovořit v případě kapalného aerosolu vzniklého kondenzací přesycených vodních par nebo atomizací kapaliny, kdy částice mají kulový tvar a velikost v rozsahu desetin mikrometru do 100 μm .

Za opar se označuje obdobný aerosol mající vliv zejména na viditelnost v atmosféře.

Jako dým se jeví aerosol z pevných částic obvykle menších než 0.05 μm , které mají tvar shluků nebo řetězců tvořených aglomerací částic primárně vzniklých kondenzací par generovaných zejména při vysokoteplotních procesech.

Podobně lze definovat kouř, který navíc obsahuje kapalně částice a je výsledkem nedokonalého spalování.

Atmosférické aerosoly

Naopak soubor hrubých částic, větších než $0,5 \mu\text{m}$, vzniklých působením mechanických sil na mateřskou pevnou hmotu, označujeme jako prach, podobně jako sprej nebo tříšť, které vznikají působením mechanických sil na kapalinu.

Smog je obecný termín označující viditelné znečištění atmosféry zejména v městských oblastech.

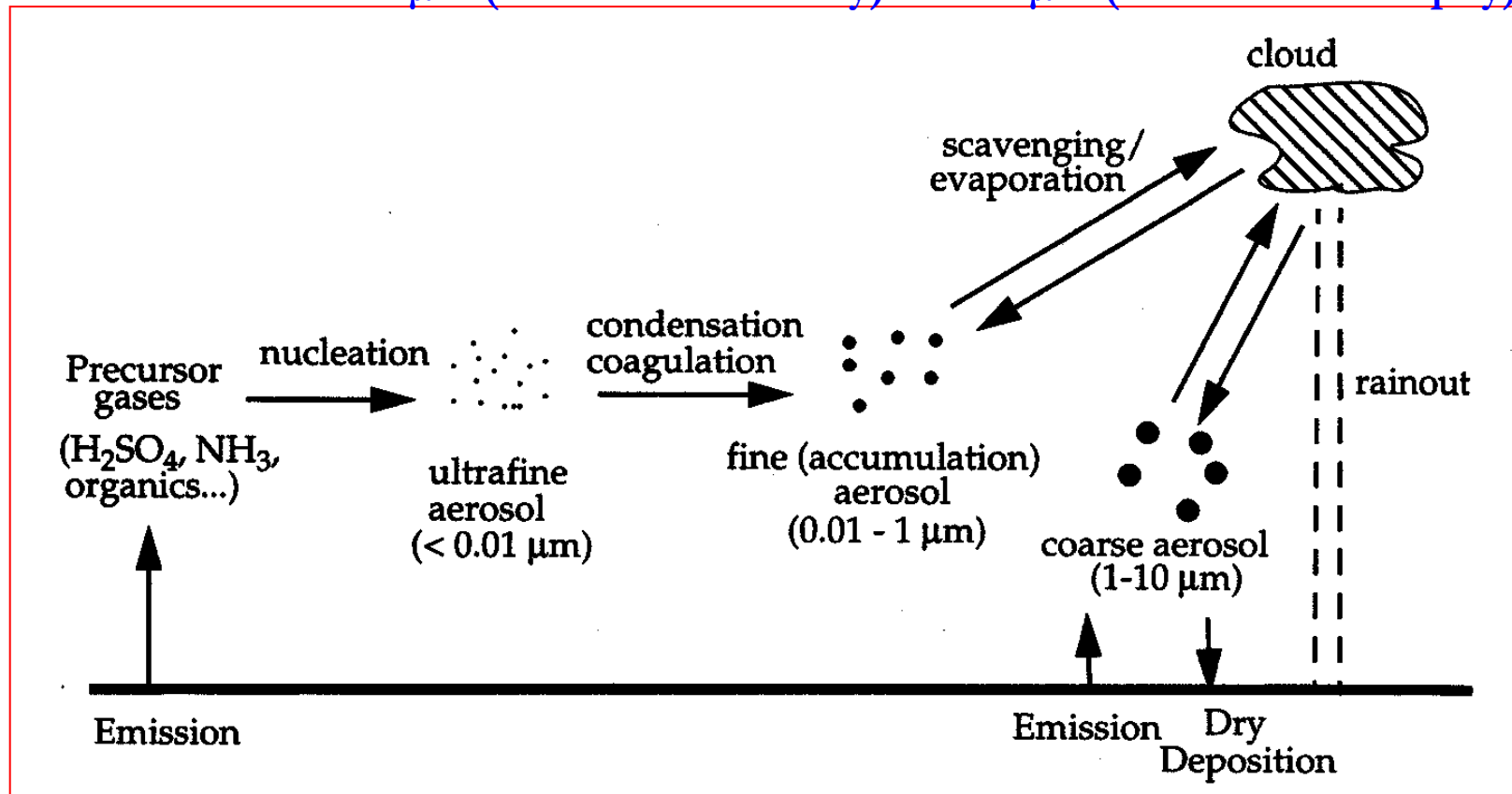
Termín vznikl složením slov smoke-fog (kouř-mlha).

Aerosol fotochemického smogu tvoří kapalně nebo pevně částice obvykle menší než $2 \mu\text{m}$.

Původ atmosférických aerosolů

Aerosol: dispergovaná kondenzovaná hmota suspendovaná v plynu

Rozmezí velikostí: 0.001 μm (molekulární klastry) do 100 μm (malé dešťové kapky)



Environmentální význam: zdraví (respirace), viditelnost, radiační rovnováha, tvorba oblaků, heterogenní reakce...

Atmosférické aerosoly

Se zřetelem k prostorové lokalizaci zdroje aerosolu rozlišujeme aerosol primární a sekundární.

V prvním případě jsou částice aerosolu emitovány do atmosféry přímo ze zdroje.

Naopak sekundární aerosol vzniká chemickou reakcí plynných složek atmosféry.

Vznik sekundárního aerosolu se označuje zkráceně jako konverze plyn-částice (gas-to-particle conversion).

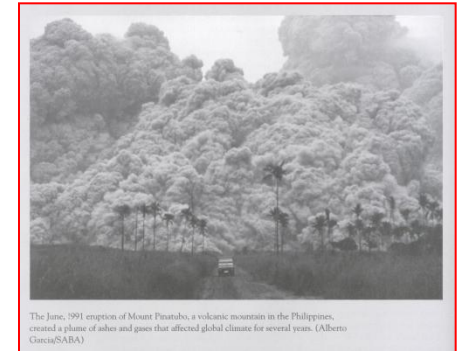
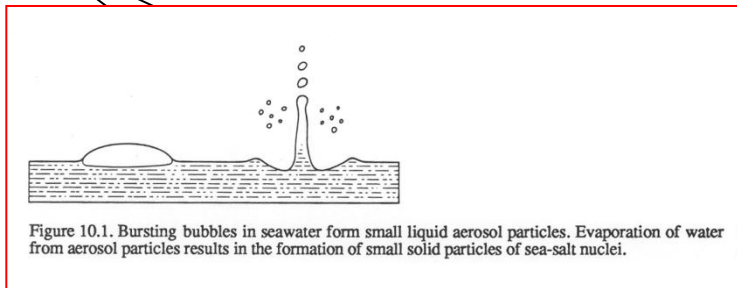
Zvláštní kategorií aerosolu je bioaerosol, zahrnující životaschopné organismy jako jsou viry, bakterie, houby a případně jejich části a živočišné a rostlinné produkty jako spory a pyl.

Atmosférické aerosoly

Dělení dle:

Přírodní - vulkanická činnost, tvorba tuhých částic odpařením vody z kapiček stržených z vodní hladiny, lesní požáry, rostlinná produkce (pyl.), prach

- původu:



Antropogenní - spalování fosilních paliv, výroba cementu, černá metalurgie, prach

Primární – úlet (s), (l) ze zdrojů

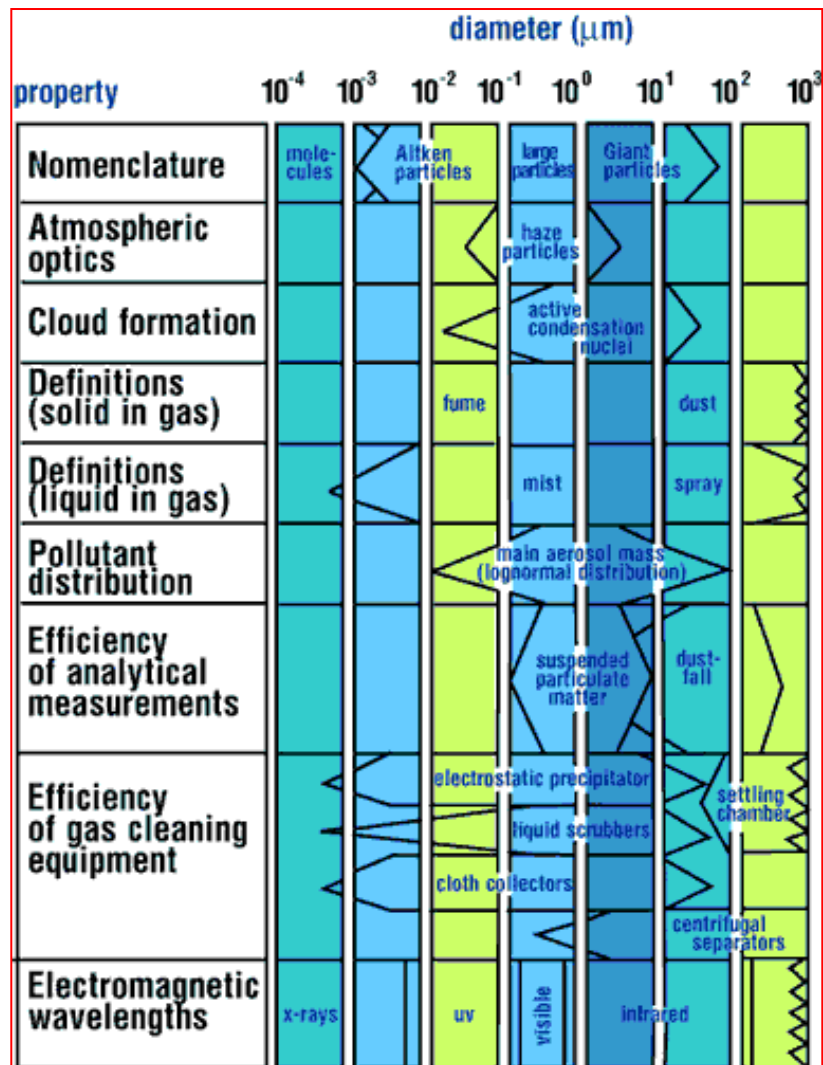
- vzniku:

**Sekundární – vznikají v atmosféře chemickými reakcemi a změnou skupenství (g) na (l), (s)
Smog**

Atmosférické aerosoly

Dělení dle:

- skupenství: (s), (l)



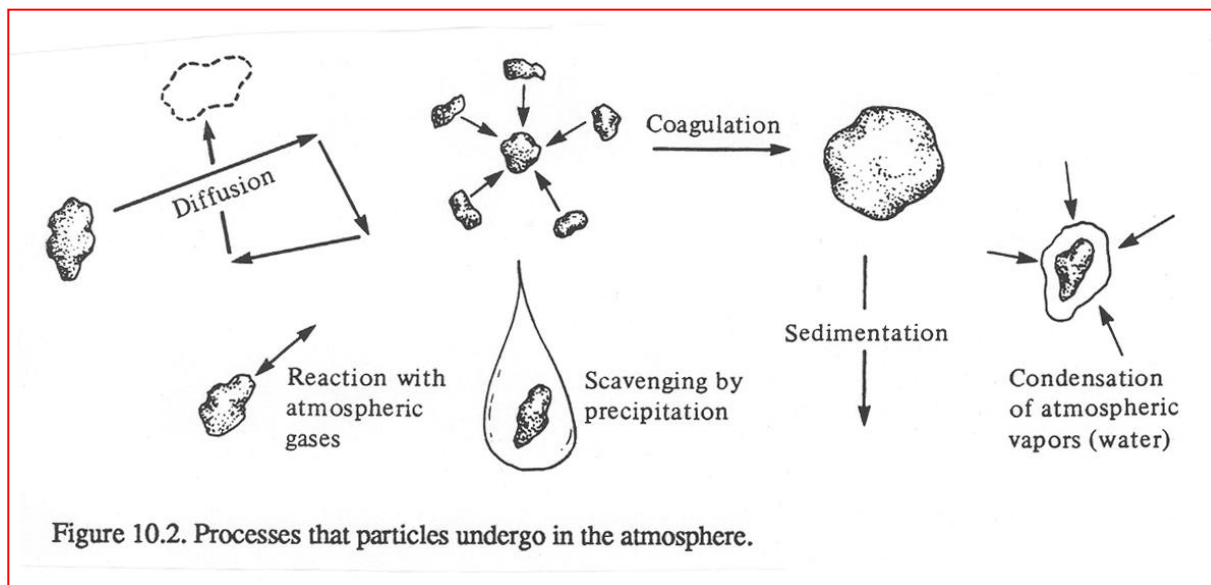
Atmosférické aerosoly

0,01 – 0,1 μm – vznikají kondenzací par a následnou koagulací

Dělení dle:
- velikosti:

0,1 – 1,0 μm – vznikají chemickou konverzí plynů na málo těkavé páry, homogenní jádra se časem mění na kapičky nebo jemně disperzní tuhé částice

1,0 – 10,0 μm – částice primárního aerosolu – přímý vstup do atmosféry ze zdrojů



Atmosférické aerosoly

Velikost, tvar a měrná hustota částic aerosolu jsou nejdůležitější parametry ovlivňující jeho chování v atmosféře, přičemž velikost částic je zároveň determinující pro výběr vhodných fyzikálních zákonů k popisu jejich chování.

Například částice svou velikostí blízké velikosti průměrné molekuly vzduchu (0,37 nm) se budou pohybovat v ovzduší převážně Brownovým pohybem daným zejména difuzí, zatímco pohyb prostým okem viditelné částice je určen převážně silami setrvačnosti a gravitace.

Popis částice je pak omezen na měřenou fyzikální veličinu, jejímž měřitelným nebo spočitatelným indexem je ekvivalentní průměr částice.

Velikostní distribuce částic aerosolů

Jednotlivé částice jsou dostatečně charakterizovány ekvivalentním aerodynamickým průměrem.

Atmosférický aerosol je souborem částic obvykle značného počtu ($10^2 - 10^8$ v cm^{-3}) a různé velikosti (rozsah až 5 řádů).

Takový soubor je velmi nepraktické nebo nevhodné charakterizovat výpisem charakteristik jednotlivých částic.

Naopak, vhodné je určit počet (povrch, hmotnost) částic ve vybraných velikostních skupinách neboli stanovit velikostní distribuci částic aerosolu.

Velikostní distribuci lze poté přiřadit vhodné statistické rozdělení dat s tou výhodou, že poté ji lze stručně a jednoznačně charakterizovat stanovením vhodných bodových nebo intervalových charakteristik příslušného rozdělení.

Velikostní distribuce částic aerosolů

Vhodnou bodovou charakteristikou je aerodynamický průměr částice o hmotnosti (četnosti, povrchu), který se v souboru vyskytuje nejčastěji (**mod**) nebo přesně v polovině souboru hodnot (medián), případně dosahuje průměrné hodnoty (průměr).

Má-li distribuční křivka četnosti pouze jedno maximum, jedná se o monomodální, v případě dostatečně úzkého maxima monodisperzní aerosol, tj. aerosol o částicích s jednou převažující velikostí.

Intervalovou charakteristikou je odhad standardní směrodatné odchylky určující míru přesnosti bodových charakteristik.

Velikostní distribuce částic aerosolů

Na příkladu vzorku městského aerosolu jsou ukázány správné způsoby grafické a popisné charakterizace velikostní distribuce atmosférického aerosolu.

Veškeré úvahy ohledně distribuce aerosolu se dále vztahují k částicím majícím tvar koule.

Velikostní distribuce částic aerosolů

Částice v jednotlivých distribučních modech se od sebe liší způsobem vzniku a chemickým složením.

S hlediska zdravotního působení atmosférického aerosolu na člověka byly definovány **velikostní skupiny aerosolu** označované jako **PM_x** (Particulate Matter), kde x je 10, 2,5 nebo 1,0 v mikrometrech.

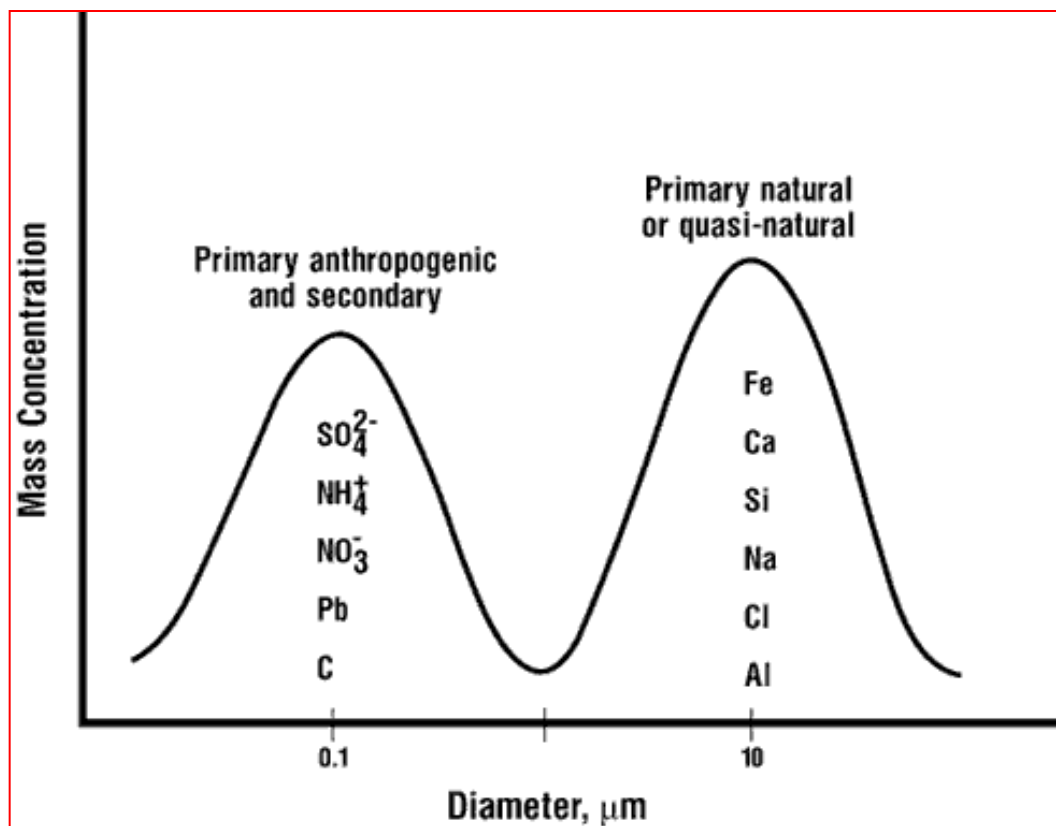
Vzorek aerosolu PM_x potom představuje takový soubor, kdy částice o aerodynamickém průměru x mikrometrů jsou předřazeným odběrovým zařízením (impaktor, cyklon) separovány s účinností právě 50%, přičemž částice menší jsou ve vzorku obsaženy s téměř 100% pravděpodobností a naopak částice větší nežli x s pravděpodobností blíží se 0.

Zdroje atmosférického aerosolu, interakce částic aerosolu

Idealizované schéma distribuce povrchu částic atmosférického aerosolu - distribuce je **trimodální**, se dvěma mody v oblasti jemných částic aerosolu a jedním modem v oblasti hrubých částic.

Rozlišení na hrubé a jemné částice má hraniční rozměr je přibližně 2,5 μm . U jemných částic lze rozlišit mody nukleační (20 nm) a akumulární (300 nm).

Bimodální rozdělení

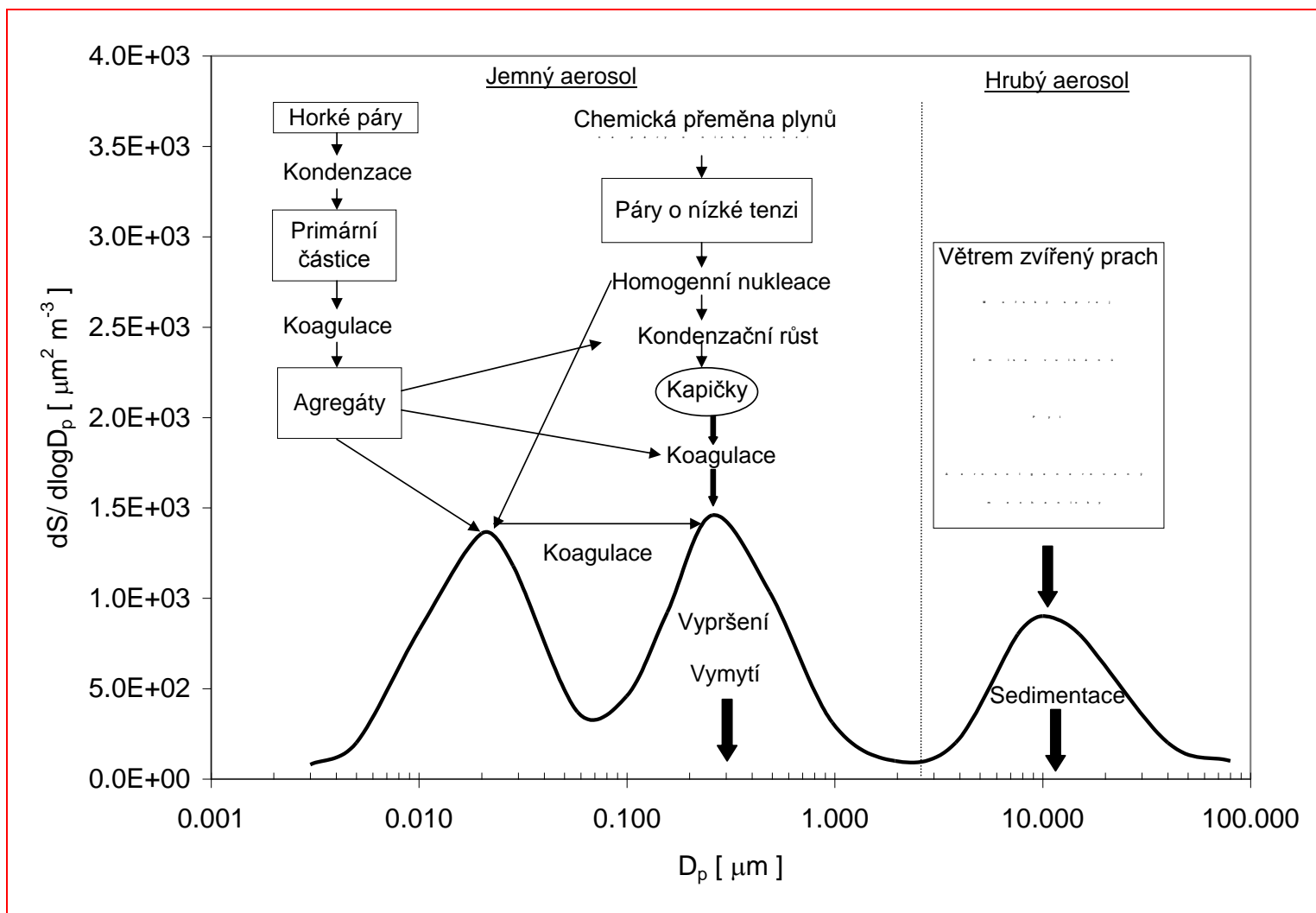


Chování částic závisí na meteorologických podmínkách – rychlosti větru a stabilitě atmosféry.

Dobře míšená nestabilní atmosféra \times stabilní nemíšená atmosféra (inverze)

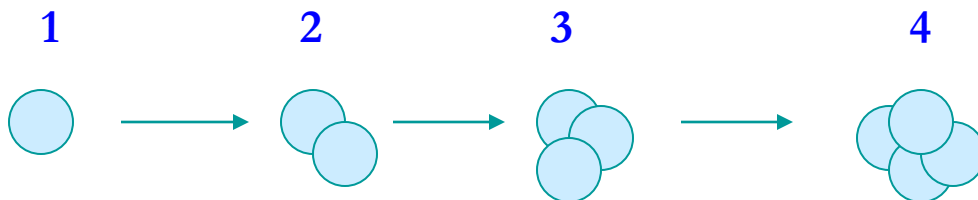
Idealizované schéma distribuce povrchu částic atmosférického aerosolu.

Zjednodušené reakční schéma a zdroje jednotlivých velikostních skupin aerosolu, jejich formy a hlavní procesy vedoucí k odstraňování aerosolu z atmosféry (dS - povrch částic; D_p - geometrický průměr částic)



Nukleace aerosolu

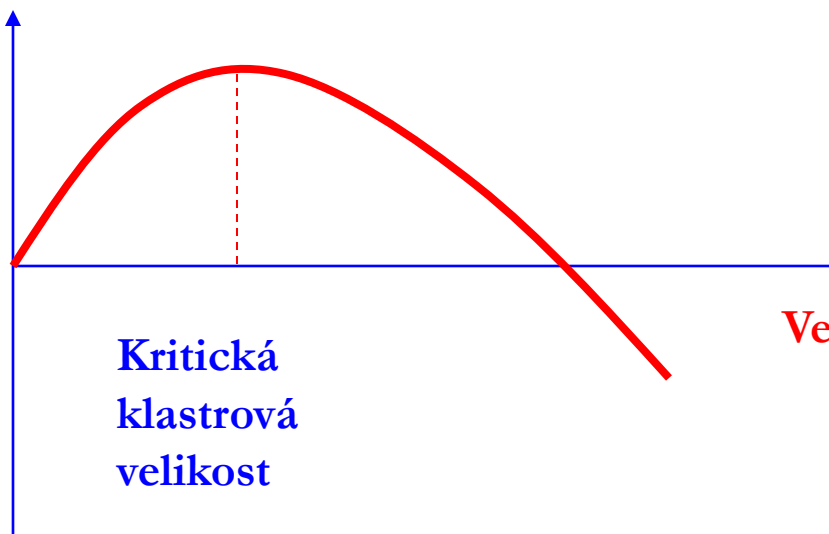
Molekuly



Účinek
povrchového
napětí

Teplem
řízené síly

ΔG



Velikost klastru

Kritická
klastrová
velikost

Přenos hmoty a energie během růstu kapky

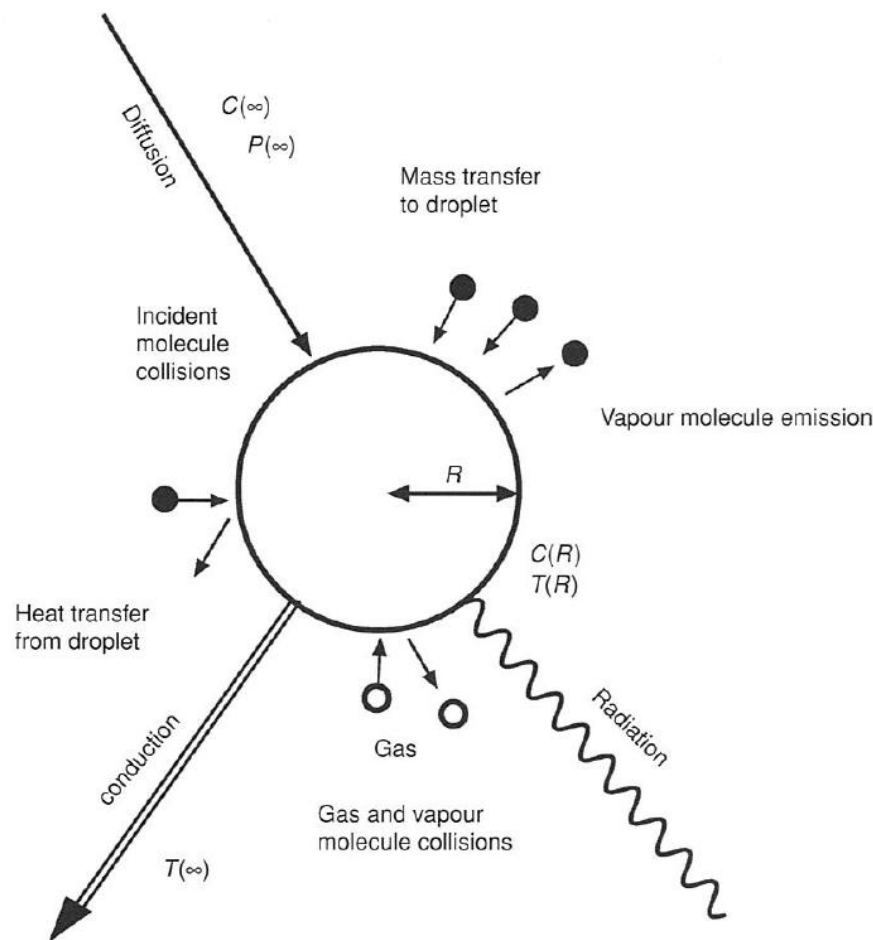


Figure 3.3 The mass and heat transfer processes which occur during droplet growth with associated release of latent heat. Radiation may add or remove heat from a droplet.

Vrstvy modelového mezifázového rozhraní aerosol – plynná fáze

Table 3.2 Layers in the kinetic model framework

Layer	Description
Gas phase	Bulk gas – asymptotic concentration $c(\infty)$
Near-surface gas phase	Gas adjacent to aerosol – within mean free path concentration $c(R)$
Sorption layer	1 molecule thick – adsorbed volatile or semi-volatile molecules
Quasi-static surface layer	1 molecule thick – non-volatile molecules
Near-surface bulk	Several molecules thick ≈ 1 nm – not directly exposed to sorption layer but affects the quasi-static surface layer
Bulk	Mainly homogeneous liquid or solid, but could have slow diffusion of trace species into it

Vrstvy okolí kapky nebo částice uvažované v modelu aerosolové a oblačné povrchové chemie

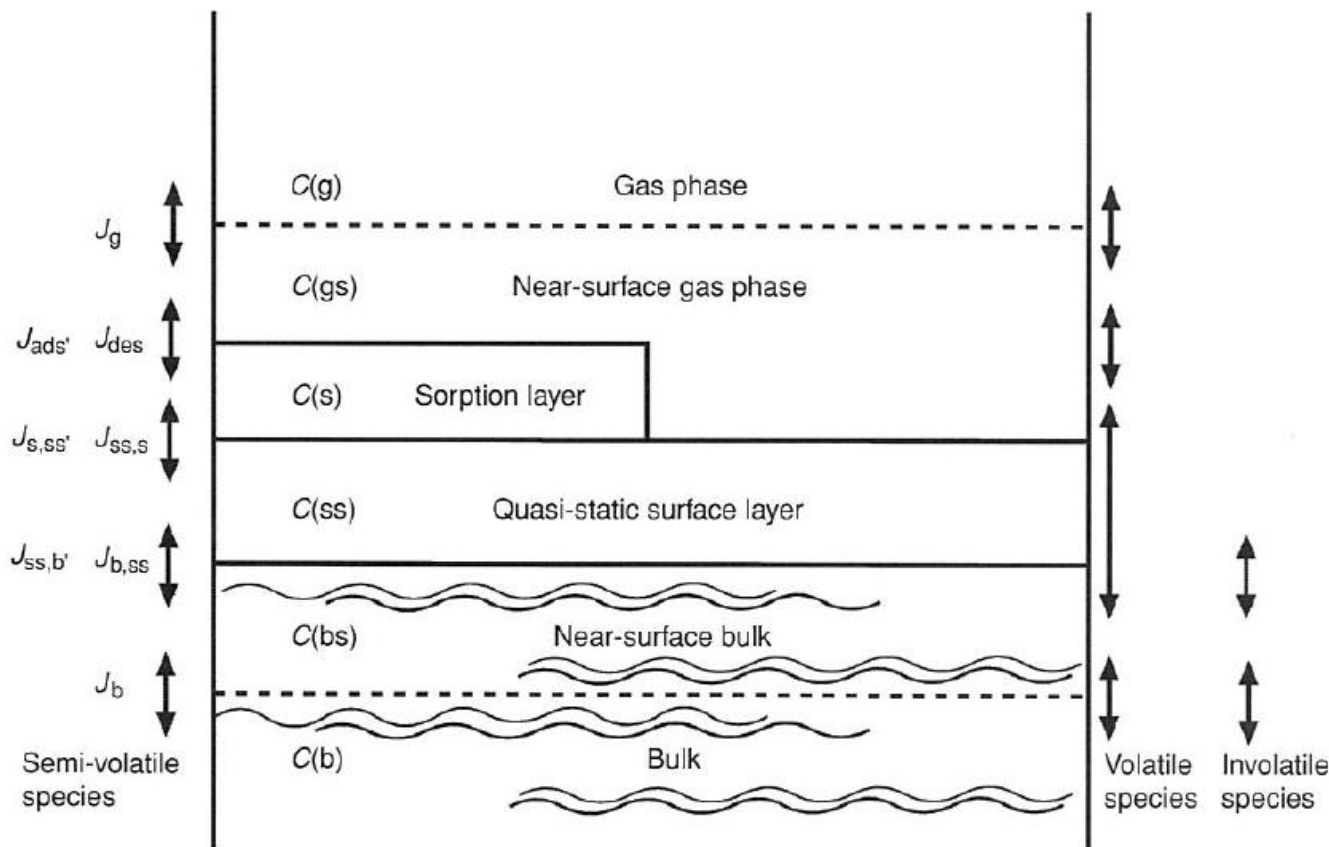


Figure 3.5 Layers surrounding a particle or droplet in the kinetic model framework for aerosol and cloud surface chemistry of Pöschl *et al.* [4]. Mass currents that are taken into account between the layers are indicated for involatile, semi-volatile and volatile molecules.

Aerosolové částice v oblaku

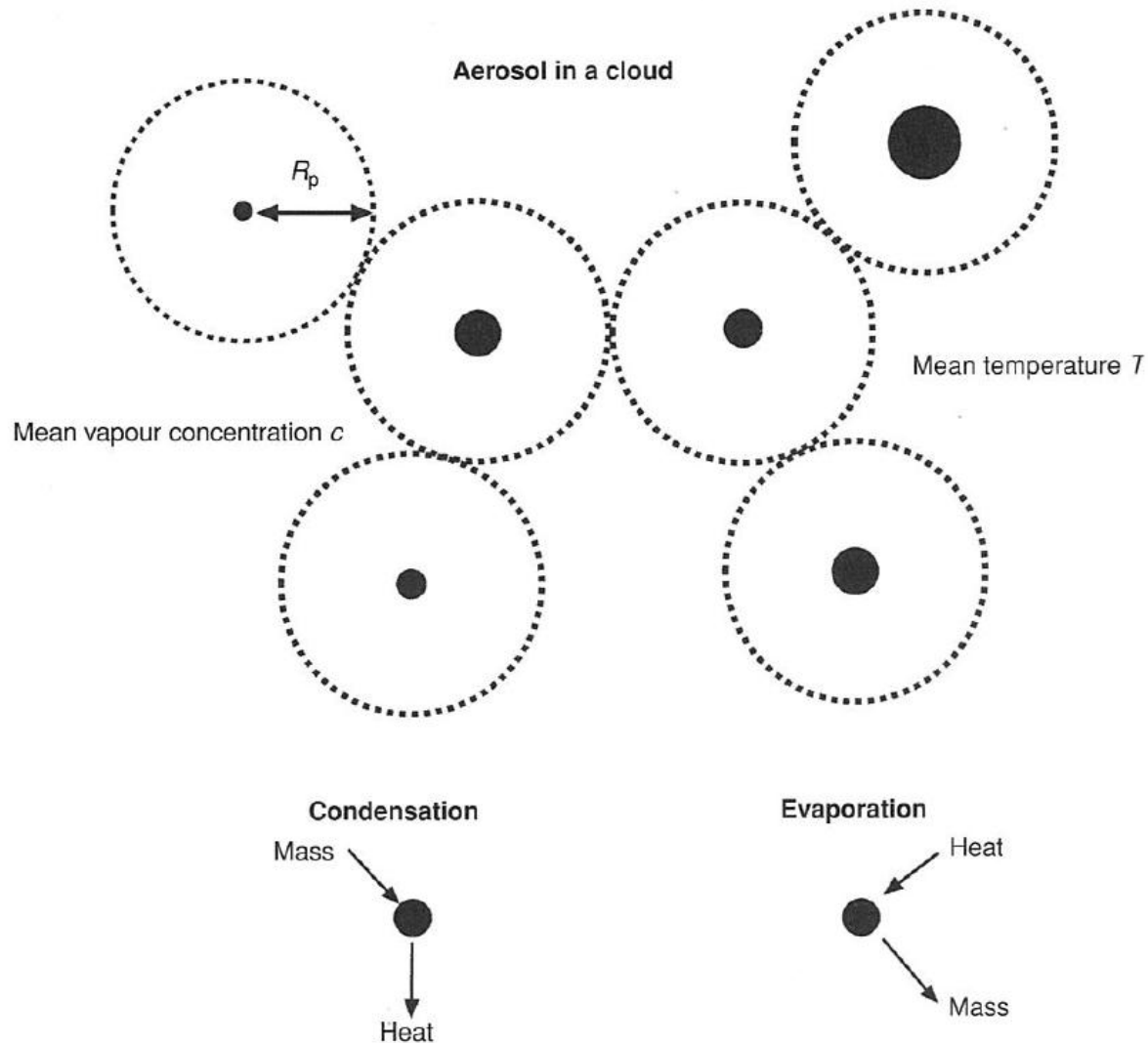


Figure 3.7 Schematic diagram showing aerosol particles in a cloud at the centres of volumes of average radius, R_p , with mean vapour concentration and temperature uniform away from the particles.

Procesy redistribuce hmoty v oblačné vodě pro čisté vodní kapky

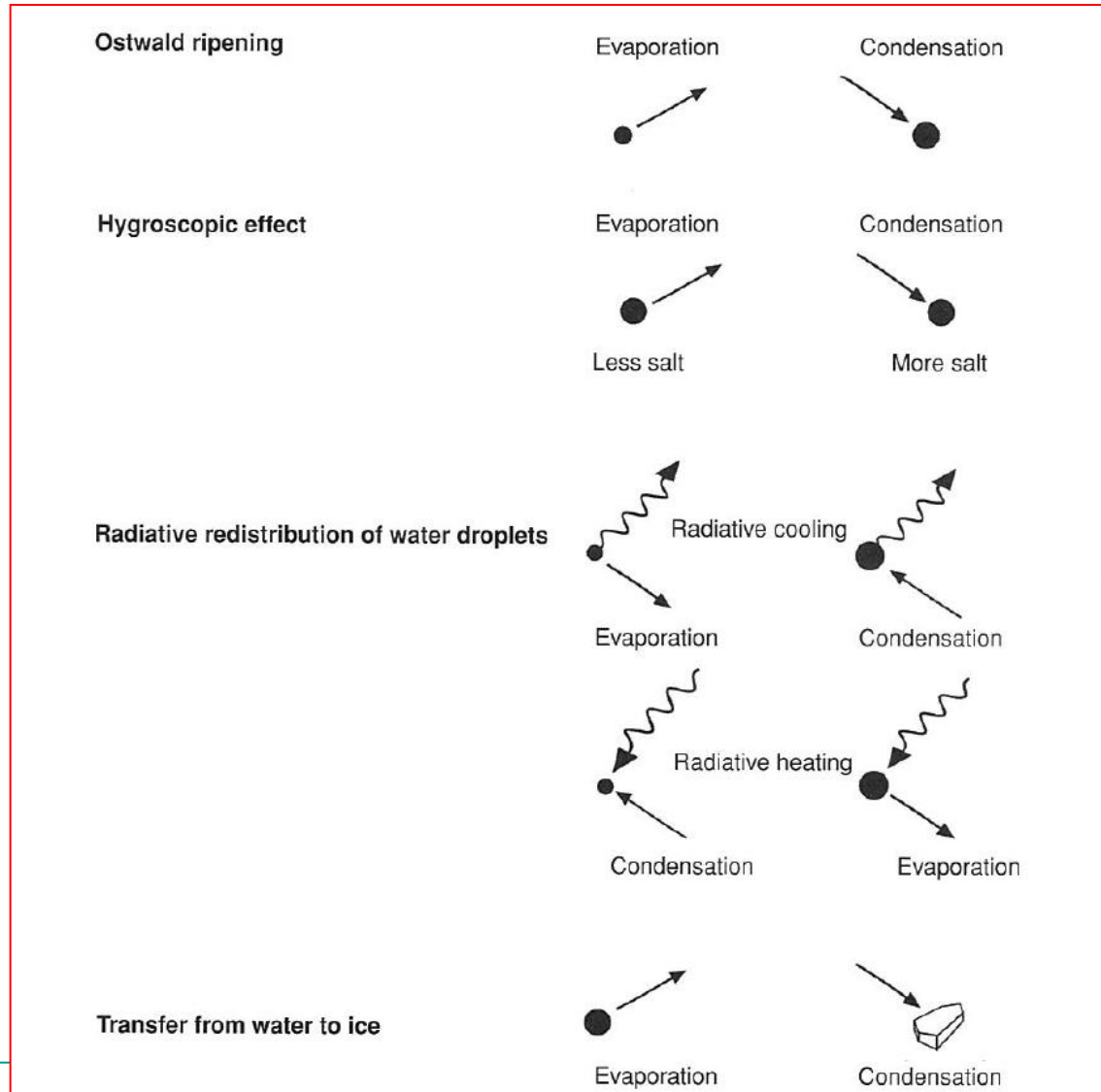


Figure 3.8 Processes which redistribute mass in a water cloud: for pure water droplets (Ostwald ripening), in response to hygroscopic material content, from the interaction with radiation.

Zdroje atmosférického aerosolu, interakce částic aerosolu

Částice nukleačního modu vznikají zejména jako důsledek vysokoteplotních procesů (hoření, tavení rud, kovů, svařování) a fotochemických reakcí v atmosféře.

Kondenzací horkých par vznikají primární, převážně kulové částice, které vzájemnou koagulací vytvoří typicky řetězovité agregáty a jejich shluky, nebo mohou koagulovat s částicemi akumulárního modu.

To je také principiální proces jejich odstraňování z atmosféry.

Částice nukleačního modu jsou velmi reaktivní a jejich doba setrvání v troposféře se pohybuje řádově od vteřin po desítky minut.

Doba setrvání je nemonotonní funkcí velikosti částic a exponenciálně klesá s rostoucí koncentrací částic, se kterými částice nebo jejich agregáty koagulují.

Zdroje atmosférického aerosolu, interakce částic aerosolu

Částice akumulačního modu tvoří převážnou část povrchu a podstatnou část hmotnosti atmosférického aerosolu.

Vznikají zejména kondenzací plynů (konverze plyn-částice), chemickou reakcí, kondenzací vody nebo ostatních par na již existující částice a koagulací částic nukleačního modu.

Jako primární částice je emitována pouze menší část částic akumulačního modu.

Obecně je jejich doba setrvání v atmosféře řádově dny až týdny, a z toho důvodu jsou částice akumulačního modu v průměru také nejpočetnější skupinou částic v troposféře.

Odstraňují se z atmosféry zejména v mokré depozici.

Zdroje atmosférického aerosolu, interakce částic aerosolu

Mod hrubých částic, o aerodynamickém průměru kolem 10 μm , tvoří částice primárně vzniklé působením mechanických sil.

Jedná se zejména o prach vytvářený větrem nebo dopravní a stavební aktivitou, spoluemisí s plynnými produkty při spalování uhlí nebo zpracování rud.

Nejmenší průměr částice generované mechanicky má aerodynamický průměr kolem 0.5 μm .

Omezení je dáno adhezními silami mezi částicemi navzájem a mezi částicemi a povrchem, na kterém ulpívají.

Velikostní módy atmosférických částic

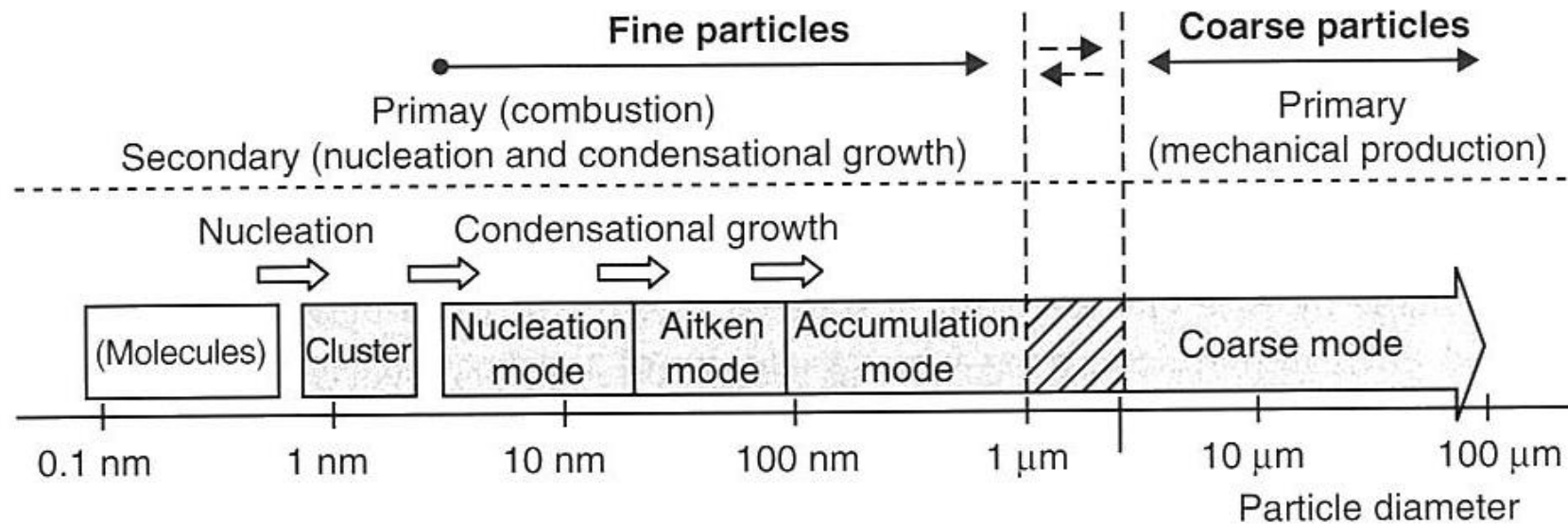


Figure 9.1 Size modes of atmospheric particles and important sources.

Zdroje atmosférického aerosolu, interakce částic aerosolu

Pro částice o aerodynamickém průměru $< 1 \mu\text{m}$ prudce roste síla adheze a jejich tvorba působením mechanických sil, ať již desintegrací nebo resuspendací již vytvořených, ale adherovaných částic, je velmi nepravděpodobná.

Pro částice o aerodynamickém průměru $< 10 \mu\text{m}$ platí, že se větrem neuvolní jednotlivé částice, ale jejich shluky nebo vrstvy.

Doba setrvání hrubého aerosolu v atmosféře je výsledkem rovnováhy mezi sedimentací a turbulentním promícháváním v přízemní vrstvě atmosféry.

Uvažujeme-li tloušťku vrstvy kolem 1 km, pak se doba setrvání částic pohybuje řádově od hodin po jeden až dva dny.

Atmosférické aerosoly

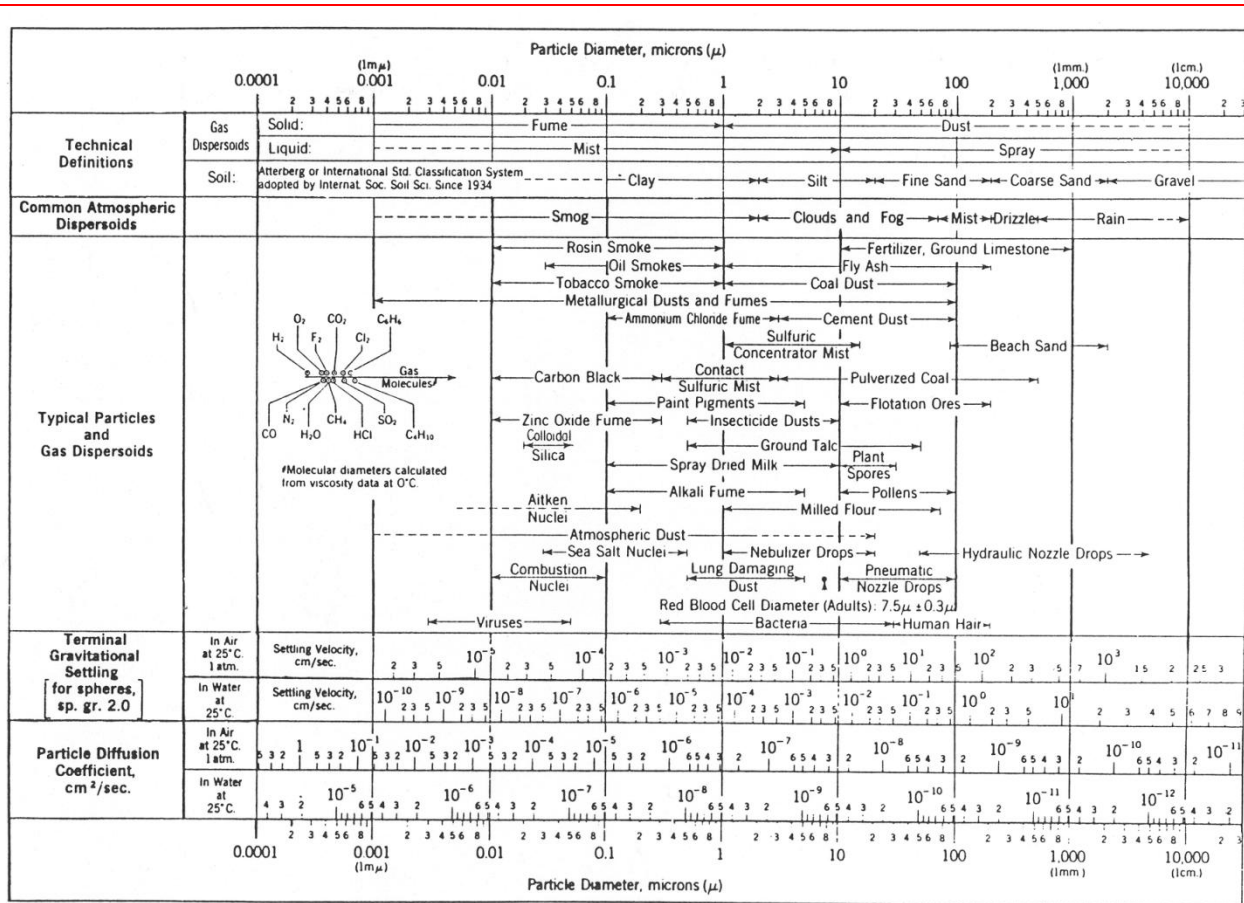


FIGURE 2-11 Some characteristics of environmental particles in both air and water. Note the enormous range of particle sizes, and the even larger range of settling velocities. Settling velocities and diffusion coefficients are calculated for spherical particles of density 2.0 g/cm^3 (at the lower end of the density range for materials of mineral origin). In water, a particle of lesser density may settle much more slowly than shown here, as can be the case for a particle of organic material, whose

Chemické složení atmosférického aerosolu

Většinu hmotnosti atmosférického aerosolu tvoří sulfáty, nitráty, amonné ionty, organický materiál, materiál zemské kůry (částice půd, zvětraných hornin a minerálů, resuspendovaný prach), mořská sůl, vodíkové ionty a voda.

Z těchto chemických entit tvoří sulfáty, amonné ionty, organický a elementární uhlík a některé přechodné kovy převážně jemný aerosol.

Materiál zemské kůry, včetně křemíku, vápníku, hořčíku, hliníku, železa, stejně jako některý bioaerosol (pyl, spory, části rostlin) tvoří naopak většinu hmotnosti hrubého aerosolu.

Nitráty jsou významnou složkou jak hrubého tak jemného aerosolu.

Jako součást jemného aerosolu jsou zejména ve formě nitrátu amonného zatímco v hrubém aerosolu jako produkt kondenzace par kyseliny dusičné na hrubých částicích.

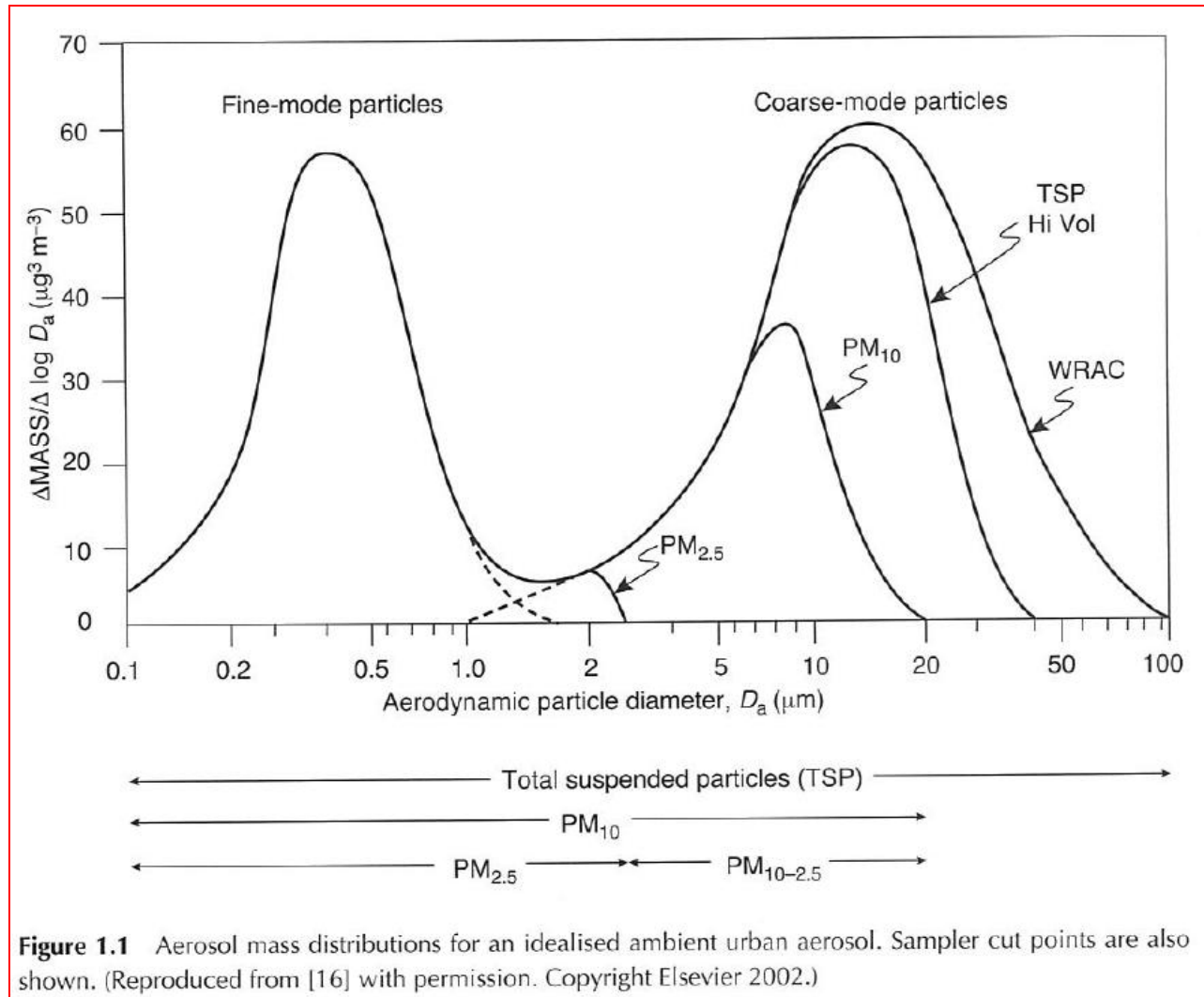
Chemické složení atmosférického aerosolu

Nejkomplikovanější chemické složení má **městský aerosol**, což je dáno tím, že k jeho tvorbě, na rozdíl například od pozadového aerosolu, přispívá široká škála různých zdrojů.

Více než dvě třetiny celkové hmotnosti sulfátů a amonných iontů jsou obsaženy v částicích jemného aerosolu.

Nitráty, sodík a chloridové ionty jsou rovnoměrně distribuovány mezi hrubý a jemný aerosol.

Hmotnostní distribuce aerosolu – modelový městský aerosol



Objemová distribuce aerosolu s převahou dopravních zdrojů

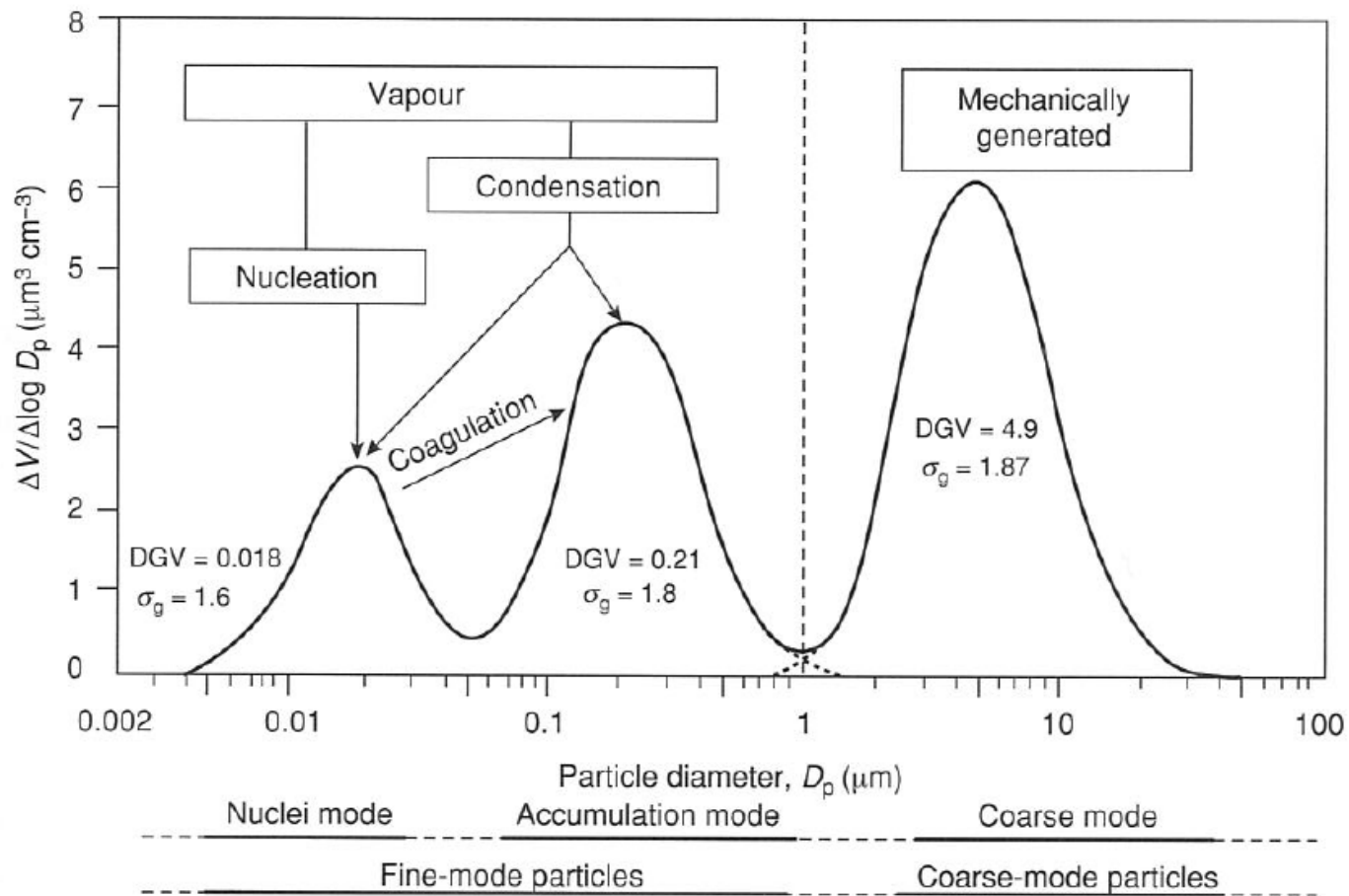


Figure 1.2 Aerosol volume distribution for traffic-dominated aerosol. Abbreviations: DGV, volume median diameter; σ_g , geometric standard deviation. (Reproduced from [16] with permission. Copyright Elsevier 2002.)

Srovnání velikostní distribuce městského a horského aerosolu

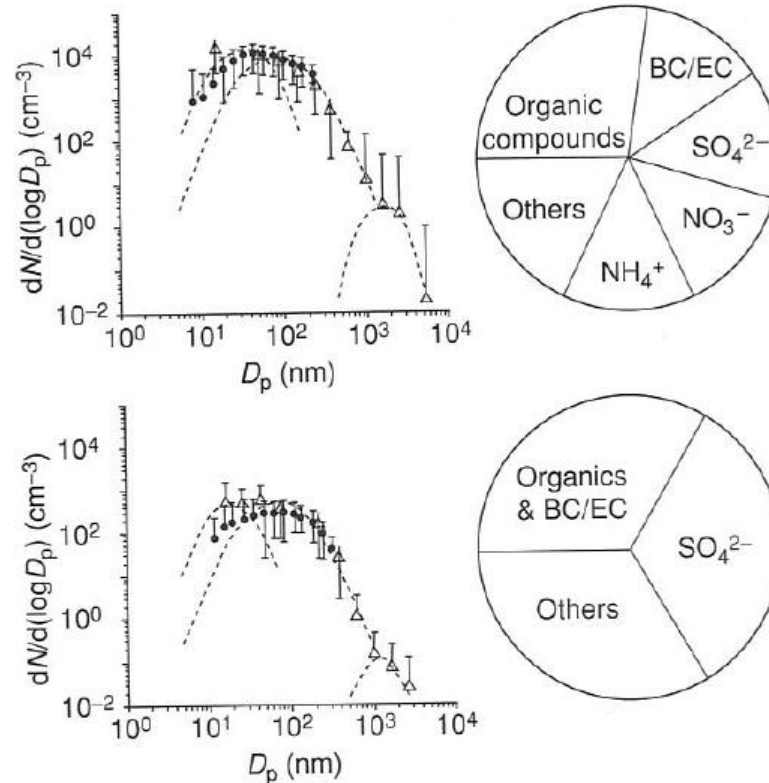


Figure 1.12 Characteristic examples of aerosol particle size distribution and chemical composition in urban (top) and high Alpine air (bottom). Graphs (left): number size distribution function $dN/d(\log d p)$ (symbols and error bars: arithmetic mean values and standard deviations, ~ ELPI, * SMPS, characteristic particle size modes). Pie charts (right): typical mass proportions of main components. (Reproduced from [74] with permission from Wiley-VCH Verlag.)

Atmosférické aerosoly – chemické složení

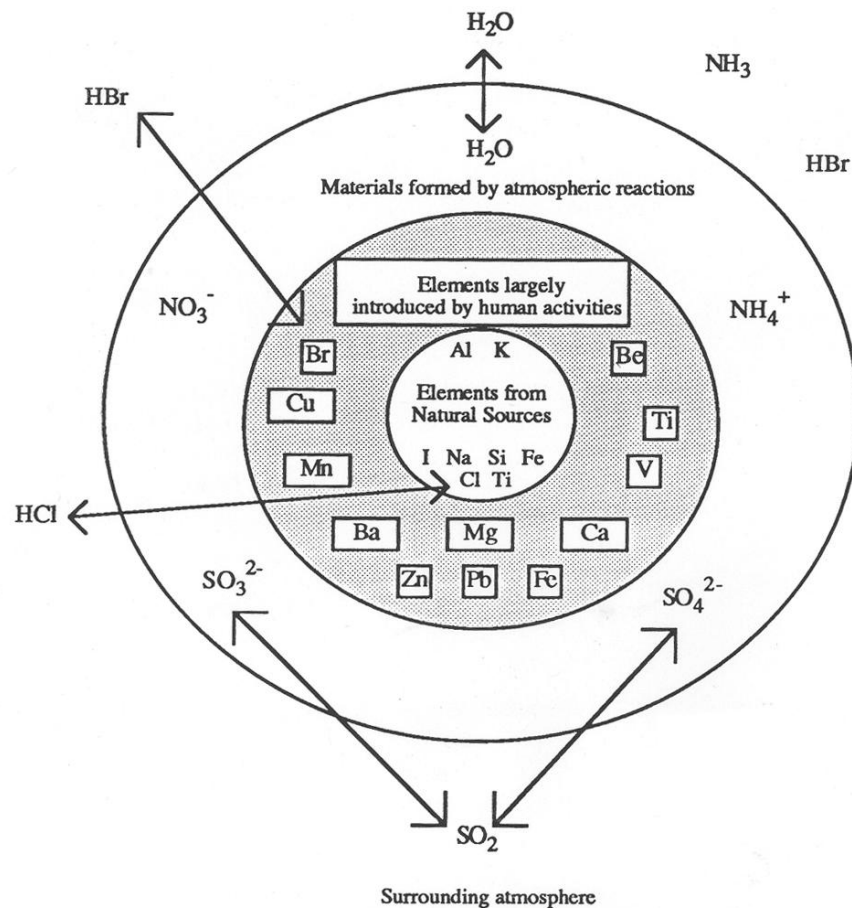


Figure 10.4. Some of the components of inorganic particulate matter and their origins.

Atmosférické aerosoly – chemické složení

Typické koncentrační rozsahy jednotlivých prvků ve 24 hodinových vzorcích jemného a hrubého aerosolu na pozad'ových, venkovských a městský stanicích

Prvek	Hrubý - H	Koncentrace [ng.m ⁻³]		
	Jemný - J	Pozad'ový aerosol	Vesnický aerosol	Městský aerosol
Fe	H a J	0,6 - 4 200	55 - 14 500	130 - 13 800
Pb	J	0,01 - 65	2 - 1 700	30 - 90 000
Zn	J	0,03 - 450	10 - 400	15 - 8 000
Cd	J	0,01 - 1	0,4 - 1 000	0,2 - 7 000
As	J	0,01 - 2	1 - 28	2 - 2 500
V	H a J	0,01 - 15	3 - 100	1 - 1 500
Cu	H a J	0,01 - 15	3 - 300	3 - 5 000
Mn	H a J	0,01 - 15	4 - 100	4 - 500
Hg		0,01 - 1	0,05 - 160	1 - 500
Ni	H a J	0,01 - 60	1 - 80	1 - 300
Sb	J	0 - 1	0,5 - 7	0,5 - 150
Cr	H a J	0,01 - 10	1 - 50	2 - 150
Co	H a J	0 - 1	0,1 - 10	0,2 - 100
Se	H a J	0,01 - 0,02	0,01 - 30	0,2 - 30

Chemické složení atmosférického aerosolu

Koncentrační rozsah prvků v tabulce je značný, což indikuje důležitost lokálních zdrojů.

Obecně platí, že nejvyšších koncentrací dosahují železo, olovo, měď a nižších koncentrací nabývají kobalt, rtuť a antimon.

Prvky, které jsou emitovány do atmosféry ze zdrojů spalování, jsou v aerosolu obvykle obsaženy ve formě oxidů (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Al_2O_3), ale obecně je jejich molekulární forma nejistá.

V oblastech blízko moře odráží složení aerosolu složení mořské vody obohacené organickými sloučeninami, které se vyskytují v její povrchové vrstvě.

Atmosférické aerosoly – cyklus částic aerosolů

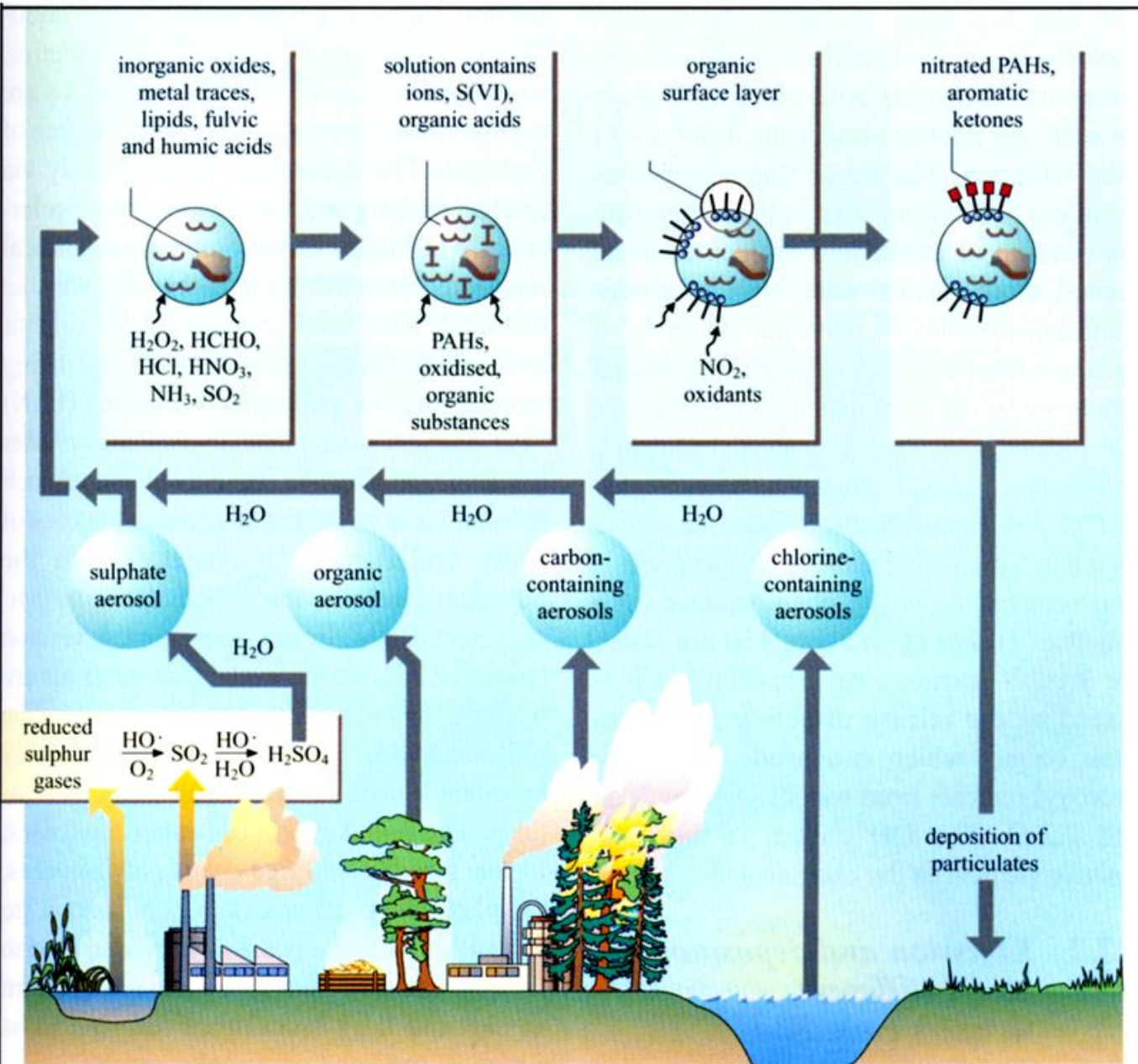
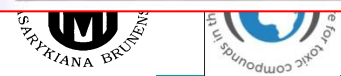


Figure 2.1.8 Cycle of atmospheric aerosol particles



Možná kontaminace mezi BC a neabsorbovaným materiálem na částicích sazí

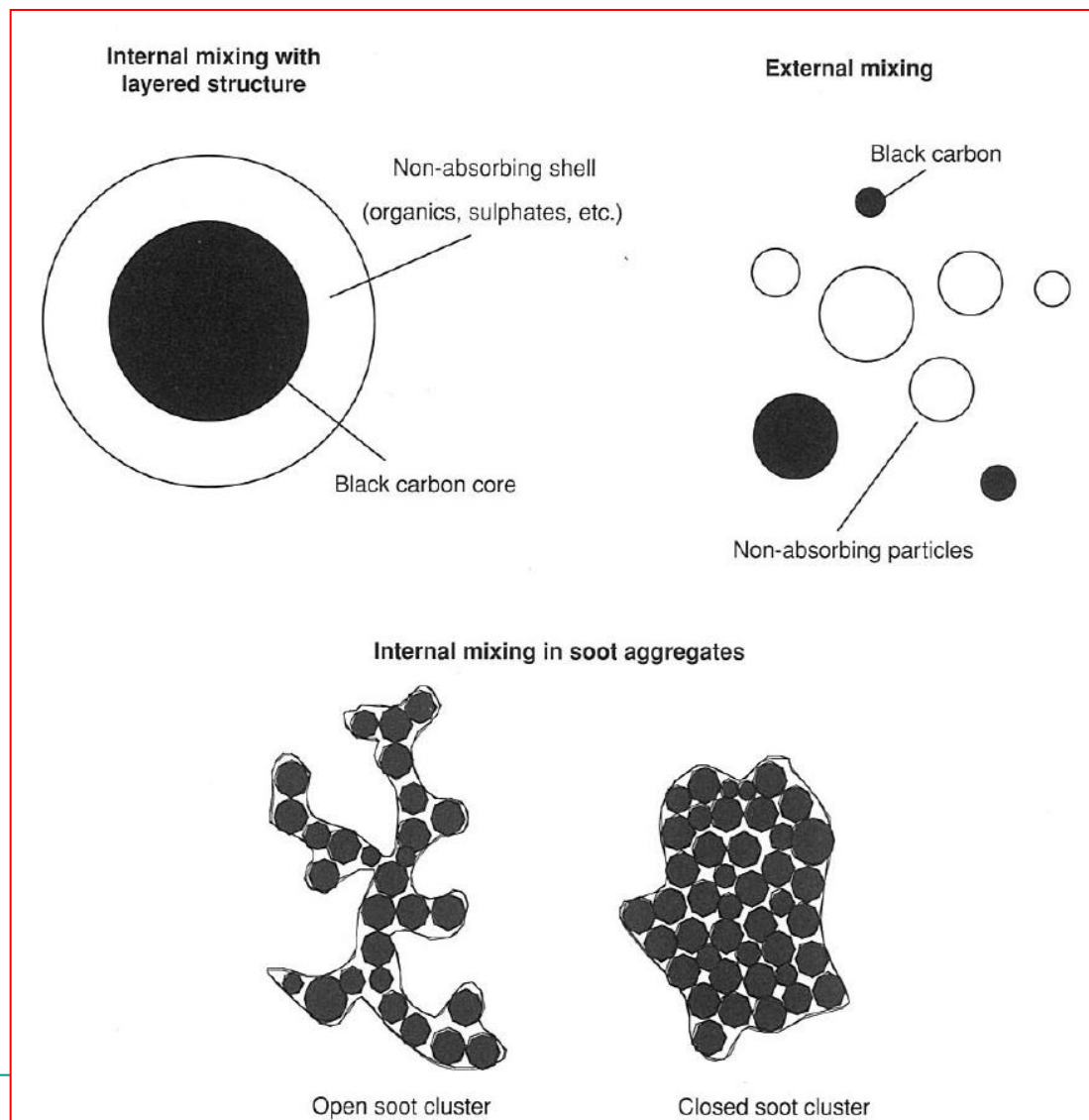


Figure 4.1 Diagram on possible combinations between BC and non-absorbing materials in soot particles. (Based on [26].)

Struktura sazi

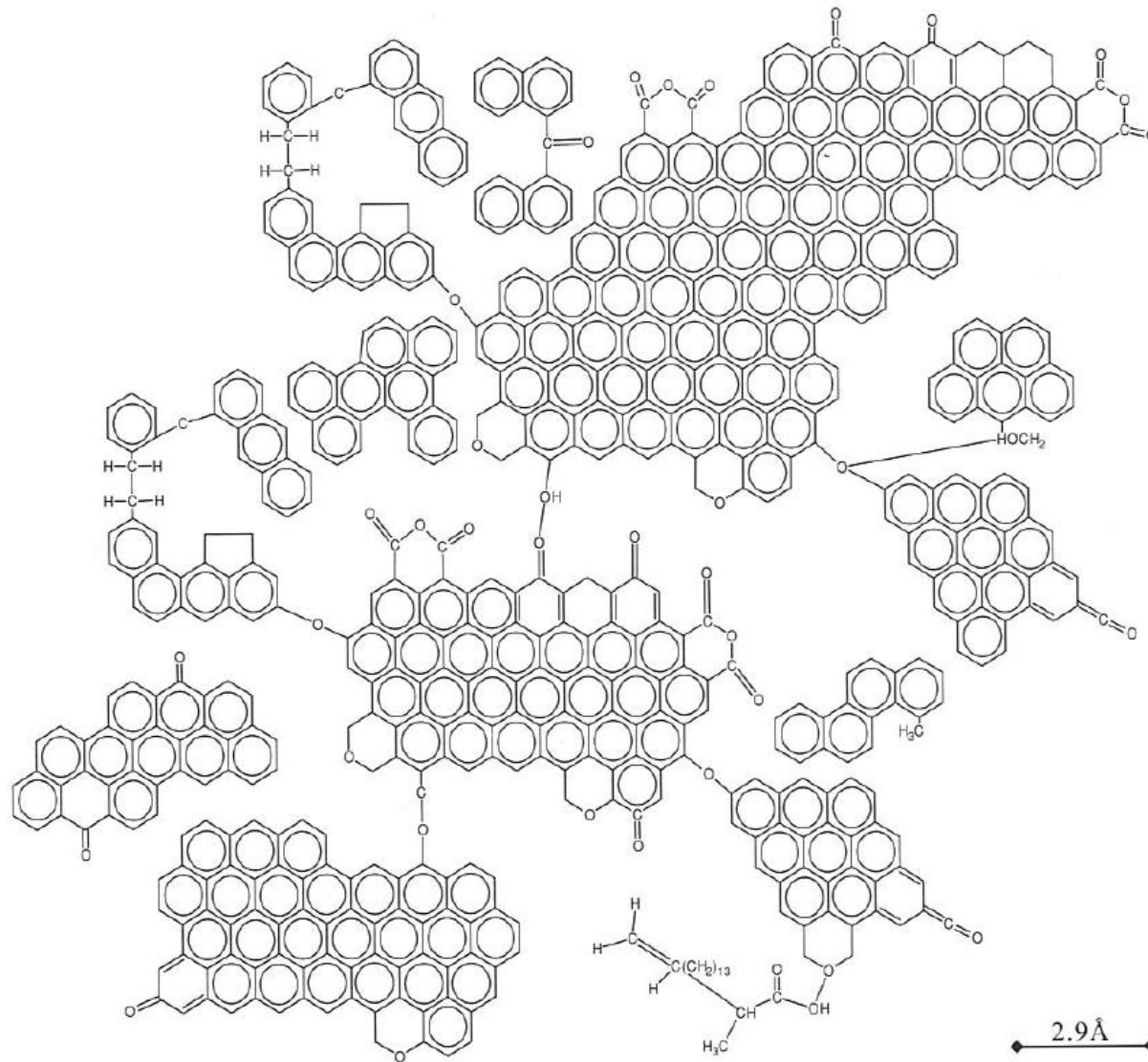


Figure 4.2 Structure of hexane soot. (Based on [27].)

Biogenic hydrocarbons influencing the composition of secondary organic aerosol

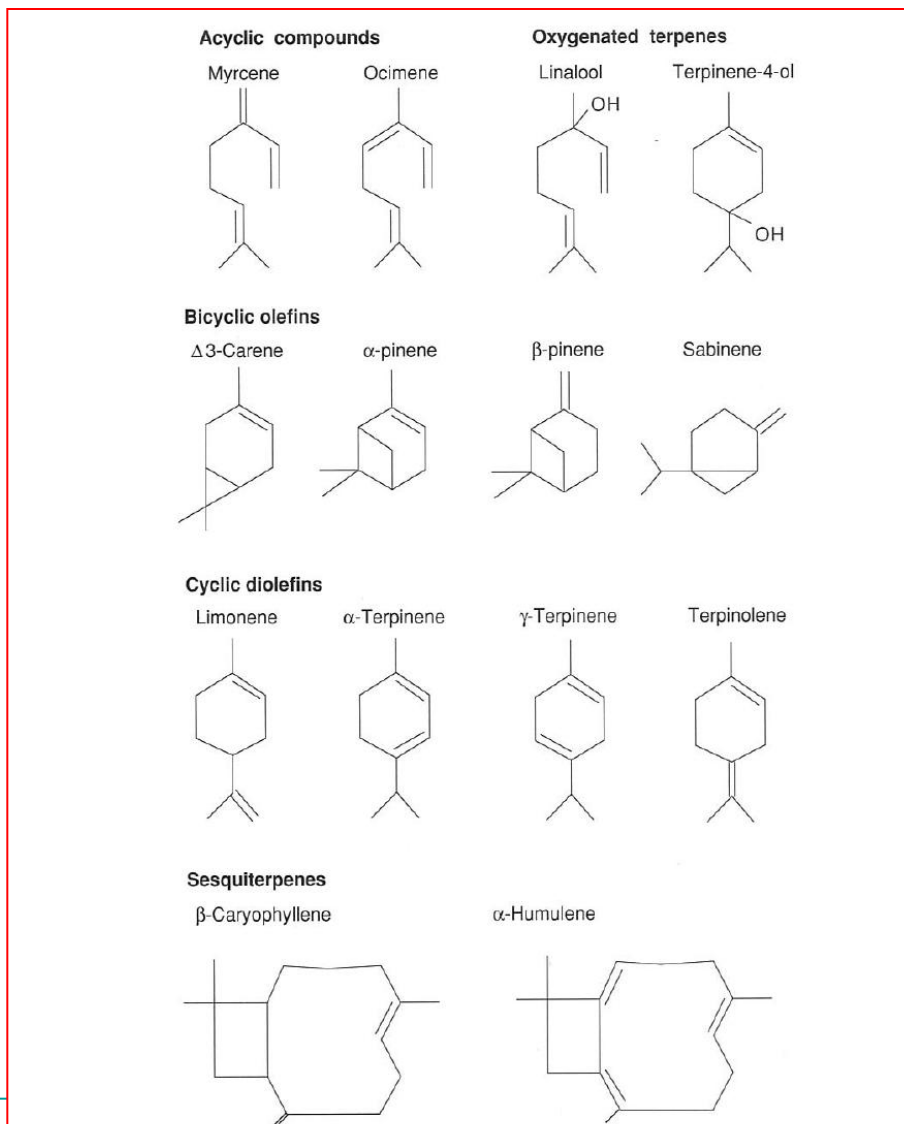

















Figure 4.3 Biogenic hydrocarbons influencing SOA formation in the atmosphere. Carbon atom bonds are shown with vertices, whereas the hydrogen atoms are not shown. (Reproduced from [35] by permission of American Geophysical Union. Copyright 1999 American Geophysical Union.)

Table 4.2 Structure and properties of PAH species

Structure	Nomenclature	Molecular Weight	Melting point ^a	Boiling point ^b	Log [<i>p</i> (torr)] 20°C ^c	Solubility (μg L ⁻¹) ^d
	Fluorene	166.23	116	295	-2.72	31 700
	Phenanthrene	178.2	101	339	-0.3.5	1290
	Atracene	178.2	216.2	340	-3.53	73
	Pyrene	202.3	156	360	-4.73	135
	Fluorathene	202.3	111	375	-4.54	260
	Benz(a)anthracene	228.3	160	435	-6.02	14
	Chrysene	228.3	255	448	-6.06	2
	Benzo(b)fluoranthene	252.33	168	481	-5.22	14 ^e
	Benzo(k)fluoranthene	252.33	217	481	-7.13	4.5
	Benzo(a)pyrene	252.33	175	495	-7.33	0.0
	Benzo(e)pyrene	252.31	178.7	493	-7.37	3.8
	Indeno[1,2,3-cd]pyrene	276.34	163	530 ^e	-10 ^e	0.5
	Benzo(ghi)perylene	276.34	277	525	-9.35	0.5
	Dibenz(a,h)anthracene	278.35	267	524	-10 ^e	0.5
	Coronene	300.36	439	590	-12.43	0.5

Polycyklické aromatické uhlovodíky

^{a, b, d} Finlayson and Pitts[57].^c Pankow and Bidleman [58].^e ATSDR [59].

Atmosférické aerosoly

Dělení dle:

- biologického účinku:

- ↪ aerosol obsahující toxické složky biologicky aktivní (těžké kovy, POPs,...),
- ↪ fibrogenní – daný chemickým složením a mechanickými vlastnostmi – azbest, prach z černého uhlí, živce, kaolín,
- ↪ dráždivý – prach z bavlny, lnu, peří, skleněná vlákna, alkalické uhličitany,
- ↪ alergenní,
- ↪ bez účinku.

Atmosférické aerosoly

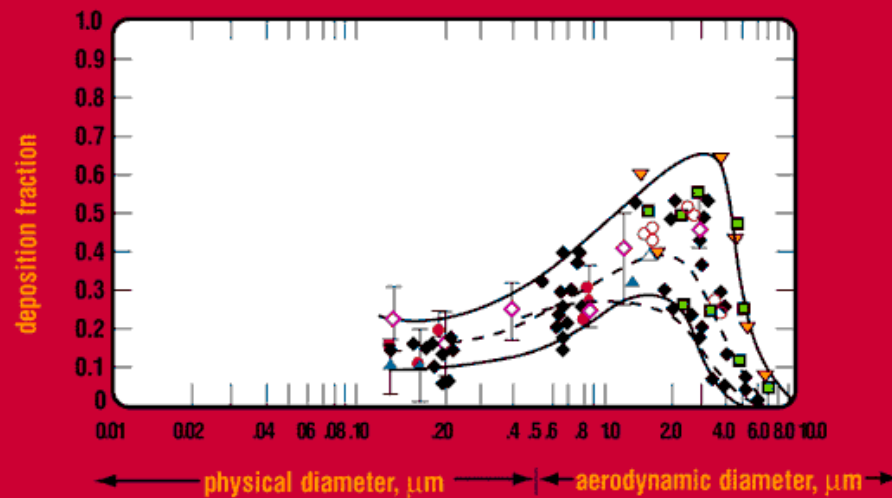
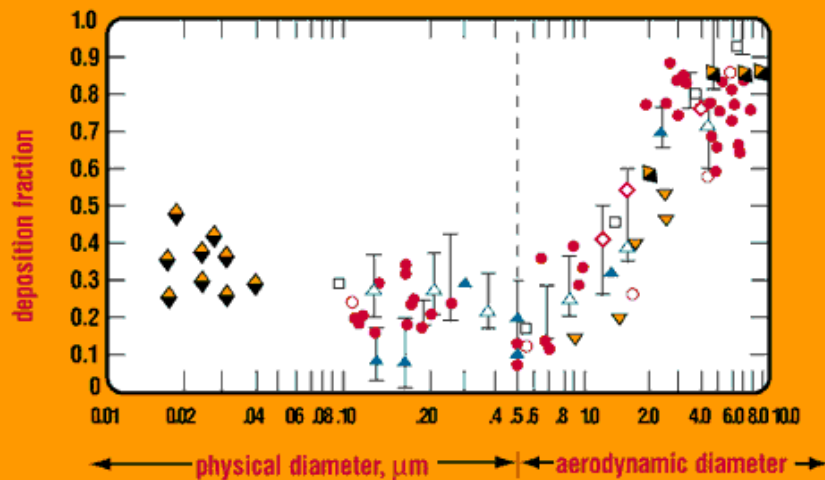
Vlivy:

- ↪ zvýšená oblačnost,
- ↪ vývoj oblačnosti,
- ↪ pokles přízemní teploty zemské atmosféry,
- ↪ snížení radiace.

Zdravotní vlivy


Částice přenášejí do těla toxické látky (Pb, Cd, Be, PAHs)

Efektivita zachycování
v dýchacím ustrojí



Dýchání nosem

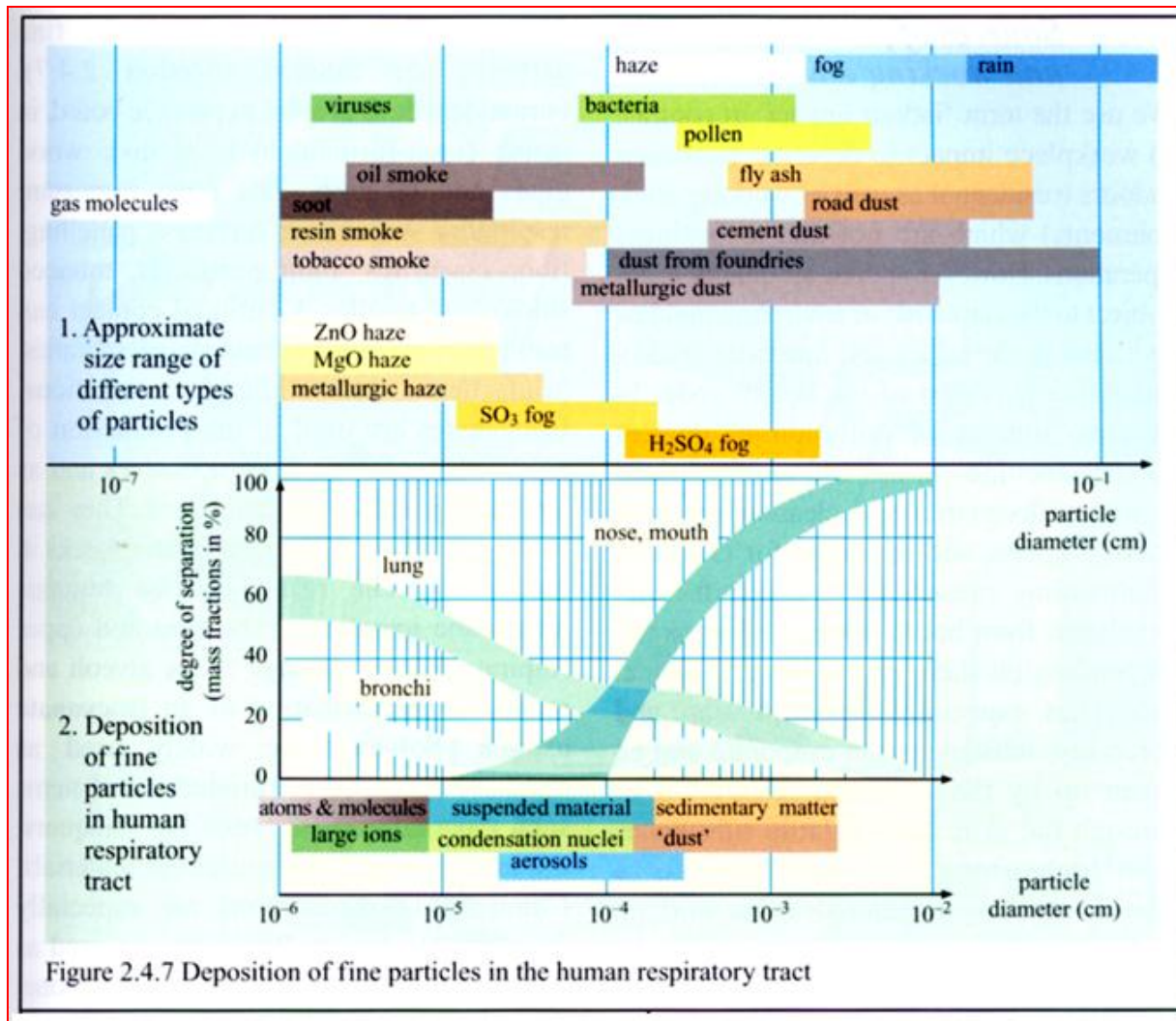
Místa ataku dýchacího systému v závislosti na rozpustnosti ve vodě



Sites of attack	Water solubility	Substances
eye, larynx, trachea	high	NH ₃ , HCl, HCHO, S ₂ Cl ₂ , CH ₂ =CH-CHO
bronchi, bronchioles	average	SO ₂ , Cl ₂ , Br ₂ , RCOCl, R(NCO) ₂
bronchioles, alveoli, capillaries	slight	O ₃ , O ₂ , NO ₂ , COCl ₂ , CdO,

Figure 2.4.8 Points of attack in the respiratory tract dependent on water solubility

Záchyt jemných částic dýchacím systémem člověka



Distribuce aerosolu

Počet

☞ Vznik oblaků

Povrch

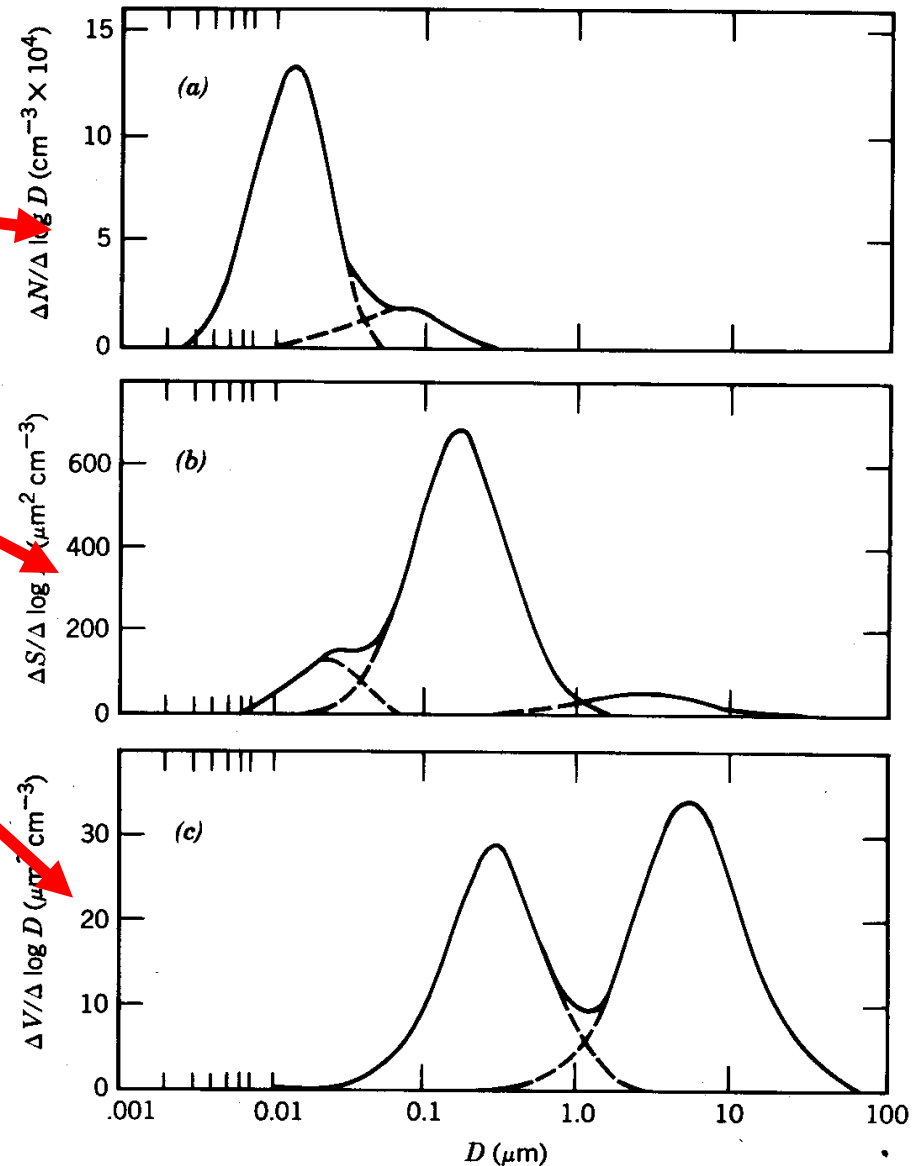
☞ Viditelnost

Objem

☞ Hmotnost

Hmotnost a počet

☞ Lidské zdraví



Radiace a jemné částice

1116 RADIATIVE EFFECTS OF ATMOSPHERIC AEROSOLS: VISIBILITY AND CLIMATE

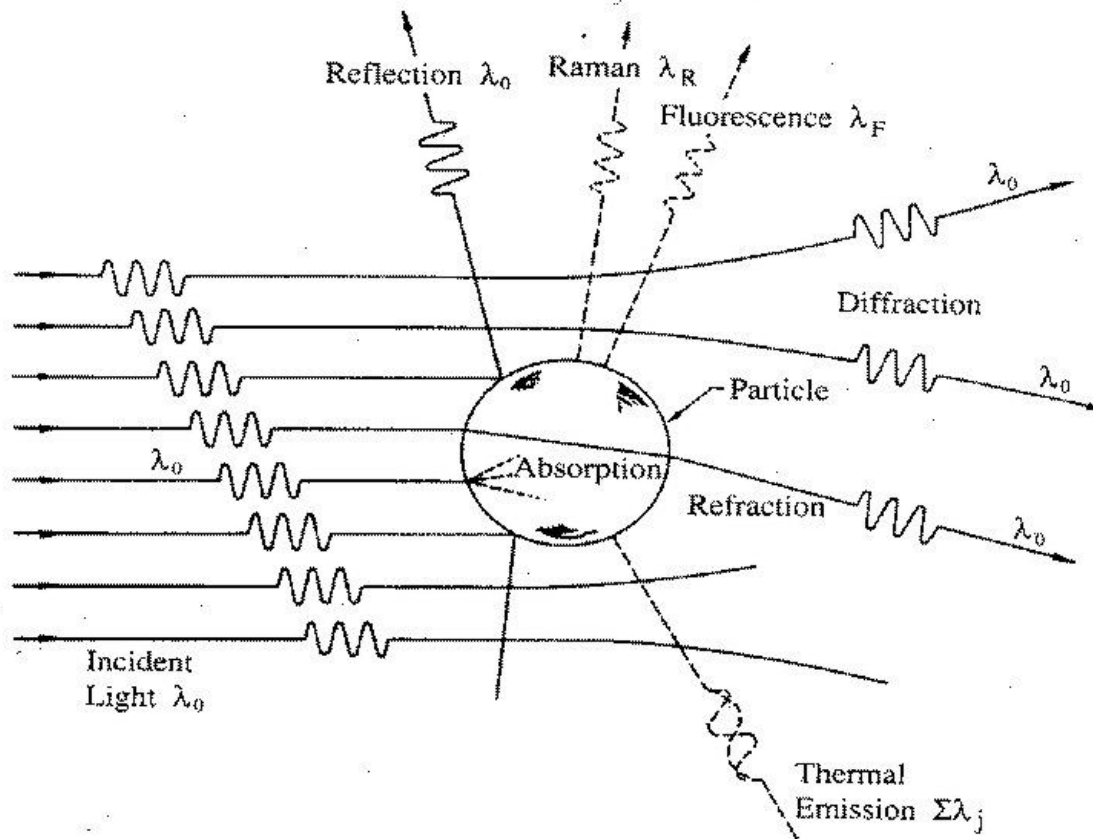
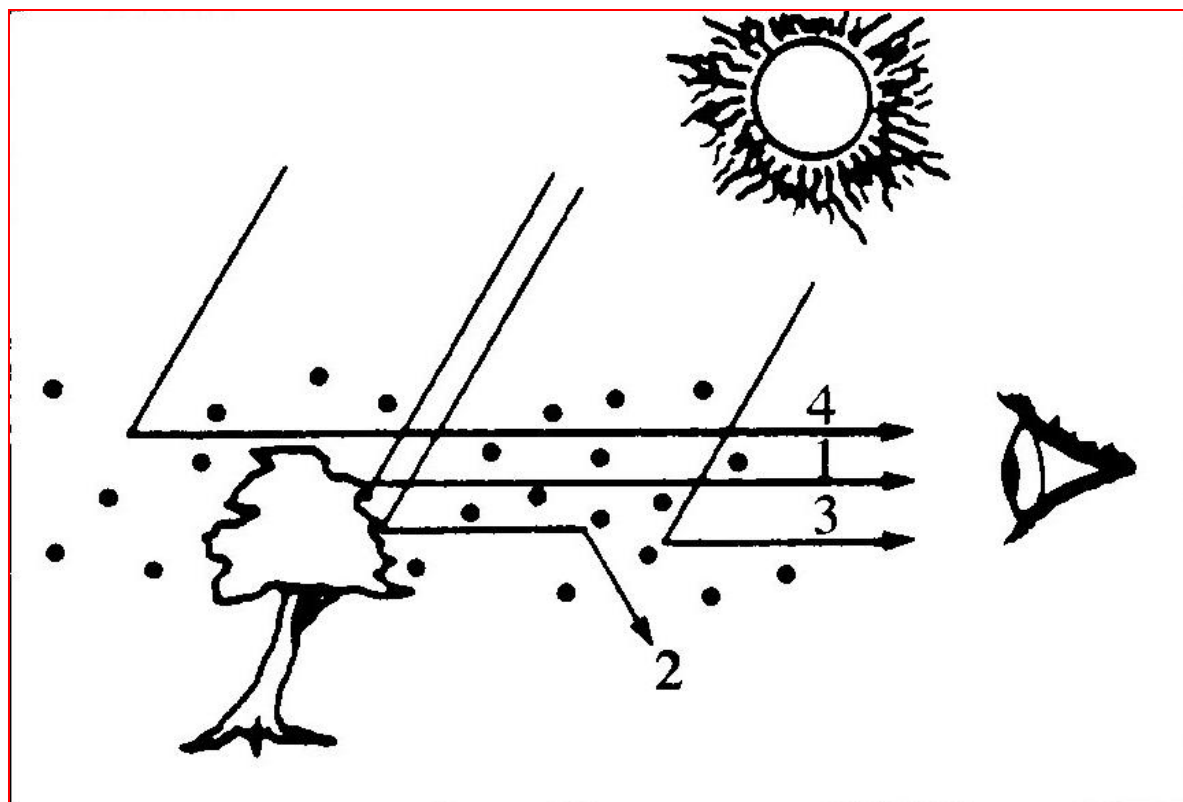


FIGURE 22.1 Mechanisms of interaction between incident radiation and a particle.

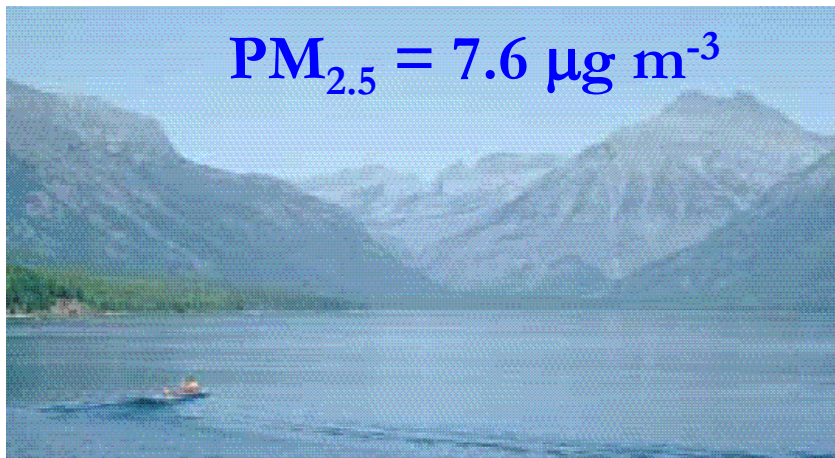
Atmosférická viditelnost (absorpce a scattering)

1. Zbytková
2. Scattered away
3. Scattered into
4. Airlight

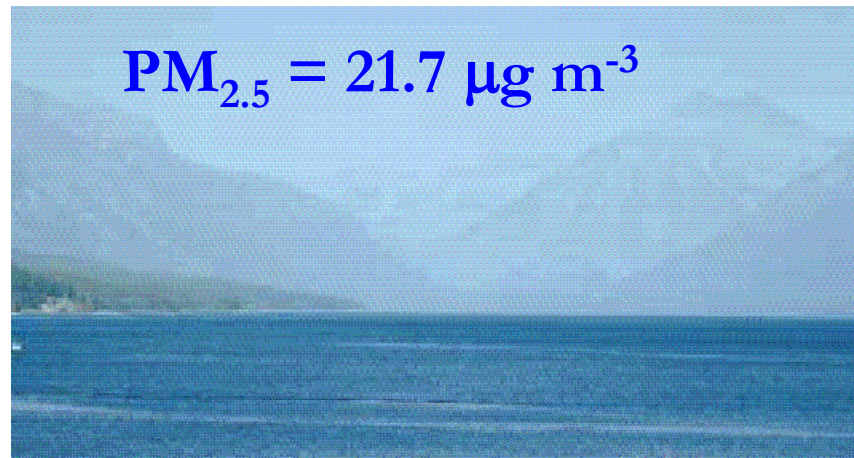


Extinkční koeficient jako indikátor PM_{2,5}

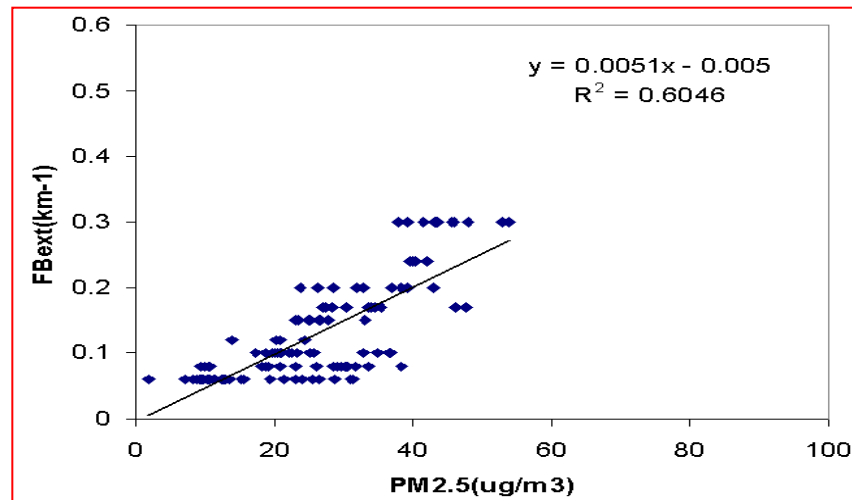
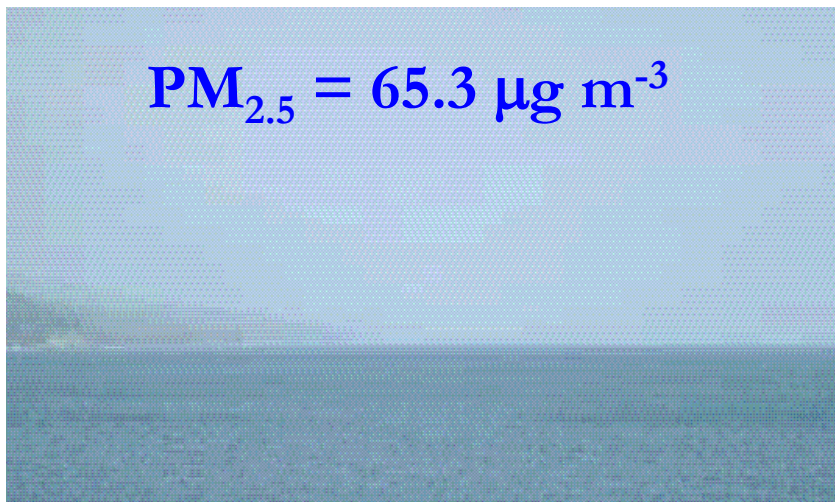
$$PM_{2.5} = 7.6 \mu\text{g m}^{-3}$$



$$PM_{2.5} = 21.7 \mu\text{g m}^{-3}$$

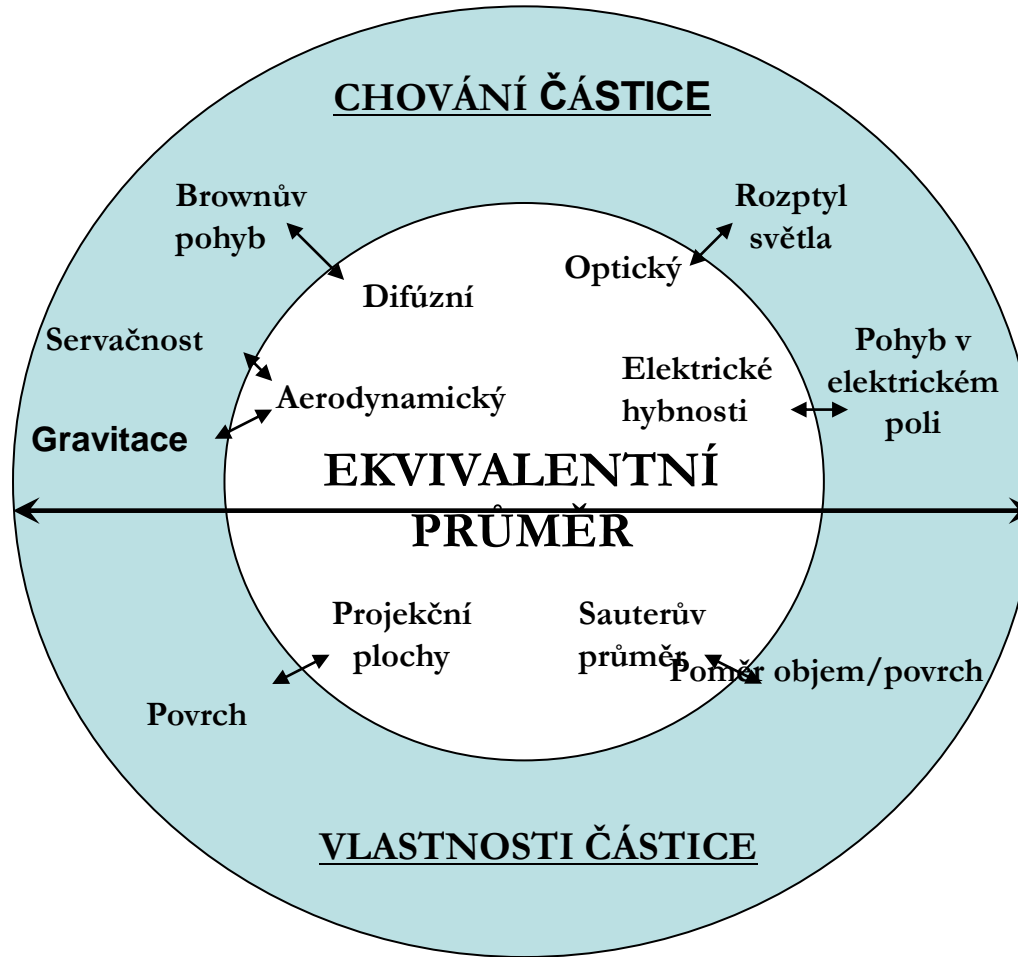


$$PM_{2.5} = 65.3 \mu\text{g m}^{-3}$$



Glacier National Park images are adapted from Malm, *An Introduction to Visibility* (1999) <http://webcam.srs.fs.fed.us/intropdf.htm>

Definice ekvivalentního průměru částice odvislá od měření jejího chování nebo vlastností





INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Inovace tohoto předmětu je spolufinancována
Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem
České republiky**